



**HÜCRESEL YAPI ELEMANLARININ (GEOCELL) ÇEKME
KAPASİTELERİNİN LABORATUVARDA YAPILAN ÇEKME
DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ**

Adem IŞIK

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2020

Adem IŞIK tarafından hazırlanan “HÜCRESEL YAPI ELEMANLARININ (GEOCELL) ÇEKME KAPASİTELERİNİN LABORATUVARDA YAPILAN ÇEKME DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ayhan GÜRBÜZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Doç. Dr. Cem AKGÜNER

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, TED Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Nail ÜNSAL

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Mustafa Kerem KOÇKAR

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 09/07/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Adem IŞIK

09/07/2020

HÜCRESEL YAPI ELEMANLARININ (GEOCELL) ÇEKME KAPASİTELERİNİN LABORATUVARDA YAPILAN ÇEKME DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ

(Doktora Tezi)

Adem IŞIK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2020

ÖZET

Bu çalışma kapsamında hücresel yapı elemanları ile zemin arasındaki sürtünme davranışının incelenmesi amacıyla laboratuvar çekme deneyleri kullanılmış ve elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak sürtünme davranışı hem teorik hem de analitik olarak ortaya konmuştur. Ayrıca belirlenen zemin-hücresel yapı elemanı sürtünme davranışı ile model duvar deneyleri üzerinde yükleme deneyleri yapılarak duvar davranışları incelenmiştir. Çekme deneyleri farklı düşey gerilmeler altında, boyutları ve rijitlikleri değişen hücresel yapı elemanları üzerinde, toplamda 55 adet olarak gerçekleştirilmiştir. Zemin ortamına gömülmüş hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri deney sonuçlarına göre teorik olarak belirlenmiş ve elde edilen teorik yaklaşım ile deneysel sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir. Hücresel yapı elemanlarının sürtünme davranışını modelleyebilmek amacıyla, uygulanan çekme deneyleri sonucunda elde edilen yük deplasman davranışları, çekme gerilmesi- deplasman grafiklerine dönüştürülerek, yeni bir sürtünme davranışı modelinin oluşturulabilmesi için bu grafikler genelleştirilmiştir. Deneysel çalışmada ölçülen birim deformasyon değerleri kullanılarak elde edilen maksimum çekme gerilmesi değerleri ile düşey gerilme ve hücresel yapı elemanları boyutları arasında genel bir ilişki ortaya konmuştur. Ayrıca çekme gerilmesi- deplasman eğrileri genelleştirildikten sonra, bu eğrilerde önemli değerler olan maksimum çekme gerilmesindeki deplasman ve nihai deplasman değerleri de düşey gerilme ve hücresel yapı elemanı boyutlarına bağlı olarak belirlenmiştir. Çekme yüklerine maruz kalan hücresel yapı elemanlarının sürtünme davranışı çekme kuvveti etkisindeki yapı tasarımlarda kullanılmak üzere çekme gerilmesi- deplasman ilişkilerini ortaya koyan genelleştirilmiş eşitlikler elde edilmiştir. Çekme kapasiteleri ve sürtünme davranışı belirlenen hücresel yapı elemanlarının bir istinat duvarı üzerinde donatı elemanı olarak performansının belirlenmesi amacıyla laboratuvarda model duvar deneyleri yapılmıştır. Hücresel yapı elemanının performansı, model duvar üzerinde geoşerit ve geoşerit-hücresel yapı elemanları kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 91105

Anahtar Kelimeler : Hücresel yapı elemanı, sürtünme davranışı, çekme kapasitesi, çekme gerilmesi, deplasman, deformasyon, model duvar

Sayfa Adedi : 321

Danışman : Prof. Dr. Ayhan GÜRBÜZ

ASSESSMENT OF PULLOUT CAPACITY OF GEOCELL BY LABORATORY

PULLOUT TESTS

(Ph. D. Thesis)

Adem IŞIK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2020

ABSTRACT

In the scope of this study, laboratory pullout tests were used to examine the friction behavior between geocell and the soil, and friction behavior was determined both theoretically and analytically using the experimental results obtained. Moreover, the soil-geocell friction behavior and foundation loading tests were performed on model wall tests and wall behaviors were investigated. A total of 55 laboratory pullout tests were carried out under different normal stresses, on geocell of varying sizes and stiffness. The pullout capacities of the geocell embedded in the soil were determined theoretically according to the experimental results and it was observed that there was a good agreement between the obtained theoretical approach and the experimental results. In order to model the friction behavior of the geocell in the soil, bond stress-displacements graphs have been generalized in order to create a new friction behavior model by transforming the load displacement behaviors. A general relationship between the maximum bond stress values obtained using the strain values measured in the experimental study and the dimensions of geocell reinforcements and the normal stress has been revealed. In addition, after the bond stress-displacement curves have been generalized, the displacement and ultimate displacement values at the maximum bond stress, which are important values in these curves, have also been determined depending on the dimensions of the geocell and normal stress. Generalized equations that reveal from the bond stress-displacement relationships are used in retaining wall designs. Moreover, model wall experiments were carried out in the laboratory in order to determine the performance of geocell whose pullout capacities and friction behavior were determined as reinforcement elements on a retaining wall. The performance of the geocell was compared using geostrip and geostrip-geocell on the model wall.

Science Code : 91105

Key Words : Geocell, interaction behavior, pullout capacity, bond stress, displacement, deformation, model wall

Page Number : 321

Supervisor : Prof. Dr. Ayhan GURBUZ

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamda bana değerli fikirlerini ve yardımını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ayhan GÜRBÜZ' e çok teşekkür ederim. Hocamın işine olan disiplinli çalışma şekli, bakış açısı, tarafıma disiplinli çalışma prensibini öğretme yaklaşımı ve destekleri için kendisine minnettar kalacağımı belirtmek isterim.

Deneysel çalışma kapsamında, deney düzeneğinin tasarımında ve deneylerin gerçekleştirilmesinde her türlü malzeme ve cihaz kullanımı için yanımda olan ve bana kıymetli tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Özgür Anıl' a çok teşekkür ederim.

Doktora tez çalışması süresince TİK toplantılarına katılan ve değerli görüşlerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Cem AKGÜNER'e teşekkür ederim. Ayrıca doktora tez jürime katılan Sayın Prof. Dr. Nail ÜNSAL ve Doç. Dr. Mustafa KOÇKAR' a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmaya malzeme katkısı sağlayan Geoplas Plastik Zemin Teknikleri ve Kimya San. Tic. Ltd. Şti adına Sayın Sadık ŞEREFOĞLU' na, çalışmalarda yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen Ar. Gör. Kaan YÜNKÜL' e, yapı mekaniği laboratuvar sorumlusu Sayın Faruk Ogün' e, zemin mekaniği laboratuvar sorumlusu Sayın Aydın Gökçe' ye ve değerli arkadaşım Tahsin Ömür BUDAK' a teşekkür ederim.

Son olarak, doktora çalışmalarım sırasında beni hiç yalnız bırakmayan ve değerli vakitlerini çaldığım eşim, oğlum ve kızıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xxvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxviii
1. GİRİŞ.....	1
2. ZEMİNLER İLE GEOSENTETİK DONATI ELEMANLARI ARASINDAKİ SÜRTÜNME DAVRANIŞI	9
2.1. Giriş.....	9
2.2. Zemin-Geosentetik Ara Yüz Etkileşim Mekanizmasının Belirlenmesi	11
2.2.1. Laboratuvar çekme deney düzenekleri.....	13
2.3. Zemin-Geosentetik Ara Yüzey Sürtünme Davranışını Etkileyen Faktörler	16
2.3.1. Kutu boyutlarının etkisi.....	16
2.3.2. Donatı elemanı boyunun etkisi.....	18
2.3.3. Donatı elemanı genişliğinin etkisi.....	21
2.3.4. Zeminin dane dağılımının etkisi.....	22
2.3.5. Donatı elemanı üzerindeki zemin yüksekliğinin etkisi	25
2.3.6. Zeminin sıklığının etkisi	26
2.3.7. Açıklık aparatı boyunun etkisi	29
2.3.8. Kutu ön yüzünün etkisi	31

	Sayfa
2.3.9. Düşey gerilmenin etkisi.....	35
2.3.10. Çekme hızının etkisi.....	38
2.3.11. Donatı elemanı türünün etkisi	39
2.4. Zemin-Hücresele Yapı Elemanı (Geocell) Ara Yüzey Sürtünme Davranışının Belirlenmesi	41
3. KOHEZYONSUZ ZEMİNLER İÇERİSİNDEKİ HÜCRESEL YAPI ELEMANLARININ (GEOCELL) ÇEKME KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK LABORATUVAR DENEY DÜZENİĞİ	47
3.1. Çekme Deney Düzenİğı.....	47
3.2. Ölçüm Cihazları	52
3.2.1. Deplasman ölçerler (LVDT' ler).....	52
3.2.2. Yük hücresi	53
3.2.3. Minyatür yük hücresi	54
3.2.4. Gerinim pulları	55
3.2.5. Veri toplama sistemi	55
3.3. Malzeme	56
3.3.1. Zemin	56
3.3.2. Hücresele yapı elemanı	59
3.4. Deneysel Çalışma.....	62
3.4.1. Zeminin sıkıştırılma işlemi	66
3.4.2. Gerinim pullarının hücresele yapı elemanı üzerine yerleştirilmesi	66
3.4.3. Deney programı.....	67
4. HÜCRESEL YAPI ELEMANLARININ ÇEKME KUVVETLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI	71
4.1. Çekme Kuvveti İle Deplasman İlişkisi.....	73

	Sayfa
4.2. Düşey Gerilmenin Çekme Kapasitesine Etkisi	74
4.3. Hücresel Yapı Elemanlarının Boyutlarının Çekme Kapasitesine Etkisi	83
4.3.1. Hücresel yapı elemanı boyunun (L) çekme kapasitesine etkisi	83
4.3.2. Hücresel yapı elemanın genişliğin (B) çekme kapasitesine etkisi	90
4.3.3. Hücresel yapı elemanı yüksekliğinin (h) çekme kapasitesine etkisi	97
4.4. Hücre Sayısının (S) Hücresel Yapı Elemanın Çekme Kapasitesine Etkisi	106
4.5. Hücresel Yapı Elemanlarının Yerleşim Konfigürasyonlarının Çekme Kuvvetine Etkisi	110
4.6. Hücresel Yapı Elemanları Rijitliğinin (E) Çekme Kapasitesine Etkisi	116
5. HÜCRESEL YAPI ELEMANLARININ (GEOCELL) ÇEKME KAPASİTELERİNİN TEORİK OLARAK BELİRLENMESİ	121
5.1. Giriş	121
5.2. Çekme Kuvvetinin Donatı Elemanı Üzerinde Mobilizasyonu	128
5.3. Hücresel Yapı Elemanlarının Çekme Kapasitesinin Teorik Olarak Belirlenmesi	130
5.3.1. Pasif direncin belirlenmesi	131
5.3.2. Sürtünme direncin belirlenmesi	141
5.3.3. Çekme kapasitesinin belirlenmesi	145
5.4. Sonuçlar ve Bulgular	147
6. HÜCRESEL YAPI ELEMANLARININ ÇEKME GERİLMESİ-DEPLASMAN DAVRANIŞI MODELİ	149
6.1. Giriş	149
6.2. Çekme Gerilmeleri	151
6.2.1. Hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen birim uzamalar	153
6.2.2. Çekme gerilmesinin belirlenmesi	153
6.3. Çekme Gerilmesi-Deplasman Modeli	157

	Sayfa
6.3.1. Maksimum çekme gerilmesinin analitik olarak belirlenmesi	160
6.3.2. Maksimum çekme gerilmesindeki deplasman (Smaks) ve nihai deplasman (Sult) değerlerinin belirlenmesi	168
6.4. Sonuçlar ve Bulgular	173
7. HÜCRESEL YAPI ELEMANI KULLANILARAK TASARLANAN MODEL İSTİNAT DUVARININ YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI	175
7.1. Giriş	175
7.2. Geosentetik Donatılı İstinat Duvarı Tasarımı	178
7.2.1. Dış stabilite tahkiki	178
7.2.2. İç stabilite tahkiki	182
7.3. Model Duvar Deneylerinde Kullanılan Donatı Elemanları Boylarının Belirlenmesi	185
7.3.1. Geoşerit donatı elemanı boyunun belirlenmesi	191
7.3.2. Hücresel yapı elemanı boyunun belirlenmesi	193
7.4. Model Duvar Deney Düzeneği	197
7.4.1. Malzeme	199
7.4.2. Duvar yükleme deneyi	200
7.4.3. Deney programı	204
7.5. Model Duvar Deney Sonuçları	206
7.5.1. Model duvar deneylerinde yanal duvar hareketlerin belirlenmesi	208
7.5.2. Model duvar deneylerinde temel ve temel zemini yüzeyinde meydana gelen oturmaların belirlenmesi	210
7.6. Model Duvar Hareketlerinin Çekme Gerilmesi-Deplasman İlişkileri Kullanılarak Belirlenmesi	212
7.7. Maliyet Analizi	216
7.8. Sonuçlar ve Bulgular	217

Sayfa

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	219
KAYNAKLAR	223
EKLER.....	233
EK-1. Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri	234
EK-2. Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler.....	289
EK-3. Test no:15 deney numunesinin çekme kapasitesinin teorik olarak belirlenmesi .	317
EK-4. Test no:5 deney numunesinin çekme gerilmesi-deplasman davranışı modeli	319
ÖZGEÇMİŞ	321

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Geosentetik donatı elemanı türlerine göre kayma mekanizması (Palmeira, 1987)	9
Çizelge 2.2. Laboratuvar çekme deney düzeneklerinin boyutları ve karakteristik özellikleri (Morsy ve diğ., 2019).....	14
Çizelge 2.3. Ortalama dane çapına göre içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri (Mehrijardi ve Motarjemi, 2018)	46
Çizelge 3.1. Elek analizi sonuçları.....	57
Çizelge 3.3. Hücresel yapı elemanının fiziksel ve mekanik özellikleri	60
Çizelge 3.4. Deney programı	68
Çizelge 3.5. Deneysel çalışma parametreleri ve numune konfigürasyonları	69
Çizelge 4.1. Deney programı ve numunelerin çekme kapasiteleri	72
Çizelge 4.2. Konfigürasyonları 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 olan deney numunelerinin çekme kapasitelerinin düşey gerilme ile değişimi	81
Çizelge 4.3. Farklı hücresel yapı elemanı genişliklerine sahip numunelerin çekme kapasitelerinin eleman boylarına göre değişimi.....	88
Çizelge 4.4. Hücresel yapı elemanı çekme kapasitelerinin eleman genişliklerine göre değişimi	91
Çizelge 4.5. Hücresel yapı elemanları yüksekliklerinin çekme kapasitesi ile değişimi .	98
Çizelge 4.6. Hücresel yapı elemanları boyutlarının ve hücre sayısının çekme kapasitesine etkisi	107
Çizelge 4.7. Toplam hücre sayısı iki olan hücresel yapı elemanları konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi.....	112
Çizelge 4.8. Toplam hücre sayısı üç olan hücresel yapı elemanları konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi.....	112
Çizelge 4.9. Toplam hücre sayısı altı olan hücresel yapı elemanları konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi.....	112

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Zemin türüne göre tipik toprak basınç değerleri (Das, 2007).....	134
Çizelge 5.2. Hücresel yapı elemanlarına ait birim uzamalar ve uzama miktarları	136
Çizelge 5.3. Deney numuneerine ait pasif toprak basınç katsayıları ve mobilizasyon faktörleri.....	137
Çizelge 5.4. Deneysel ve teorik olarak hesaplanan çekme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	146
Çizelge 6.1. Deney sonuçları	159
Çizelge 6.2. Maksimum çekme gerilmesinin belirlenmesinde kullanılan katsayılar.....	161
Çizelge 6.3. Ölçülen ve hesaplanan maksimum çekme gerilmelerinin (τ_{maks}) karşılaştırılması.....	167
Çizelge 6.4. Ölçülen ve hesaplanan maksimum deplasmanların (S_{maks}) karşılaştırılması.....	170
Çizelge 6.5. Ölçülen ve hesaplanan nihai deplasmanların (S_{ult}) karşılaştırılması	172
Çizelge 7.1. İstinat duvarlarında birim alana göre duvar maliyeti (Dolar cinsinden).....	177
Çizelge 7.2. GS=1 için geoşerit donatı elemanının boyunun hesaplanması	193
Çizelge 7.3. L= 1.0 m geoşerit donatı boyu için bloklara gelen yanal yüklerin derinlikle değişimi	193
Çizelge 7.4. Hücre yüksekliği 50 mm için derinlikle değişen düşey gerilmelere göre çekme kapasiteleri (P)	197
Çizelge 7.5. Donatı elemanların fiziksel ve mekanik özellikleri	200
Çizelge 7.6. Duvar derinliğince uygulanan düşey gerilme	213
Çizelge 7.7. Duvar derinliğince uygulanan yüklere göre tahmin edilen k değerleri	215
Çizelge 7.8. Duvar derinliğince uygulanan yüklere göre hesaplanan yanal deplasmanlar	215

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Yapı yükleri altında geosentetiklerin yanal yüklere karşı etkileşim mekanizması (Roodi, 2016)	3
Şekil 1.2. Hücresel yapı elemanı (PRS Geo-Technologies)	4
Şekil 2.1. Geosentetik donatı elemanları üzerinde meydana gelen kayma mekanizması a) geotekstil veya düz metal şerit, b) nervürlü veya dişli metal şerit, c) geogrid (Mitchell ve Christopher, 1990).....	10
Şekil 2.2. Geosentetik donatılı ile güçlendirilmiş yapılar a) köprü ayağı temeli, b) bina dolgu temeli, c) yol dolgusu ve d) şevin görünüşü	11
Şekil 2.3. Zemin-geosentetik ara yüz sürtünme davranışının belirlenmesi için yapılan deneyler a) üç eksenli basınç deneyi, b) kesme kutusu deneyi, c) çekme deneyi	12
Şekil 2.4. Donatı elemanı üzerinde farklı bölgelerde meydana gelen ara yüzey sürtünme mekanizmaları (Palmeira, 2009)	13
Şekil 2.5. Çekme kuvveti-deplasman davranışının çekme deney kutusu boyutlarına göre değişimi a) küçük ölçekli b) standart ölçekli c) büyük ölçekli (Roodi ve diğ., 2018).....	18
Şekil 2.5. Çekme kuvveti-deplasman davranışının eleman boylarına göre değişimi (Moraci ve Recalcatti, 2006)	19
Şekil 2.6. Farklı şekillere sahip enine donatı elemanı üzerinde meydana gelen pasif direnç ile $h/D50$ arasındaki ilişki (Palmeira, 2009).....	24
Şekil 2.7. Zemin türüne bağlı olarak çekme kuvveti ile deplasman arasındaki ilişki (Roodi ve Zornberg, 2017).....	24
Şekil 2.8. Donatı elemanı üstündeki ve altındaki zemin yüksekliğinin çekme davranışına etkisi (Farrag ve diğ., 1993).....	26
Şekil 2.9. Zemin yoğunluğunun çekme kapasitesine olan etkisi	27
Şekil 2.10. Zemin sıkılığın çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi (Lopes ve Ladeira, 1996a).....	28
Şekil 2.11. Açıklık aparatı boyunun çekme davranışına etkisi a) çekme kuvveti-deplasman ilişkisi b) kutu ön yüzünde meydana gelen yanal zemin basıncı ile açıklık aparatı boyu ilişkisi (Farrag ve diğ., 1993)	30
Şekil 2.12. Açıklık aparatının çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi (Lopes ve Ladeira, 1996).....	31

Şekil	Sayfa
Şekil 2.13. Çekme deneylerinde hazırlanan farklı pürüzlülüklerdeki kutu iç yüzeyleri a) membran kaplama ile yağlanmış iç yüzey b) metal iç yüzey c) zımpara kâğıdı ile kaplanmış iç yüzey d) yapıştırılmış kum daneleri ile oluşturulan iç yüzey (Palmeira ve Milligan, 1989)	32
Şekil 2.14. Farklı pürüzlülüklerdeki kutu iç yüzeylerine göre çekme davranışları a) normalize çekme gerilmesi-deplasman ilişkisi b) normalize çekme gerilmesi-duvar ön yüzü pürüzlülük açısı (Palmeira ve Milligan, 1989).....	33
Şekil 2.15. Kutu ön yüzünün çekme davranışına etkisi a) çekme deney şematiği b) rijit kutu ön yüzü c) esnek kutu ön yüzü (Sugimoto ve diğ., 2001).....	34
Şekil 2.16. Düşey gerilmenin çekme kapasitesine olan etkisi (Farrag ve diğ., 1993)	35
Şekil 2.17. Belli bir çekme anında ($t=0-15$ dk) geogrid donatı elemanı üzerinde elde edilen deformasyon çizgileri (Ezzein ve Bathurst, 2014)	36
Şekil 2.18. Düşey gerilmenin çekme kapasitesine olan etkisi (Roodi ve Zornberg, 2017).....	37
Şekil 2.19. Düşey gerilmenin çekme kapasitesine olan etkisi (Morsy ve diğ., 2019)	37
Şekil 2.20. Çekme hızının çekme kapasitesine olan etkisi (Farrag ve diğ., 1993)	38
Şekil 2.21. Farklı geogrid donatı elemanı türleri için çekme kuvveti-deplasman eğrileri (Moraci ve Recalcatti, 2006).....	40
Şekil 2.22. Farklı donatı elemanı türleri için çekme kuvveti-deplasman eğrileri (Roodi ve Zornberg, 2017).....	41
Şekil 2.23. Hücresel donatı elemanına ait şematik görünüş (Khedkar ve Mandal, 2009).....	42
Şekil 2.24. Çekme kuvveti-normalize deplasman ilişkisi a) düşey gerilme=75 kPa b) düşey gerilme=100 kPa (Khedkar ve Mandal, 2009).....	43
Şekil 2.25. Nümerik ve deneysel olarak belirlenen çekme kapasitesi ile H/S oranları arasındaki ilişki (Khedkar ve Mandal, 2009)	44
Şekil 2.26. Ortalama dane çapına göre hücresel yapı elemanlarının zeminler içerisindeki çekme kuvveti-deplasman ilişkileri (Han ve diğ., 2013).....	44
Şekil 2.22. Zemin-zemin ve zemin-hücresel yapı elemanı (geocell) arasında belirlenen Mohr kırılma zarfları a) $Dr=50\%$ b) $Dr=70\%$ (Mehrdjardi ve Motarjemi, 2018).....	45
Şekil 3.1. Çekme deney düzeneğine ait şematik görünüş.....	48
Şekil 3.2. Çekme deney düzeneğinin şematik görünüşü a) yandan görünüş, b) üstten görünüş	50

Şekil	Sayfa
Şekil 3.3. Açıklık aparatı ve hücresel yapı elemanının şematik gösterimi	51
Şekil 3.4. Kum malzemesine ait dane dağılım eğrisi.....	57
Şekil 3.5. Kum malzemesine ait kesme kutusu deney sonucu.....	58
Şekil 3.6. Kum malzemesine ait kayma mukavemeti açısı grafiği	59
Şekil 3.7. Hücresel yapı elemanlarına ait gerilme-birim uzama grafikleri	61
Şekil 3.8. Hücresel yapı elemanına ait şematik gösterim	62
Şekil 3.9. Deneysel çalışma akış diyagramı.....	64
Şekil 4.1. Hücresel yapı elemanının şematik gösterimi	71
Şekil 4.2. Hücresel yapı elemanların kohezyonsuz zeminler içerisindeki tipik çekme kuvveti-deplasman ilişkisi	73
Şekil 4.3. Konfigürasyon 1x1 ve h=100 mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri.....	75
Şekil 4.4. Konfigürasyon 1x1 ve h=150 mm yükseklikleri için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri	75
Şekil 4.5. Konfigürasyon 1x2 ve h=100 mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri.....	76
Şekil 4.6. Konfigürasyon 1x2 ve h=150 mm yükseklikleri için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri	76
Şekil 4.7. Konfigürasyon 2x1 ve h=100 mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri.....	77
Şekil 4.8. Konfigürasyon 2x1 ve h=150 mm yükseklikleri için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri	77
Şekil 4.9. Konfigürasyon 2x2 ve h=100 mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında çekme kuvveti-deplasman ilişkileri.....	78
Şekil 4.10. Konfigürasyon 2x2 ve h=150 mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri.....	78

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. Konfigürasyon 3x1 ve h=100 mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri.....	79
Şekil 4.12. Konfigürasyon 3x1 ve h=150 mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri.....	79
Şekil 4.13. Konfigürasyon 3x2 ve h=100 mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri.....	80
Şekil 4.14. Konfigürasyon 3x2 ve h=150 mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri.....	80
Şekil 4.15. Hücre yüksekliği 100 mm için 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 konfigürasyonlarına sahip deney numunelerinin çekme kapasitelerinin düşey gerilme ile değişimi.....	82
Şekil 4.16. Hücre yüksekliği 150 mm için 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 konfigürasyonlara sahip deney numunelerinin çekme kapasitelerinin düşey gerilme ile değişimi.....	82
Şekil 4.17. Hücresel yapı elemanı genişliği 130 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı boyu ile değişimi	84
Şekil 4.18. Hücresel yapı elemanı genişliği 130 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı boyu ile değişimi	84
Şekil 4.19. Hücresel yapı elemanı genişliği 260 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı boyu ile değişimi	85
Şekil 4.20. Hücresel yapı elemanı genişliği 260 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı boyu ile değişimi	85
Şekil 4.21. Hücresel yapı elemanı genişliği 390 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı boyu ile değişimi	86
Şekil 4.22. Hücresel yapı elemanı genişliği 390 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı boyu ile değişimi.....	86

Şekil	Sayfa
Şekil 4.23. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında farklı genişliklere sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman boyuna bağlı olarak değişimi	89
Şekil 4.24. $\sigma_v=18.10$ kPa düşey gerilme altında farklı genişliklere sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman boyuna bağlı olarak değişimi	89
Şekil 4.25. $\sigma_v=31.40$ kPa düşey gerilme altında farklı genişliklere sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman boyuna bağlı olarak değişimi	90
Şekil 4.26. Hücresel yapı eleman boyu 170 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı genişliği ile değişimi	92
Şekil 4.27. Hücresel yapı eleman boyu 170 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı genişliği ile değişimi	92
Şekil 4.28. Hücresel yapı eleman boyu 340 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı genişliği ile değişimi	93
Şekil 4.29. Hücresel yapı eleman boyu 340 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı genişliği ile değişimi	93
Şekil 4.30. Hücresel yapı eleman boyu 510 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı genişliği ile değişimi	94
Şekil 4.31. Hücresel yapı eleman boyu 510 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı genişliği ile değişimi	94
Şekil 4.32. Hücresel yapı eleman boyu 850 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı genişliği ile değişimi	95
Şekil 4.33. Hücresel yapı eleman boyu 850 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı genişliği ile değişimi	95
Şekil 4.34. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında farklı boylara sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman genişliğine bağlı olarak değişimi	96

Şekil	Sayfa
Şekil 4.35. $\sigma_v=18.10$ kPa düşey gerilme altında farklı genişliklere sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman boyuna bağlı olarak değişimi	96
Şekil 4.36. $\sigma_v=31.40$ kPa düşey gerilme altında farklı genişliklere sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman boyuna bağlı olarak değişimi	97
Şekil 4.37. Konfigürasyonu 1x1 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	99
Şekil 4.38. Konfigürasyonu 1x2 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	99
Şekil 4.39. Konfigürasyonu 1x3 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	100
Şekil 4.40. Konfigürasyonu 1x5 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	100
Şekil 4.41. Konfigürasyonu 2x1 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	101
Şekil 4.42. Konfigürasyonu 2x2 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	101
Şekil 4.43. Konfigürasyonu 2x3 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	102
Şekil 4.44. Konfigürasyonu 2x5 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	102
Şekil 4.45. Konfigürasyonu 3x1 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	103
Şekil 4.46. Konfigürasyonu 3x2 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	103
Şekil 4.47. Konfigürasyonu 3x3 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	104
Şekil 4.48. Konfigürasyonu 3x5 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	104
Şekil 4.49. Konfigürasyonları 1x1, 1x2, 1x3, 1x5, 2x1, 2x2, 2x3, 2x5, 3x1, 3x2, 3x3 ve 3x5 olan hücresel yapı elemanlarının 10.12 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitelerinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	105

Şekil	Sayfa
Şekil 4.50. Konfigürasyonları 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 olan hücresel yapı elemanlarının 18.10 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitelerinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	105
Şekil 4.51. Konfigürasyonları 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 olan hücresel yapı elemanlarının 31.40 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitelerinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi	106
Şekil 4.52. Hücre boyutlarının ve sayısının 10.12 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitesine olan etkisi	109
Şekil 4.53. Hücre boyutlarının ve sayısının 18.10 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitesine olan etkisi	109
Şekil 4.54. Hücre boyutlarının ve sayısının 31.40 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitesine olan etkisi	110
Şekil 4.55. Aynı hücre sayısına fakat farklı konfigürasyonlara sahip hücresel yapı elemanlarının yerleşim planı	111
Şekil 4.56. Toplam hücre sayısı iki olan hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkilerine etkisi	113
Şekil 4.57. Toplam hücre sayısı üç olan hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkilerine etkisi	113
Şekil 4.58. Toplam hücre sayısı altı olan hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkilerine etkisi	114
Şekil 4.59. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi	114
Şekil 4.60. $\sigma_v=18.10$ kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi	115
Şekil 4.61. $\sigma_v=31.40$ kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi	115
Şekil 4.62. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında konfigürasyonu 1x2 olan hücresel yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi...	117
Şekil 4.63. $\sigma_v=18.10$ kPa düşey gerilme altında konfigürasyonu 1x2 olan hücresel yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi...	117
Şekil 4.64. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında konfigürasyonu 2x2 olan hücresel yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi...	118
Şekil 4.65. $\sigma_v=18.10$ kPa düşey gerilme altında konfigürasyonu 2x2 olan hücresel yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi...	118

Şekil	Sayfa
Şekil 4.66. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında konfigürasyonu 2x3 olan hücresel yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi...	119
Şekil 4.67. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kapasitesine ilişkisine etkisi.....	119
Şekil 5.1. Çekme direncinin geogrid donatı elemanı üzerindeki bileşenleri (Jewell, 1990)	122
Şekil 5.2. Bir geogrid donatı elemanına ait genel şematik görünüş (Jewell, 1990).....	123
Şekil 5.3. Geogrid donatı elemanına üzerinde meydana gelen sürtünme ve pasif direnç alanları (Koerner ve diğ., 1989)	124
Şekil 5.4. Pasif direnç ile normalize deplasman arasındaki ilişki (Bergado ve diğ., 1996)	125
Şekil 5.5. Birim çekme kuvveti (P) ile deplasman (u) arasındaki ilişkiler: a) P ile u arasındaki parabolik ilişki b) $P(x)^2$ ile u arasındaki lineer ilişki (Zornberg ve diğ., 2017).....	126
Şekil 5.6. Zemin-geosentetik kompozit malzeme modeli için kullanılan sınır koşulları (Zornberg ve diğ., 2017).....	126
Şekil 5.7. Zemin-geosentetik kompozit malzeme modeli a) birim çekme kuvveti (P)-birim uzama ilişkisi (ϵ) b) zemin-geosentetik ara yüzey kayma gerilmesi (τ)-deplasman (u) ilişkisi (Zornberg ve diğ., 2017).....	127
Şekil 5.8. Çekme deney süresince görüntülenen pasif direnç alanlarının kesişimi (Dyer, 1985)	128
Şekil 5.9. Çekme yükü altındaki hücresel yapı elemanlarının mobilizasyonları a) hücreler üzerinde oluşan deplasmanların zamanla değişimi b) çekme yükünün zamanla değişimi	129
Şekil 5.10. Hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan pasif ve sürtünme direnç alanları...	130
Şekil 5.11. Hücresel yapı elemanının çekme deney sonrası görünüşü	132
Şekil 5.12. Hücresel yapı elemanının çekme deney öncesi ve sonrası plan görünüşü ...	132
Şekil 5.13. Enine eleman üzerinde pasif direnç alanının değişimini ifade eden αp 'nin belirlenmesi	133
Şekil 5.14. Hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan şekil değiştirmenin şematik gösterimi	133
Şekil 5.15. Aktif ve pasif yanal basınçların oluşumu için hareket kriterleri (Das, 2007)	135

Şekil	Sayfa
Şekil 5.16. Farklı düşey gerilmeler altında pasif mobilizasyon faktörlerinin kutu ön yüzüne olan mesafeye göre ilişkisi a) $L=170$ mm, $\sigma_v = 10.12$ kPa, konfigürasyonlar: 1x1, 2x1, 3x1 b) $L=170$ mm, $\sigma_v = 18.10$ kPa, konfigürasyonlar: 1x1, 2x1, 3x1 c) $L=170$ mm, $\sigma_v = 31.40$ kPa, konfigürasyonlar: 1x1, 2x1, 3x1.....	138
Şekil 5.17. Farklı düşey gerilmeler altında pasif mobilizasyon faktörlerinin kutu ön yüzüne olan mesafeye göre ilişkisi a) $L=340$ mm, $\sigma_v = 10.12$ kPa, konfigürasyonlar: 1x2, 2x2, 3x2 b) $L=340$ mm, $\sigma_v = 18.10$ kPa, konfigürasyonlar: 1x2, 2x2, 3x2 c) $L=340$ mm, $\sigma_v = 31.40$ kPa, konfigürasyonlar: 1x2, 2x2, 3x2.....	139
Şekil 5.18. Farklı düşey gerilmeler altında pasif mobilizasyon faktörlerinin kutu ön yüzüne olan mesafeye göre ilişkisi a) $L=510$ mm, $\sigma_v = 10.12$ kPa, konfigürasyonlar: 1x3, 2x3, 3x3 b) $L=510$ mm, $\sigma_v = 18.10$ kPa, konfigürasyonlar: 2x3, 3x3.....	140
Şekil 5.19. Pasif mobilizasyon faktörlerinin kutu ön yüzüne olan mesafeye göre ilişkisi: $L=850$ mm, $\sigma_v = 10.12$ kPa, konfigürasyonlar: 1x5, 2x5, 3x5.....	140
Şekil 5.20. Hücresel yapı elemanı boyunca oluşan birim uzamaların dağılımları a) $L=170$ mm, b) $L=340$ mm, c) $L=510$ mm ve d) $L=850$ mm.....	143
Şekil 5.21. Herhangi bir boyuna elaman üzerinde sürtünmeden dolayı meydana gelen gerilmenin hücresel yapı elemanına ait gerilme-birim uzama eğrisinden belirlenmesi.....	144
Şekil 5.22. Hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen sürtünme direncinin eleman boylarına göre değişimi a) $L=170$ mm, b) $L=340$ mm, c) $L=510$ mm ve d) $L=850$ mm	145
Şekil 5.24. Ölçülen ve hesaplanan çekme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	147
Şekil 6.1. Çekme gerilmelerinin belirlenmesi için önerilen işlem aşamaları (Ochiai ve diğ., 1996).....	152
Şekil 6.2. Hücresel yapı elemanının şematik gösterimi	154
Şekil 6.3. Hücresel yapı elemanı üzerinde meydana gelen çekme gerilmesinin belirlenmesi için uygulanan işlem aşamaları; a) Hücresel yapı elemanı boyunca meydana gelen birim uzama dağılımı b) hücresel yapı elemanına malzemesine ait gerilme-birim uzama eğrisi c) hücresel yapı elemanı boyunca meydana gelen çekme gerilmelerinin dağılımı.....	156
Şekil 6.4. Çekme gerilmelerinin hücresel yapı elemanı üzerinde dağılımının şematik gösterimi	157
Şekil 6.5. Deneylerden elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik.....	158

Şekil	Sayfa
Şekil 6.6. Maksimum çekme gerilmesi ile zemin ortamına uygulanan düşey gerilme (σ_v), hücresel yapı elemanı boyu (L) ve birim hücre genişliği (B/b) arasındaki ilişki a) h=100 mm, b) h=150 mm.....	162
Şekil 6.7. Aynı eleman boyları (L/b) için, τ_{max}/σ_v ile B/b arasındaki ilişki a) h=100 mm, b) h=150 mm.....	163
Şekil 6.8. Aynı eleman boyları (L/b) için τ_{max}/σ_v ile h arasındaki ilişki	164
Şekil 6.9. Hücresel yapı elemanı rijitliğinin çekme gerilmesine etkisi.....	165
Şekil 6.10. Hesaplanan ve ölçülen maksimum çekme gerilmeleri arasındaki ilişki.....	166
Şekil 6.11. Maksimum çekme gerilmesindeki deplasman ile düşey gerilme, başlangıç rijitliği ve eleman boyu arasındaki ilişki	168
Şekil 6.12. Maksimum çekme gerilmesi değerleri için hesaplanan ve ölçülen deplasmanlar arasındaki ilişki	169
Şekil 6.13. ($S_{maksSult}$)/ σ_v ile başlangıç rijitliği (k) arasındaki ilişki.....	171
Şekil 6.14. Hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen nihai deplasmanlar arasındaki ilişki	173
Şekil 6.15. Hücresel yapı elemanları ile zemin ortamı ara yüzeyi için önerilen çekme gerilmesi-deplasmanı modeli	174
Şekil 7.1. Geosentetik donatılı ile güçlendirilmiş istinat duvarlarının kullanım alanları a) köprü ayağı temeli, b) bina dolgu temeli, c) yol dolgusu.....	176
Şekil 7.2. Duvar tiplerinin artan duvar yüksekliği ile birim alana düşen maliyeti (Koerner ve diğ., 1998)	178
Şekil 7.3. Geosentetik donatılı istinat duvarlarında dış stabilite tahkikleri açısından potansiyel yenilme durumları a) kayma, b) dönme, c) taşıma gücü, d) derin dönme (Elias ve diğ., 2001).....	179
Şekil 7.4. Geosentetik donatılı istinat duvarlarında dış stabilite tahkiklerinin tasarım aşamaları (Elias ve diğ., 2001)	179
Şekil 7.5. Geosentetik donatılı istinat duvarlarına etki eden dış kuvvetler (Elias ve diğ., 2001)	180
Şekil 7.6. Geosentetik donatılı istinat duvarlarında iç stabilite tahkiklerinin tasarım aşamaları (Elias ve diğ., 2001)	184
Şekil 7.7. Geosentetik donatılı istinat duvarlarında potansiyel kayma yüzeyinin yeri (Elias ve diğ., 2001)	185
Şekil 7.8. Geoşerit donatı elemanının kesme kutusuna yerleşimi	186

Şekil	Sayfa
Şekil 7.9. Zemin-geoşerit donatı elemanı ara yüzey kesme kutusu deney sonuçları.....	186
Şekil 7.10. Zemin-geoşerit donatı elemanı ara yüzey kırılma zarfı ve sürtünme açısı...	187
Şekil 7.12. İstinat duvarına etkiyen gerilmelerin belirlenmesi için kullanılan notasyonlar a) düşey gerilme dağılım diyagramı b) aktif toprak basıncı	190
Şekil 7.13. Model duvar deneylerinde donatı elemanlarının yatay ve düşey olarak yerleşiminin şematik gösterimi.....	191
Şekil 7.14. Model duvar deneylerinde kullanılan hücresel yapı elemanının şematik görünümü.....	194
Şekil 7.15. Konfigürasyonu 1x1 olan hücresel yapı elemanlarının birim uzama ile düşey gerilme arasındaki ilişki	195
Şekil 7.16. Konfigürasyonu 1x2 olan hücresel yapı elemanlarının birim uzama ile düşey gerilme arasındaki ilişki	196
Şekil 7.17. Model duvar deney düzeneğine ait yandan plan görünüşü.....	199
Şekil 7.18. Model duvar deney düzeneğine ait üstten plan görünüşü.....	199
Şekil 7.19. Donatı elemanlarına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri	200
Şekil 7.20. Model duvar deneyleri için deneysel çalışma akış diyagramı	202
Şekil 7.21. Model duvar deneylerinin yandan ve üstten görünüşleri a) hücresel yapı elemanlı model duvar b) geoşerit elemanlı model duvar c) hücresel yapı elemanı ve geoşerit birlikte kullanılarak oluşturulan model duvar	205
Şekil 7.22. Model duvar üzerinde deplasman ölçerlerin ve rijit temelin konumu.....	206
Şekil 7.23. Model duvar deneylerinde donatı türlerine göre temelin yük-oturma ilişkileri a) geoşerit b) hücresel yapı elemanı c) geoşerit-hücresel yapı elemanı	208
Şekil 7.24. Yüklemeden dolayı oluşan yanal duvar hareketleri a) geoşerit, b) hücresel yapı elemanı ve c) geoşerit-hücresel yapı elemanı	210
Şekil 7.25. Yüklemeden dolayı temel zemini yüzeyinde oluşan oturmalar a) geoşerit, b) hücresel yapı elemanı ve c) geoşerit-hücresel yapı elemanı	212
Şekil 7.26. Hücre yükseklikleri 50, 100 ve 150 mm ve konfigürasyonu 1x1, 1x2, 1x3 ve 1x5 olan hücresel yapı elemanlarının başlangıç rijitliği-elaman boyu arasındaki ilişkiler	214
Şekil 7.27. Hücre yüksekliği 50 mm için başlangıç rijitliği-düşey gerilme ilişkisi.....	214
Şekil 7.28. Ölçülen ve hesaplanan yanal duvar hareketleri	216

Şekil**Sayfa**

Şekil 7.29. Donatı türlerine göre oluşturulan 1 m² model duvarların maliyet analizi 216

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Geosentetiklerin donatı elamanı olarak kullanım alanlarına örnek a) köprü yaklaşım dolgusu (Duijnen ve diğ. 2012), b) istinat duvarı (PRS Geo-Technologies), c) erozyon control (Maccaferri) ve d) kanal kaplaması (PRS Geo-Technologies).....	2
Resim 3.1. Çekme deney düzeneğine ait genel görünüş.....	49
Resim 3.2. Çekme deney kutu ön yüzüne monte edilen açıklık aparatı a) önden görünüş, b) kutu içinden görünüş	51
Resim 3.3. Çekme yükünün uygulanabilmesi için deneylerde kullanılan tutma aparatları	52
Resim 3.4. LVDT' lerin yerleşimi a) çekme deney kutusu arkasına, b) tutma aparatına	53
Resim 3.5. Bağlantı elemanı çelik çubuk ve boru	53
Resim 3.6. Yükleme ve çekme yüklerini ölçmek için kullanılan yük hücreleri a) bası tipi b) S tipi.....	54
Resim 3.7. Minyatür yük hücresi	54
Resim 3.8. Hücresel yapı elemanı üzerine yerleştirilen gerinim pulu	55
Resim 3.9. Veri toplama sistemi (TESTBOX1001)	56
Resim 3.10. Hücresel yapı elemanı (geocell)	59
Resim 3.11. Hücresel yapı elemanları çekme dayanımı deneyleri a) şerit çekme, b) kaynak noktası çekme	60
Resim 3.12. Hücresel yapı elemanları; a) Malzeme 1 (delikli), b) Malzeme 2 (deliksiz)	61
Resim 3.13. Sıkıştırma işleminde kullanılan tokmak ve tabaka sınırları.....	65
Resim 3.14. Kutu ortasına yerleştirilen hücresel yapı elemanı.....	65
Resim 3.15. Deney düzeneği ve veri toplama sisteminin genel bir görünüşü	65
Resim 3.16. Gerinim pullarının (strain gauge) hücresel yapı elemanı üzerine yerleştirilmesi a) zımparalanmış ve temizlenmiş bölgeye gerinim pullarının yapıştırılması, b) elektronik kabloların lehimlemesi, c) gerinim pullarının koruyucu sünger bantla kaplanması, d) tamir bandı ile kaplanması	67

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan kopma ve akma yenilmeleri.....	108
Resim 7.1. Model duvar deney düzeneğine ait genel bir görünüm	198
Resim 7.2. Deney kutusunun tabandan ve tavandan göçmemesi için kullanılan destek profilleri a) tabana yerleştirilen b) üstüne yerleştirilen	201
Resim 7.3. Donatı elemanının beton bloklara bağlantısı	201
Resim 7.4. Deney kutusu doldurma işlemi a) ilk sıra beton blokların donatı elemanları ile bağlantısı yapılarak deney kutu içinde konumlarına yerleştirilmesi b) sırasıyla beton blokların yerleştirilmesi	203
Resim 7.5. Deplasman ölçümleri için LVDT 'lerin yerleşimi a) temel ve temel yüzeyine yakın bölgelere b) duvar ön yüzüne	203
Resim 7.6. Model duvar deneylerinde kullanılan donatıların yerleşimi a) hücresel yapı elemanlı model duvar b) geoşerit elemanlı model duvar c) hücresel yapı elemanı ve geoşerit birlikte kullanılarak oluşturulan model duvar	205

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_l	Boyuna sürtünme alanları
A_t	Enine sürtünme alanları
A_p	Enine pasif alanları
A_1	Pasif dirence katkı sağlayan bölge
A_2	Pasif dirence katkı sağlamayan bölge
α	Genişliğe bağlı katsayı
α_p	Pasif direnç oluşturan alanların katsayısı
α_{pi}	Pasif direnç alanı değişim faktörü
B	Donatı elemanı genişliği
B'	Efektif temel genişliği
β	Yüksekliğe bağlı katsayı
b_i	Birim hücre genişliği
C_c	Eğrilik katsayısı
C_u	Üniformluk katsayısı
c	Kohezyon
D_r	Rölatif sıkılık
D_{10}	Efektif dane çapı
D_{30}	%30 geçene karşılık gelen dane çapı
D_{50}	Ortalama dane çapı
D_{60}	%60 geçene karşılık gelen dane çapı
D_{85}	%85 geçene karşılık gelen dane çapı
D_{maks}	Maksimum dane çapı
d	Eğilme deplasmanı
d_n	Normalize deplasman

Simgeler**Açıklamalar**

dP	Birim eleman üzerinde meydana gelen çekme kuvveti
dx	Birim donatı elemanı uzunluğu
E	Elastisite modülü
E_{ip}	Başlangıç elastisite modülü
e	Boşluk oranı
e_{maks}	Maksimum boşluk oranı
e_{min}	Minimum boşluk oranı
ε	Birim uzama
F_{cs}, F_{qs}, F_{ys}	Temel şekil katsayıları
F_{cd}, F_{qd}, F_{yd}	Temel derinlik katsayıları
F_{ci}, F_{qi}, F_{yi}	Temel eğim katsayıları
F_{i, i+1}	Herhangi iki düğüm noktası arasındaki çekme kuvveti
F_{si}	Boyuna eleman üzerinde meydana gelen sürtünme direnci
G_s	Özgöl ağırlık
H	Yükseklik
h	Hücre yüksekliği
J_c	Birim çekme kuvveti (P)-birim uzama (ε) eğrisinin eğimi
kN	Kilonewton
k_p	Pasif toprak basıncı katsayısı
kPa	Kilopaskal
k_a	Aktif toprak basınç katsayısı
k_p	Pasif toprak basınç katsayısı
K_{SGC}	Zemin-geosentetik kompozit malzeme rijitliği
k	Başlangıç rijitliği
L	Donatı elemanı boyu
L_a	Aktif bölge donatı elemanı uzunluğu
L_e	Ankraj bölgesi donatı elemanı uzunluğu
l_i	Birim hücre uzunluğu

Simgeler**Açıklamalar**

m	Birim hücre boyunda enine eleman sayısı
m_{pi}	Pasif mobilizasyon faktörü
N_c, N_q, N_γ	Taşıma gücü katsayıları
n	Birim hücre genişliğinde boyuna eleman sayısı
P	Çekme kuvveti
P_{s1}	Enine elemanlar üzerinde meydana gelen sürtünme direnci
P_{s2}	Boyuna elemanlar üzerinde meydana gelen sürtünme direnci
P_p	Enine elemanlar üzerinde meydana gelen pasif direnç
P_R	Yatayda tutan kuvvet
P_d	Yatayda deviren kuvvet
S	Hücre Sayısı
Sh	Metal levha
S_H	Donatı elemanları arası yatay mesafe
S_{maks}	Maksimum deplasman
S_{ult}	Nihai deplasman
S_v	Donatı elemanları arası düşey mesafe
T	Birim duvar yüzeyine gelen yük
t	Zaman
T_u	Geosentetik donatı elemanı çekme dayanımı
u	Deplasman
V	Toplam düşey yük
W	Donatılı zemin kütlelerinin ağırlığı
w	Donatı elemanı genişliği
Z	Donatı elemanı derinliği
Q	Temele uygulanan yük
q	Sürşarj gerilmesi
q_a	İzin verilebilir taşıma gücü
q_{ult}	Nihai verilebilir taşıma gücü
x	Serbest bölgeye olan uzaklık

Simgeler**Açıklamalar**

X_i	Herhangi bir i. düğüm noktasındaki deplasman
ϕ	İçsel sürtünme açısı
ϕ_{pik}	Pik içsel sürtünme açısı
δ	Ara yüzey sürtünme açısı
θ	Rijitliğe bağlı katsayı
σ'_a	Aktif yanıl basınç gerilmesi
σ_i	Boyuna eleman üzerinde oluşun gerilme
σ'_p	Enine elemanlar üzerinde meydana gelen pasif gerilme
σ_{pult}	Nihai pasif gerilme
σ_v	Düşey gerilme
τ	Toplam çekme gerilmesi
τ_i	Herhangi bir hücre elemanı üzerinde meydana gelen toplam çekme gerilmesi
τ_{maks}	Maksimum çekme gerilmesi
$\tau_{(maks)ref}$	Referans deney elemanı genişliği için maksimum çekme gerilmesi
τ_y	Zemin-geosentetik kayma gerilmesi
γ_{kmaks}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_{kmin}	Minimum kuru birim hacim ağırlık
γ_n	Birim hacim ağırlık
Δl	Boyuna elemanın uzama miktarı
$\Delta \sigma$	Gerilme artışı
μ	Sürtünme katsayısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

BZSS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
EI	Eğilme Rijitliği
GP	Kötü Derecelendirilmiş Çakıl
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen

Kısaltmalar**Açıklamalar****LVDT**

Doğrusal Değişkenli Türevsel Dönüştürücüler

MYH

Minyatür Yük Hücresi

MSE

Mekanik Olarak Stabilize Edilmiş Duvar

NPA

Polimerik Alaşım Malzeme

SCG

Zemin-Geosentetik Kompozit Malzeme

SP

Kötü Derecelendirilmiş Kum

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla artan kentleşme ve sanayileşme nedeniyle özellikle büyükşehirlerde yapı yapılacak uygun yerleşim alanları hızla azalmaktadır. Bu nedenle geoteknik mühendisliği uygulamalarına söz konusu olan yapıların (bina temelleri, köprü ayağı temeli, istinat duvarı, yol dolgusu vb.) mühendislik özellikleri yetersiz (taşıma gücü ve oturma vb.) problemli zeminler üzerine inşa edilme zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Zeminlerin mühendislik özellikleri; zayıf zeminin uzaklaştırılıp yerine uygun zemin koyulması ya da zemin iyileştirme teknikleri (kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolon vb.) uygulanarak iyileştirilmektedir. Bu çözümlerin pahalı olması, basit ve hızlı yapım tekniklerine sahip olmaması nedeniyle yeni çözüm arayışları ortaya çıkmıştır. Geoteknik ve yol mühendisliği uygulamalarında, son yıllarda donatılı zemin uygulamaları, zemin iyileştirme yöntemleri arasında alternatif bir çözüm olarak yerini almıştır. Donatılı zemin uygulaması, çekme gerilmelerine maruz kalan zeminlerin metal veya geosentetik gibi çekme dayanımı yüksek olan malzemeler ile iyileştirilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır.

Geosentetikler, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemesinden üretilen korozyon gibi olumsuz çevre şartlarına karşı dayanıklı ve maliyet açısından uygun çözümler sunan yapı malzemeleridir. Geosentetikler, fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı geoteknik mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan geosentetikler son yıllarda büyük gelişim kaydetmiştir. Geosentetikler, özellikle çekme yüklerine maruz kalan zeminlerin taşıma gücünü artırmak ve zeminde meydana gelen oturma miktarlarını azaltmak için geoteknik mühendisliği uygulamalarına kullanılmaktadır. Geosentetikler, kullanım alanlarına göre köprü yaklaşım dolgularında, istinat duvarlarında, şev stabilizasyonunda, erozyon kontrolünde, yol dolguları ve kanal kaplamalarında kullanılmaktadır (Resim 1.1). Ayrıca geosentetikler maliyet ve estetik açısından geleneksel yöntemlere göre daha uygun çözümler sunmaktadır (Won ve Kim, 2007; Chen ve diğ., 2007; Yoo ve Kim, 2008; Shekarian ve diğ., 2008). Dolayısıyla geosentetik donatılı zeminlerin düşük maliyetli, estetik, basit ve hızlı yapım tekniklerine sahip olması, zeminlerin taşıma gücünü artırması, oturma miktarları ve yanal deformasyonları azaltması ve deprem yüklerine karşı performansının iyi olması gibi birçok özelliğinden dolayı kullanım alanları artmaktadır.



a)



b)



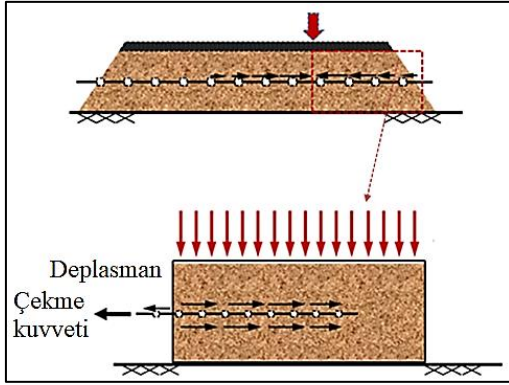
c)



d)

Resim 1.1. Geosentetiklerin donatı elamanı olarak kullanım alanlarına örnek a) köprü yaklaşım dolgusu (Duijnen ve diğ. 2012), b) istinat duvarı (PRS Geo-Technologies), c) erozyon control (Maccaferri) ve d) kanal kaplaması (PRS Geo-Technologies)

Geosentetikler, yapı yükleri ve yanal toprak basınçları etkisi altındaki yapılarda ve şevlerin stabilitesinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Geosentetiklerin yükler altındaki davranışları, zeminin ve kullanılan geosentetik donatının özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Yapı yükleri altında, zeminler ile geosentetikler arasında meydana gelen etkileşim mekanizması, geosentetiklerin geometrik yapılarına ve gerilme deformasyon özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Zeminler ile geosentetikler arasında meydana gelen bu etkileşim mekanizmasında çekme kuvvetleri etkisindeki geosentetikler ile zemin arasında sürtünme dirençleri oluşmaktadır (Şekil 1.1). Zeminler ile geosentetikler arasında meydana gelen sürtünme dirençlerinden faydalanmak için düşey ve yanal yük etkisi altındaki zemin yapılarında (istinat duvarları, şevler vb.) geosentetikler kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. Yapı yükleri altında geosentetiklerin yanal yüklere karşı etkileşim mekanizması (Roodi, 2016)

Geosentetikler, donatılı zemin yapılarında özellikle de istinat yapılarında yapı yüklerinden dolayı oluşan çekme gerilmelerinin karşılanması ve yanal hareketlerin önlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Donatılı istinat duvarlarında ve şevlerde potansiyel kayma yüzeyi arkasına yerleştirilen geosentetikler, çekme kuvvetlerine maruz kalarak ankraj gibi davranmaktadırlar. Geosentetik donatı elemanları üzerlerine gelen çekme yüklerini, zemin ile geosentetik arasında meydana gelen sürtünme dirençlerinden karşılamaktadırlar. Dolayısıyla geosentetik donatılı istinat yapılarının tasarımında zeminler ile geosentetikler arasında meydana gelen sürtünme davranışının belirlenmesi gerekmektedir. Geosentetikler ile zeminler arasındaki sürtünme davranışı, laboratuvarda yapılan çekme ve kesme kutusu deneyleri ile belirlenmektedir. Zemin-geosentetik arasında meydana gelen sürtünme davranışı; kullanılan geosentetik donatı elemanlarının boyutlarına, geometrisine, gerilme-deformasyon özelliklerine ve zeminin mühendislik özelliklerine bağlı olmaktadır. Çekme yüklerine maruz kalan zeminlerde genellikle geogrid, geoşerit ve çelik galvanizli şeritler gibi yüzeyel donatı elemanları kullanılmaktadır.

Günümüzde zemin-geosentetik sürtünme davranışı genellikle geogrid donatı elemanları kullanılarak laboratuvar çekme deneyleri ile belirlenmiştir. Geogridler yapısı gereği boyuna ve enine donatı elemanlarından oluşmaktadır. Geogridler üzerlerine gelen çekme yüklerini, boyuna ve enine donatı elemanları üzerinden karşılamaktadır. Boyuna elemanlar sürtünme kuvvetleri karşılarken enine elemanlar ise pasif direnç kuvvetlerini karşılamaktadır (Jewell et al., 1984). Geogridler gibi geosentetik yapı malzemesi olan hücresel yapı elemanları (geocell), polimerik malzemeden üretilen hücrelerin birbirlerine kenetlenmesinden oluşmaktadır. Hücresel yapı elemanları geogrid yapı malzemeleri gibi enine ve boyuna donatı elemanlarından meydana gelmektedir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Hücresel yapı elemanı (PRS Geo-Technologies)

Çekme yükleri altında hücresel yapı elemanlarının zemin içerisinde ortaya koyacağı sürtünme davranışı, geometrilerinden dolayı geogrid donatı elemanlarına benzer davranış göstermesi beklenmektedir. Fakat hücresel yapıya sahip geosentetik malzemelerin şekilsel yapıları geogrid donatı elemanlarından ayrılmaktadır. Hücresel yapı elemanların sahip oldukları enine donatı elemanları üzerinde meydana gelen pasif direnç alanları, geogrid donatı elemanlarına göre daha fazladır. Dolayısıyla hücresel yapı elemanlarının çekme yüklerini karşılama oranları geogrid veya diğer geosentetik donatı elemanlarına göre daha yüksek olması beklenmektedir. Çekme yüklerine maruz kalan hücresel yapı elemanları donatılı zemin uygulamalarının (geosentetik donatılı istinat duvarı, şevler) maliyet ve güvenlik açısından avantajlı olması düşünülmektedir. Fakat günümüzde hücresel yapı elemanlarının bu yapılarda kullanımı pek yaygın değildir.

Hücresel yapı elemanları üç boyutlu ve birbirleriyle kenetlenmiş gözenekli yapısından dolayı, zemini içine hapsederek veya zeminin etrafını sararak gözenek içerisindeki zeminle kompozit bir malzeme gibi davranmakta ve yanal deformasyonları azaltmaktadır (Zhou ve Wen, 2008). Yüksek eğilme rijitliğine (EI) sahip olması nedeniyle de uygulanan yükü alt zemine daha düşük oranlarda aktarılmasını sağlamaktadır (Pokharel ve diğ. 2010). Bu çalışmada, hücresel yapı elemanlarının sürtünme davranışı çekme yükleri altında incelenmiştir.

Amaç

Geosentetik donatılı istinat yapılarında istinat yapısı arkasında donatı elemanı olarak kullanılan geoşerit ve geogrid gibi geosentetiklerin yanında hücresel yapı elemanlarının donatı elemanı olarak kullanılması için, çekme yükleri altında dolgu zemini ile hücresel yapı elemanı arasındaki sürtünme davranışının bilinmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda diğer

geosentetik malzemelerden (geogrid ve geoşerit) farklı olarak, hücresel yapı elemanların zeminler içerisindeki çekme davranışını ortaya koyan detaylı araştırmalar henüz yeterli düzeyde değildir. Dolayısıyla üç boyutlu yapıya sahip hücresel yapı elemanları, laboratuvarda tasarlanan ve inşa edilen çekme deney kutusunda önceden belirlenen sıklıkta hazırlanan zemin ortamında üniform yükler altında çekme kuvvetlerine tabii tutulacaklardır. Hücresel yapı elemanları için özel aparatlar kullanılarak tasarlanan çekme deneylerinden elde edilen bulgular doğrultusunda, hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri teorik ve analitik yaklaşımlarla belirlenecektir. Ayrıca hücresel yapı elemanları, belirlenen çekme davranışı ile laboratuvarda tasarlanan model duvar düzeneklerinde donatı elemanı olarak kullanılarak donatılı istinat duvarında davranışı araştırılacaktır. Bu doğrultuda bu çalışmanın amacı sırasıyla aşağıda verilmiştir.

1. Geleneksel olarak kullanılan donatı elemanları (geogrid, geoşerit vb.) yerine zeminler içinde ortaya çıkan çekme gerilmelerini daha büyük oranda karşılamak üzere hücresel yapı elemanların kullanılabilirliğinin belirlenmesi ve diğer geosentetik elemanlara göre avantajlarının veya dezavantajlarının ortaya konulması
2. Geleneksel olarak yüzeysel donatı elemanları için yapılan çekme deney düzeneklerine ek olarak hücresel yapı elemanları için de çekme deney düzeneğinin oluşturulması
3. Geliştirilen çekme deney düzeneği ile hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen deplasman ve birim uzama dağılımlarının belirlenmesi
4. Hücresel yapı elemanlarının boyutlarının, rijitliğinin ve uygulanan düşey gerilmenin çekme kapasitesine etkisinin araştırılması
5. Hücresel yapı elemanları ile kohezyonsuz zeminler arasındaki sürtünme davranışlarının belirlenmesi, çekme kapasitelerinin teorik ve analitik yaklaşımlarla hesaplanması
6. Hücresel yapı elemanı üzerinde meydana gelen maksimum çekme gerilmesinin belirlenmesi, hücresel yapı elemanı boyutlarının, rijitliğinin ve uygulanan düşey gerilmenin ile maksimum çekme gerilmesi arasındaki ilişkilerin incelenmesi
7. Model duvar deneylerinde hücresel yapı elemanları ve geoşerit donatı elemanları kullanılarak duvarda oluşan yanal deformasyonların veya hareketlerin donatı türüne bağlı olarak belirlenmesi
8. Hücresel yapı elemanları ile güçlendirilen istinat duvarlarının geoşerit istinat duvarlarına göre maliyet açısından uygunluğunun araştırılması

9. Hücresel yapı elemanların, geosentetik donatılı istinat yapılarında kullanılan güçlendirme elemanlarına alternatif olup olmamasının araştırılmasıdır.

Kapsam

Bu çalışma kapsamında çekme yükleri altındaki farklı boyutlarda hazırlanan hücresel yapı elemanlarının sürtünme davranışının belirlenmesi için çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deneylerinde elde edilen veriler doğrultusunda hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen deplasman ve deformasyon dağılımları incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucu elde edilen bulgular neticesinde hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri teorik olarak belirlenmiştir. Ayrıca hücresel yapı elemanlarının çekme gerilmesi-deplasman davranışları eleman boyutlarına ve uygulanan düşey gerilmeye bağlı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak sürtünme davranışı belirlenen hücresel yapı elemanlarının çekme yükleri altındaki performansının belirlenmesi için laboratuvarında tasarlanan model duvar deneyleri yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, zemin ortamında çekme yüklerine maruz kalan geosentetik donatı elemanlarının sürtünme davranışlarının belirlenmesi incelenmiştir. Ayrıca bu bölümde geosentetik donatı elemanı türüne göre değişiklik gösteren zeminler ile geosentetikler arasındaki sürtünme davranışından ve sürtünme davranışının belirlenmesi için yapılan deneyler incelenmiştir. Sürtünme davranışının belirlenmesi için literatürde yapılan çekme deneylerinden, çekme deney kutusu ve boyutlarının sürtünme davranışına etkisinden, sürtünme davranışını etkileyen faktörlerden ve hücresel yapı elemanlarının sürtünme davranışının belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalardan söz edilmiştir.

Üçüncü bölümde, bu çalışma kapsamında tasarlanan çekme deney düzeneğinin genel özelliklerinden, deney düzeneğinde kullanılan ölçüm aletlerinin teknik özelliklerinden, hücresel yapı elemanı ve zemin malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerinden söz edilmiştir. Deneylerde kullanılan hücresel yapı elemanlarının deney numunesi olarak hazırlanması, deplasman ve deformasyon ölçümleri için ölçüm cihazlarının hücresel yapı elemanı üzerine bağlantılarının yapılması ve deney kutusuna yerleştirilmesi ve zemin malzemesinin deney kutusuna istenilen sıklıkta yerleştirilmesi konuları bu bölümde yer almıştır. Ayrıca bu bölümde farklı boyutlarda hazırlanan hücresel yapı elemanları üzerinde yapılacak deney programından söz edilmiştir.

Dördüncü bölümde, farklı boyutlarda hazırlanan hücresel yapı elemanları üzerinde yapılan çekme deney sonuçları verilmiştir. Deney sonuçlarına göre hücresel yapı elemanlarının boyutlarının (boy, genişlik ve yükseklik), deney kutusuna yerleşim konfigürasyonlarının, uygulanan düşey gerilmenin, hücre sayısının ve rijitliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi incelenmiştir.

Beşinci bölümde, yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen bulgular neticesinde hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri teorik olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda boyuna donatı elemanları üzerinde meydana gelen birim uzama miktarlarının dağılımları ve enine donatı elemanları üzerinde oluşan pasif direncin mobilizasyonları belirlenerek teorik bir denklem geliştirilmiştir. Geliştirilen teorik denklem yardımıyla belirlenen çekme kapasiteleri deneysel çekme kapasiteleri ile karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde, hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen birim uzama miktarları yardımı ile elemanlar boyunca oluşan çekme gerilmeleri ve dağılımları belirlenmiştir. Çekme deneyleri ile maksimum çekme gerilmesinin meydana geldiği hücre elemanına ait çekme gerilmesi-deplasman ilişkileri belirlenmiştir. Çekme gerilmesi-deplasman ilişkilerinden maksimum çekme gerilmesi, maksimum çekme gerilmesindeki deplasman ve nihai deplasman değerleri, hücresel yapı elemanlarının boyutlarına ve uygulanan düşey gerilmeye bağlı olarak geliştirilen eşitlikler yardımı ile analitik olarak belirlenmiştir. Analitik olarak belirlenen maksimum çekme gerilmesi ve deplasman değerleri deneysel olarak elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Yedinci bölümde, çekme yükleri altında sürtünme davranışı belirlenen hücresel yapı elemanlarının model duvar deneylerinde donatı elemanı olarak kullanılmasına yönelik çalışmalardan söz edilmiştir. Karşılaştırma yapılması amacıyla model duvar deneylerinde donatı elemanı olarak geoşerit donatı elemanları da kullanılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Çekme gerilmesi-deplasman ilişkilerinden elde edilen eşitlikler kullanılarak hücresel yapı elemanlı model duvarların yanal duvar hareketleri belirlenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca geoşerit, hücresel yapı elemanlı ve geoşerit-hücresel yapı elemanlı model duvarlara yüklenen model temelin yük-oturma performansı incelenmiştir.

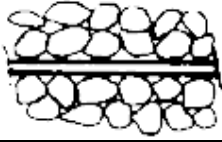
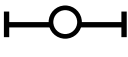
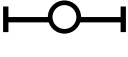
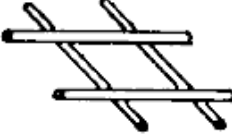
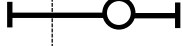
Çalışmanın son bölümünde ise deneysel olarak elde edilen verilerden; çekme kapasitesinin teorik olarak belirlenmesinden, çekme gerilmesi-deplasman ilişkisinden elde edilen sonuçlardan yararlanılarak belirlenen model duvar hareketlerinden çıkartılan genel sonuçlar yer almaktadır.

2. ZEMİNLER İLE GEOSENTETİK DONATI ELEMANLARI ARASINDAKİ SÜRTÜNME DAVRANIŞI

2.1. Giriş

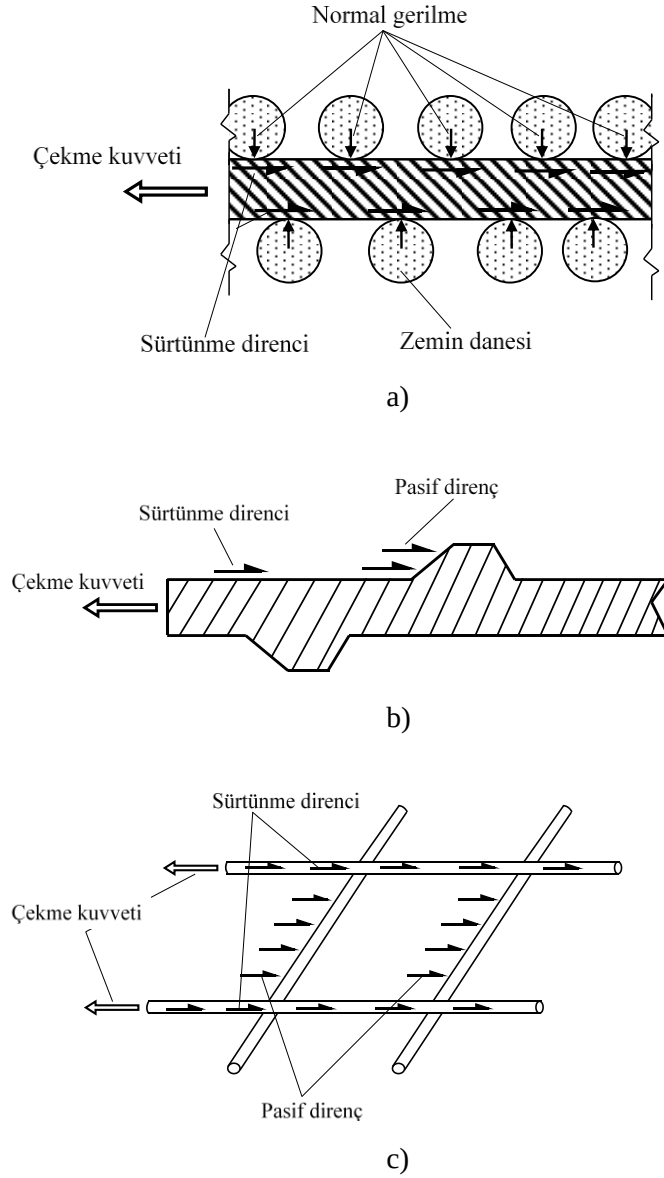
Geosentetik donatılı yapı tasarımlarında, donatı elemanı ile zemin arasındaki sürtünme davranışının belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir. Zemin ile geosentetik donatı elemanı arasındaki sürtünme mekanizması, zemin ve donatı elemanı türüne bağlı olarak iki malzeme arasında meydana gelen etkileşimin bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Bu etkileşimin derecesi, zemin içerisinde kullanılan geosentetik donatı elemanının türüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Geosentetik donatı elemanlarının türüne bağlı olarak zemin-geosentetikler arasında meydana gelen sürtünme davranışlarının oluşum mekanizmaları Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Geosentetik donatı elemanı türlerine göre kayma mekanizması (Palmeira, 1987)

Geosentetik donatı elemanı türü			Kayma mekanizması	
			Sürtünme	Pasif
Düz metal şerit				
Nervürlü metal şerit				
Geotekstil				
Geogrid				

Geotekstil ve düz metal şerit donatı elemanlarının yapılarından dolayı, bu elemanlar üzerinde sadece sürtünme mekanizması oluşmaktadır (Şekil 2.1a). Geogrid ve nervürlü metal şerit donatı elemanlarının davranış mekanizması ise sürtünme ve pasif direnç olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır (Şekil 2.1b ve 2.1c). Bu iki bileşenden dolayı geosentetik

donatı elemanlarının davranış mekanizmasının belirlenmesi karmaşık bir şekil almaktadır. Çekme yüklerine maruz kalan geosentetikler ile tasarlanan yapılar için zemin-geosentetik donatı elemanları arasında meydana gelen etkileşimin belirlenmesi önem teşkil etmektedir.

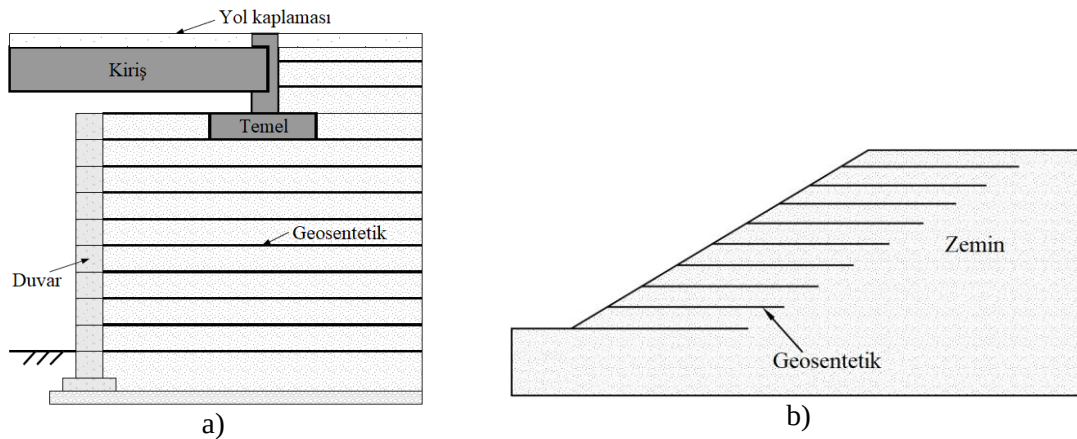


Şekil 2.1. Geosentetik donatı elemanları üzerinde meydana gelen kayma mekanizması a) geotekstil veya düz metal şerit, b) nervürlü veya dişli metal şerit, c) geogrid (Mitchell ve Christopher, 1990)

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, sıklıkla kullanılan geosentetikler maliyet ve estetik açısından geleneksel yöntemlere (zemin iyileştirme, tutucu yapılara vb.) göre daha uygun çözümler sunmaktadır (Allen ve diğ., 1992; Zornberg ve diğ.,1997; Zornberg ve Arriaga, 2003; Al-Qadi ve diğ., 2008; Giroud ve Han 2004b, a; Perkins, 2002; Roodi ve Zornberg 2012). Geosentetikler; zeminlerin taşıma gücü kapasitesinin artırılması, şev

stabilizasyonu ve istinat duvarlarının stabilitesinin iyileştirilmesi amacıyla günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kritik kayma yüzeylerinde donatı elemanı olarak kullanılan geosentetikler çekme kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Dolayısıyla; geosentetiklerin üzerlerinde meydana gelen çekme kuvvetlerinin güvenli bir şekilde karşılanması, geosentetiklerle oluşturmuş donatılı yapı tasarımların ekonomik olması ve güvenilirliği açısından büyük önem teşkil etmektedir.

Yanal toprak basınçları etkisi altındaki yapılarda ve şevlerin stabilitesinin iyileştirilmesinde geosentetikler önemli rol oynamaktadır (Şekil 2.2). Yükler altındaki bu yapıların davranışları, zeminin ve kullanılan geosentetiğin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Donatılı zemin yapılarının tasarımında zemin ve geosentetik arasındaki mekanik etkileşim önemli yer tutmaktadır. Geosentetikler geometrik yapılarından ve gerilme deformasyon özelliklerinden dolayı birçok karmaşık problemlerin çözümü için güçlendirme elemanı olarak kullanılmaktadır. Zemin ve geosentetik arasındaki mekanik etkileşim ara yüz sürtünme parametreleri ile laboratuvarında çekme ve kesme kutusu deneyleri yapılarak belirlenmektedir (Ingold, 1982; Jewell ve diğ., 1984; Farrag ve diğ., 1993; Bergado ve Chai, 1994; Raju, 1995; Perkins ve Cuelho, 1999; Palmeira, 2004; Moraci and Recalcati, 2006; Moraci ve Gioffre, 2006; Palmeira, 2009; Ezzein ve Bathurst, 2014; Wang ve diğ., 2016; Vangla ve Latha Gali, 2016; Morsy ve diğ., 2017a; Morsy ve diğ., 2019).

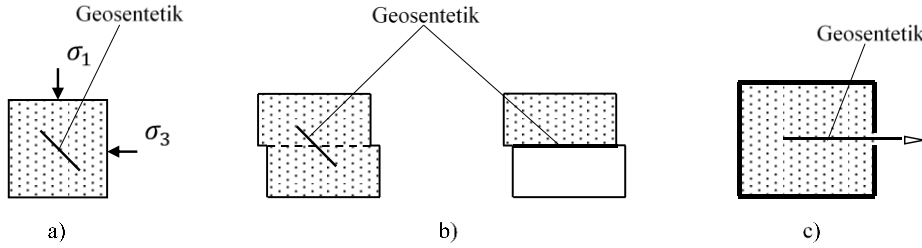


Şekil 2.2. Geosentetik donatılı ile güçlendirilmiş yapılar a) köprü ayağı temeli, b) şevin görünüşü

2.2. Zemin-Geosentetik Ara Yüz Etkileşim Mekanizmasının Belirlenmesi

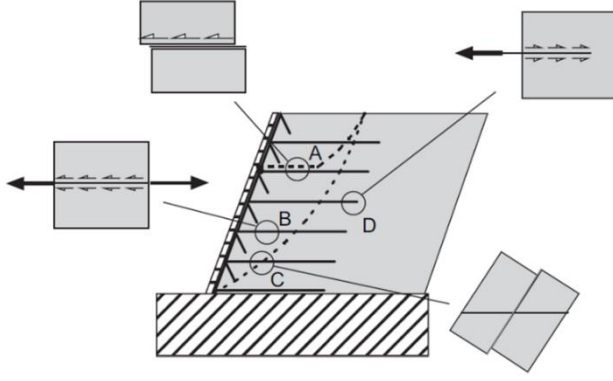
Geosentetik donatılı istinat duvarları ve geosentetiklerle güçlendirilmiş yol dolguları gibi donatılı yapı tasarımlarında çekme yüklerine maruz kalan geosentetik donatı elemanları ile

zemin arasındaki ara yüz etkileşim mekanizmasının belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Zemin-geosentetik donatı elemanı arasındaki sürtünme davranışı veya ara yüz etkileşim mekanizmasının belirlenmesi için laboratuvar ortamında üç eksenli basınç, kesme kutusu ve çekme deneyleri gibi çeşitli deneyler yapılmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Zemin-geosentetik ara yüz sürtünme davranışının belirlenmesi için yapılan deneyler a) üç eksenli basınç deneyi, b) kesme kutusu deneyi, c) çekme deneyi

Geosentetik donatılı zeminler, genellikle geotekstil, geogrid, polimer veya metalik şerit gibi donatı elemanlarının zemin ortamında kullanılması ile oluşturulan zemin-geosentetik kompozit birlikteliğinden oluşmaktadır. Geosentetikler; istinat duvarları, şevler, yol dolguları ve kanal şevleri gibi uygulamalarda güçlendirme elemanı olarak kullanılmaktadır. Artan geosentetik donatı elemanı kullanımı, zemin-geosentetik ara yüzey sürtünme davranışının belirlenmesine ait sorunları da beraberinde getirmiştir. Zeminler ile geosentetikler arasında meydana gelen sürtünme davranışı; zemin koşullarına, yükleme şartlarına, donatı elemanının geometrisine ve türüne bağlı olarak oldukça karmaşık olmaktadır. İstinat duvarı üzerinde farklı bölgelerde kullanılan geosentetik donatı elemanları ile zeminler arasında meydana gelen sürtünme mekanizmaları ile detaylı bir şekilde şematik olarak gösterilmiştir (Şekil 2.4). Zemin-geosentetik ara yüzeyinde gelişen yenilme durumuna bağlı olarak laboratuvar deneyleri geliştirilmiştir. Donatı elemanı ile zemin arasında meydana gelen kayma yüzeyi “A” bölgesinde, kesme kutusu deneyleri ile belirlenebilmektedir. “B” bölgesinde, duvar üzerine gelen yanal yük donatı elemanı tarafından karşılanmaktadır. Dolayısı ile “B” bölgesinde donatı elemanının davranışı, malzeme çekme dayanım deneyleri ile belirlenmektedir. “C” bölgesinde, duvar arkası potansiyel kayma yüzeyi üzerinde bulunan donatı elemanının sürtünme davranışı, kesme kutusunda kayma yüzeyine eğimli olarak yerleştirilen donatı elemanlarının kesme işlemine maruz bırakılması ile belirlenmektedir. “D” bölgesinde ise çekme kuvvetlerine maruz kalan donatı elemanlarının sürtünme davranışları çekme deneyleri ile belirlenmektedir.



Şekil 2.4. Donatı elemanı üzerinde farklı bölgelerde meydana gelen ara yüzey sürtünme mekanizmaları (Palmeira, 2009)

2.2.1. Laboratuvar çekme deney düzenekleri

Zemin-geosentetik ara yüz davranışı genellikle kesme kutusu ve zemin içerisindeki çekme deneyleri ile belirlenmektedir. Bu deneylerde kullanılan ekipmanların boyutları veya deney sınır şartları belirlenmesi istenilen parametrelere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Çekme deneyleri ile belirlenen zemin-geosentetik ara yüzey sürtünme davranışı; deney düzeneğinin sınır koşullarına, malzeme hazırlama yöntemine ve deney yöntemi gibi birçok faktörden etkilenmektedir.

Geosentetik malzemesinin zeminler içerisindeki çekme davranışını belirlemeye yönelik kullanılan cihazların boyutları geosentetik malzemenin türüne bağlı olarak farklılık göstermektedir. Geosentetik malzemesinin zeminler içerisindeki çekme davranışı genellikle ASTM D6706 standardına göre belirlenmektedir. Boyutlarına göre kategorize edilen çekme deney düzenekleri; küçük, orta ve büyük ölçekli çekme deney düzenekleri olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Buna göre; Palmeira ve Milligan (1989) tarafından tasarlanan çekme deney düzeneği (boy x genişlik x yükseklik = 0.25 m x 0.15 m x 0.15 m) küçük, Ochiai ve diğ. (1996) tarafından tasarlanan çekme deney düzenekleri (boy x genişlik x yükseklik = 0.60 m x 0.40 m x 0.40 m) orta ve Bergado ve Chai (1994) tarafından tasarlanan çekme deney düzenekleri (boy x genişlik x yükseklik = 1.30 m x 0.80 m x 0.50 m) ise büyük ölçekli deney düzenekleri olarak kategorize edilmiştir. Çekme deney düzenekleri genellikle büyük ölçekli olarak tasarlanmış olup, ortalama deney kutusu uzunluğu 1.5 m, genişliği 0.8 m ve yüksekliği ise 0.7 m olarak imal edilmiştir. Literatürde kullanılan çekme deney düzeneklerine ait fiziksel ve karakteristik özellikler Çizelge 2.2' de verilmiştir (Morsy ve diğ. 2019).

Çizelge 2.2. Laboratuvar çekme deney düzeneklerinin boyutları ve karakteristik özellikleri (Morsy ve diğ., 2019)

Kaynak	Boyutlar (uzunluk x genişlik x yükseklik)	Açıklık / tutma aparatı durumu	Zemin yüksekliği (donatı altındaki/ üstündeki mesafe)	Yük ve deplasman ölçer cihazları	Kompaksiyon işlemi ve sıkılık durumu
Chang ve diğ. (1977)	1.30 x 0.91 x 0.51	-	-	-	Mekanik kompaksiyon
Palmeira ve Milligan (1989)	0.25 x 0.15 x 0.15	Açıklık aparatı yok (kutu ön yüzünde oluşturulan açıklık) / Tutma aparatı zemin ortamında	-	Kutu ön yüzünde 8 adet minyatür yük hücresi, deplasman ölçerler, yük hücresi	Yağmurlama, vibrokompaksiyon
Farrag ve diğ. (1993)	1.52 x 0.90 x 0.76	Açıklık aparatı uzunluğu 30 cm / tutma aparatı zemin ortamında	Minimum 30 / 30 cm	Deplasman ölçerler, yük hücreleri, kutu ön yüzünde minyatür yük hücresi	Yağmurlama, mekanik kompaksiyon, nükleer sıkılık ölçümü
Fannin ve Raju (1993)	1.30 x 0.64 x 0.60	Açıklık aparatı yok / Tutma aparatı var	-	Yük hücresi ve deplasman ölçerler	-
Bergado ve Chai (1994)	1.30 x 0.80 x 0.50	-	-	Yük hücresi ve deplasman ölçerler	-
Koerner (2005)	1.90 x 0.91 x 1.10	Açıklık aparatı var / -	Minimum 30 / 30 cm	Yük hücresi ve deplasman ölçerler	-
Cuelho (1998)	1.25 x 1.10 x 0.90	Açıklık aparatı uzunluğu 26 cm / Tutma aparatı var	-	Yük hücresi ve deplasman ölçerler	Vibrokompaksiyon
Lopes ve Ladeira (1996)	1.53 x 0.80 x 1.00	Açıklık aparatı 20 cm uzunluğunda / Tutma aparatı var	30 / 30 cm	Yük hücresi, deplasman ölçerler, minyatür yük hücresi	Nükleer sıkılık ölçümü
Ochiai ve diğ. (1996)	0.60 x 0.40 x 0.40	Açıklık aparatı var / -	-	Yük hücresi, deplasman ölçerler,	Manuel kompaksiyon
Teixeira (2003)	1.50 x 0.48 x 0.70	Açıklık aparatı uzunluğu 20 cm / Tutma aparatı var	-	Yük hücresi, deplasman ölçer, deflektometre	-

Çizelge 2.2. (devam)

Bergado ve Teerawattanasuk (2001)	1.27 x 0.76 x 0.51	-	-	-	Yağmurlama
Meyer ve diğ., (2003)	1.50 x 0.70 x 0.60	Açıklık aparatı uzunluğu 20 cm / Tutma aparatı var	-	3 adet yük hücresi, deplasman ölçerler	Ağırlık yükleme
Marques (2005)	1.53 x 1.00 x 0.80	Açıklık aparatı uzunluğu 20 cm / -	40 / 40 cm	-	Mekanik kompaksiyon, ağırlık yükleme
Moraci ve Gioffre (2006)	1.70 x 0.60 x 0.68	Açıklık aparatı uzunluğu 25 cm / Tutma aparatı zemin ortamında	-	Yük hücresi, 6 adet deplasman ölçer	-
Abdel-Rahman ve diğ. (2007)	1.20 x 1.16 x 0.70	Açıklık aparatı yok / Tutma aparatı var	-	Deplasman ölçerler	Mekanik kompaksiyon
Aydoğmuş ve Klapperich (2008)	0.60 x 0.50 x 0.20	Açıklık aparatı yok / Tutma aparatı kutu dışında	10 / 10 cm	Yük hücresi, hava yastığı, minyatür yük hücresi	Yağmurlama, mekanik kompaksiyon
Abdelouhab ve diğ. (2010)	2.00 x 1.10 x 1.10	-	-	Yük hücresi, minyatür yük hücresi	-
Stadler (2001)	0.95-1.50 x 1.20 x 0.60 (ayarlanabilir uzunluk)	Açıklık aparatı uzunluğu 15 cm / Tutma aparatı var	18 / 18 cm	6 adet deplasman ölçerler, 2 adet yük hücresi	Mekanik ve manuel kompaksiyon, kum konisi deneyi
Jayawickrama ve diğ. (2014)	3.60 x 3.60 x 1.20	-	-	5 adet minyatür yük hücresi, optik ve dijital ölçüm cihazı	-
Hanumasagar ve diğ. (2014)	1.50 x 0.60 x 0.30	Açıklık aparatı uzunluğu 7.5 cm / Tutma aparatı kutu dışında	15 / 15 cm	-	Manuel kompaksiyon
Zornberg ve diğ. (2009); Roodi ve Zornberg (2017)	1.50 x 0.60 x 0.30	Açıklık aparatı uzunluğu 7.5 cm / Tutma aparatı kutu dışında	15 / 15 cm	Yük hücresi, deplasman ölçer	Manuel kompaksiyon

2.3. Zemin-Geosentetik Ara Yüzey Sürtünme Davranışını Etkileyen Faktörler

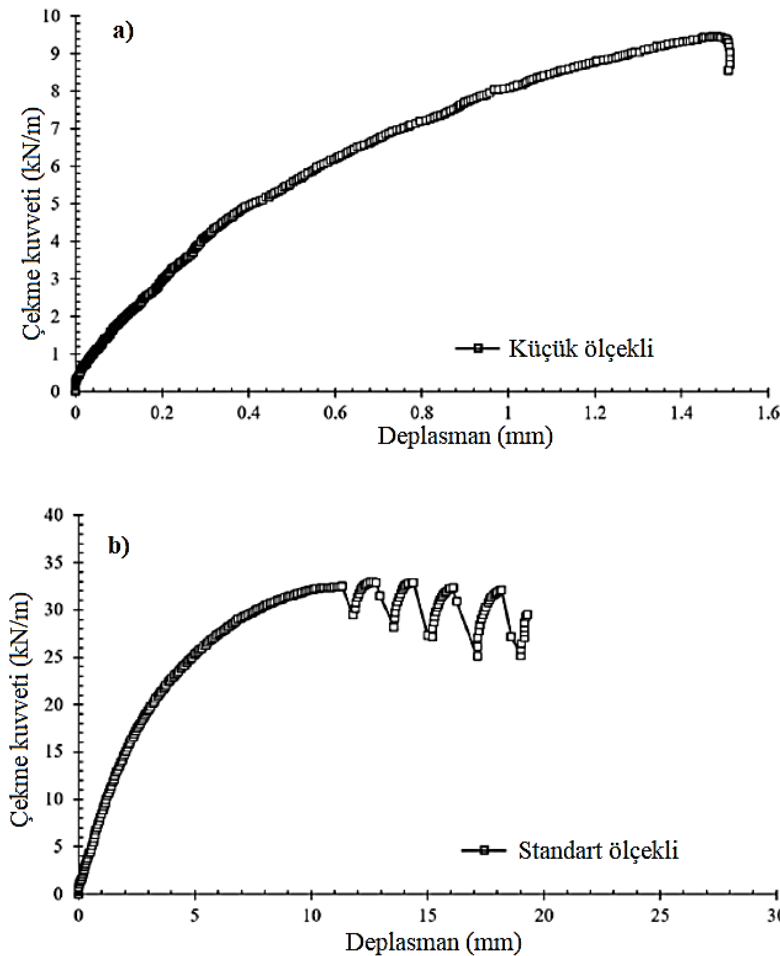
Çekme yüklerine maruz kalan geosentetik donatı elemanları ile zeminler arasında kayma gerilmeleri meydana gelmekte ve kayma gerilmelerinin geosentetik donatı elemanları üzerinde dağılımları karmaşık bir yapı almaktadır. Kayma gerilmeleri; meydana geldiği alanın (donatı elemanı altında ve üstünde) büyüklüğüne, donatı elemanın rijitliğine, zeminin sıkılığına ve zemin-geosentetik ara yüzey etkileşim mekanizmasına bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca kayma gerilmesinin olduğu alana yakın bölgelerde başka bir donatı elemanın varlığı, zemin örtü tabakasının kalınlığının yetersiz olması veya aşırı yükleme durumuna maruz kalması gibi birçok durumda, kayma gerilmelerinin oluşma mekanizması oldukça karmaşık hale getirmektedir (Leshchinsky ve diğ., 1994). Bu bölümde zemin-geosentetik ara yüzey sürtünme davranışını etkileyen faktörler çekme deneyleri açısından incelenmiştir.

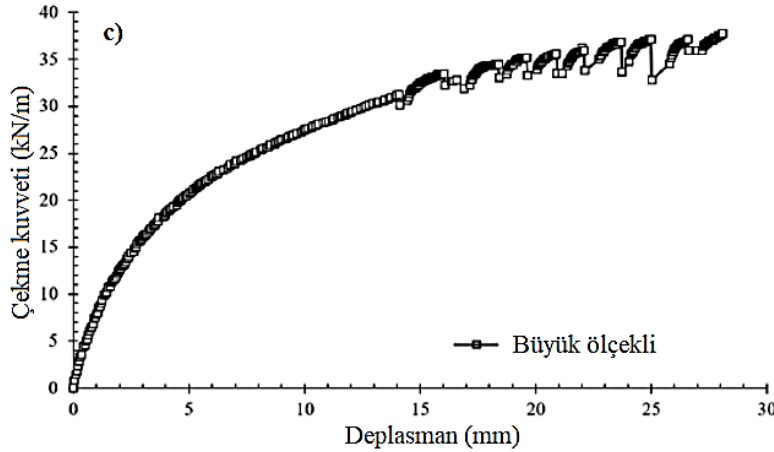
2.3.1. Kutu boyutlarının etkisi

Çekme deneylerinde kullanılan geosentetikler yüzeysel (geotekstil, geomembran ve geogrid) ve üç boyutlu (hücreli yapı elemanı) olarak farklı geometrilere sahip olabilmektedirler. Geosentetik donatı elemanlarının boyutları ve zemin türü, çekme davranışı açısından önem teşkil etmektedir. Zemin-geosentetik ara yüzey sürtünme davranışını çekme deneyleri ile gerçekçi bir şekilde belirlemek için, çekme sırasında kutu yan yüzeylerinde ilave sürtünme kuvvetleri oluşmamalıdır. Donatı elemanın türü ve zeminin dane dağılımını dikkate alarak deney kutusu boyutları ASTM D6706 tarafından önerilmiştir. Buna göre deney kutusunun boyu en az 600 mm veya eğer donatı elemanı olarak geogrid kullanılacaksa kutu boyu geogrid açıklığının en az 5 katı olmalıdır. Deney kutusu genişliği, zeminin dane dağılım eğrisinde % 85 geçene karşılık gelen dane çapından (D_{85}) en az 20 kat büyük veya maksimum dane çapından (D_{maks}) ise 6 kat büyük olmalıdır. Deney kutusunun yüksekliği ise geosentetik donatı elemanı altındaki ve üstündeki zemin yüksekliğine bağlı olarak en az 150 mm veya D_{85} ' in en az 6 katı olmalıdır. ASTM D6706 standardı dikkate alınarak, Ladeira (1995) tarafından tasarlanan deney kutusu 1530 mm x 1000 mm x 800 mm (uzunluk x genişlik x yükseklik) ve Morsy ve diğ. (2019) tarafından tasarlanan deney kutusu ise 1500 mm x 750 mm x 1200 mm boyutlarında seçilmiştir. Morsy ve diğ. (2019) tarafından tasarlanan deney kutusu yüksekliği 1200 mm olarak çok yüksek seçilmesinin nedeni

kullanılan donatı elemanları düşey olarak 600 mm kadar mesafeye üç adet yerleştirmesinden kaynaklanmaktadır.

Roodi, Morsy ve Zornberg (2018) tarafından çekme deney kutusu boyutlarının zemin-geotekstil çekme davranışına etkisinin incelemek amacıyla, boyutları (boy x genişlik x yükseklik) 1500 x 750 x 450 mm, 1500 x 600 x 300 mm ve 250 x 300 x 150 mm olan çekme deney kutuları kullanılmıştır. Çekme deney kutusu boyutları açısından büyük, standart ve küçük ölçekli olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılmıştır. Aynı donatı elemanı boyutlarında ve düşey gerilmeler altında; küçük, standart ve büyük ölçekli olarak sınıflandırılan çekme kutularında yapılan çekme deneyleri sonucunda donatı elemanlarının zemin içerisindeki çekme kapasiteleri sırasıyla 10, 32 ve 35 kN/m olarak belirlenmiştir (Şekil 2.5). Roodi ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada, standart ve büyük ölçekli çekme deney kutularında geotekstil donatı elemanın zemin içerisindeki çekme kapasiteleri neredeyse eşit oldukları belirlenmiştir. Fakat küçük ölçekli çekme deney kutusunda ise çekme kapasitesi oldukça düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir.





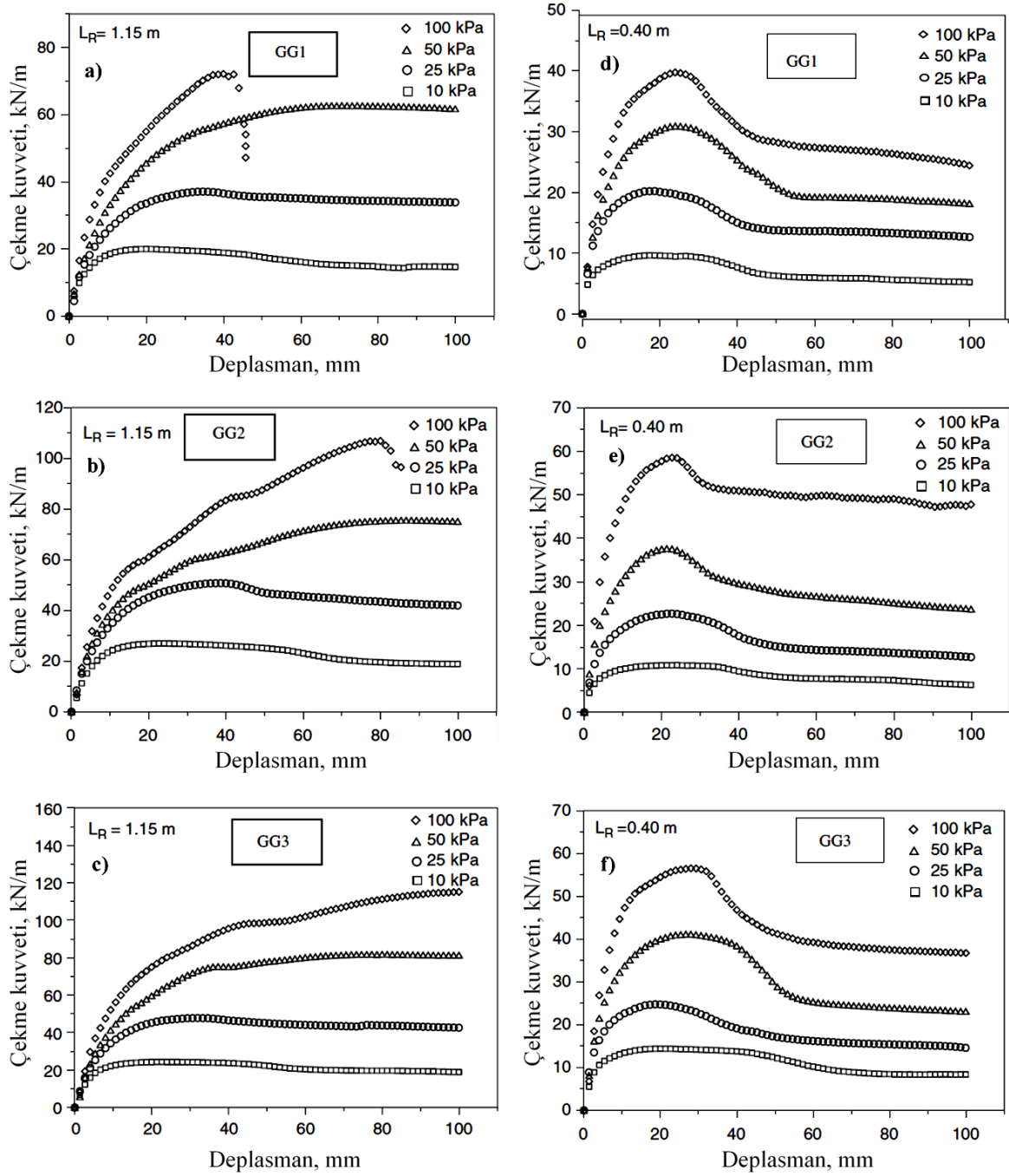
Şekil 2.5. Çekme kuvveti-deplasman davranışının çekme deney kutusu boyutlarına göre değişimi a) küçük ölçekli b) standart ölçekli c) büyük ölçekli (Roodi ve diğ., 2018)

2.3.2. Donatı elemanı boyunun etkisi

Lopes ve Ladeira (1996) tarafından yapılan çekme deneylerinde, donatı elemanının boyu önemli ölçüde zemin sıklığına bağlı olduğu belirlenmiştir. Sıkı kumlar için artan donatı elemanı boyu ile çekme kapasitelerinde düşüş, gevşek kumlar için ise artış gözlemlenmiştir (Lopes ve Ladeira, 1996). Sıkı kumlarda bu durumun oluşması çekme anında zeminde meydana gelen hacimsel genişlemeden (dilatant davranış) kaynaklandığı belirlenmiştir. Hacimsel genişleme ile zeminin boşluk oranı artmakta ve enine donatı elemanları üzerinde meydana gelen toplam pasif dirençlerin azalmakta olduğu belirlenmiştir (Lopes ve Ladeira, 1996). Lopes (1992) donatı elemanı boyu ile çekme kapasitesi arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını ortaya koymuştur. Moraci ve Recalcatti (2006) çekme kapasitesinin önemli ölçüde donatı elemanı boyuna bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Bolt ve Duszyńska (2000) tarafından kumlu zemin ortamında geogrid donatı elemanları kullanılarak yapılan çekme deneylerinde, donatı elemanının boyunun zemin sıklığının zemin-geogrid donatı elemanı arasında meydana gelen çekme kuvveti-deplasman ilişkisine olan etkisi incelenmiştir. Geogrid donatı elemanı boyu 120 cm ve 150 cm olacak şekilde yapılan deneyler sonucunda artan donatı elemanı ile çekme kapasitesi artmaktadır. Donatı boyları 120 cm ve 150 cm olan geogrid donatı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri incelendiğinde, çekme kuvveti 140 mm deplasman değerine kadar artan deplasman değeri ile her iki eleman için neredeyse benzer davranış göstermektedir. Fakat 140 mm deplasman değerinden sonra farklı eleman boyları için çekme kuvveti değerleri farklılaşmakta olup eleman boyu 150 cm için belirgin bir şekilde artmaktadır.

Moraci ve Recalcatti (2006) geogrid donatı elemanı boyunun çekme kapasitesine etkisini incelemek amacıyla, üç farklı rijitliğe ($GG1 < GG2 < GG3$) sahip geogrid donatı elemanları ve eleman boyları 1.15 m ve 0.40 m olan deney numuneleri üzerinde çekme deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde ettikleri sonuçlar Şekil 2.5’ te verilmiştir. Çekme kuvveti-deplasman eğrilerinden de anlaşılacağı üzere geogrid donatı elemanların çekme kapasitesi önemli ölçüde eleman boyundan ve uygulanan düşey gerilmeden etkilenmektedir.



Şekil 2.5. Çekme kuvveti-deplasman davranışının eleman boylarına göre değişimi (Moraci ve Recalcatti, 2006)

Uygulan düşey gerilme değeri 25 kPa' dan yüksek olan gerilmelerde ve eleman boyu 1.15 m olan deney numunelerinde, artan deplasman ile çekme kuvveti (P) de artmakta olup zemin-geogrid ara yüzey sürtünme davranışında pekleşme (strain hardening) durumu ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.5a, 2.5b ve 2.5c). GG1 ve GG2 geogrid donatı elemanları 100 kPa düşey gerilme altında çekme dayanımlarını aşır elemanlar üzerinde kopmalar meydana gelmiştir (Şekil 2.5a ve 2.5b). Dolayısıyla düşey gerilme değerin 100 kPa ve daha yüksek olduğu durumlarda uygulanan düşey gerilmenin çekme kapasitesine etkisi olmamaktadır. Geogrid donatı elemanı boyunun kısa olduğu deney numunelerinde, yüksek düşey gerilmelerde (50 ve 100 kPa) çekme kuvveti belirgin bir pik davranış göstermiş daha sonra artan deplasman değerleri ile belirgin bir düşüş sergilemektedir (Şekil 2.5d, 2.5e ve 2.5f).

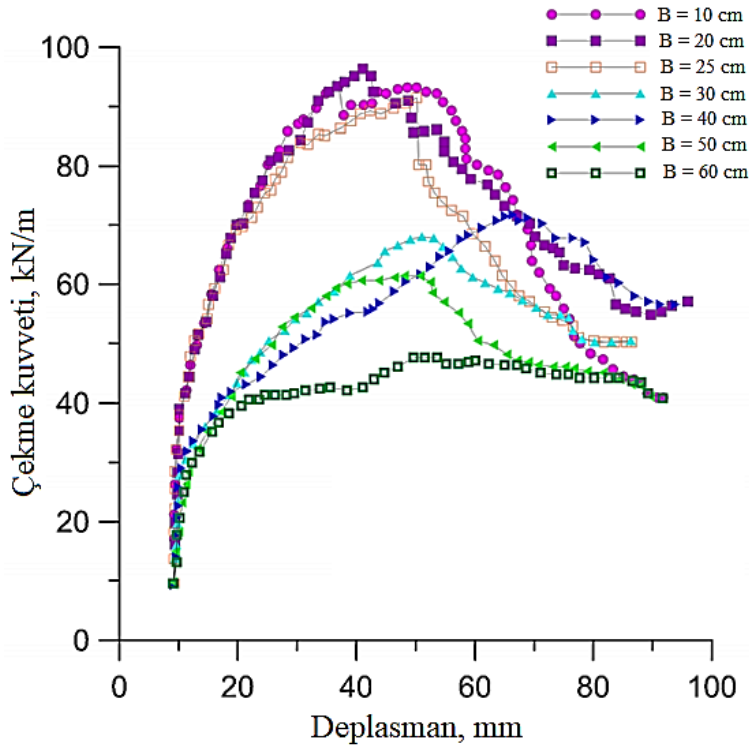
Teixeira, Bueno ve Zornberg (2007) yapılan çekme deneylerinde, boyları 350, 600 ve 1200 mm olan geogrid donatı elemanlarının çekme kapasiteleri belirlenmiştir. Granüler zemin ortamında ve 25 kPa düşey gerilme altında yapılan çekme deneyleri sonucunda geogrid donatı elemanlarının çekme kapasiteleri, artan donatı elemanı boyu ile arttığı gözlemlenmiştir. Teixeira ve diğ. (2007) tarafından yapılan çalışmada, artan donatı elemanı boyu ile çekme kapasitesinin meydana gelen deplasman değerleri de artmaktadır. Boyu düşük olan geogrid donatı elemanları çekme kapasitelerine daha düşük deplasman değerlerinde ulaştığı belirlenmiştir.

Roodi ve Zornberg (2017) tarafından çekme deneylerine maruz bırakılan geosentetik (geogrid ve geotekstil) donatı elemanları ile yapılan çalışmada, zemin ile geosentetik arasındaki sürtünme davranışı analitik olarak belirlenen zemin-geosentetik kompozit (SGC) malzeme rijitlik (K_{SGC}) parametresinin elde edilmesi ile belirlenmiştir. Farklı boylarda hazırlanan geosentetik donatı elemanlarının zemin-geosentetik kompozit (SGC) malzeme rijitlik (K_{SGC}) parametreleri karşılaştırılmıştır. Boyları 250 mm ve 1020 mm olarak hazırlanan geosentetik donatı elemanlarının çekme kapasiteleri artan donatı elemanı boyu ile artmaktadır. Fakat boyları 250 mm ve 1020 mm olan donatı elemanlarının zemin-geosentetik kompozit (SGC) malzeme rijitlik (K_{SGC}) değerleri artan donatı elemanı boyu ile sırasıyla 39.9 (kN/m)²/mm ve 41.9 (kN/m)²/mm olarak belirlemiştir. Roodi ve Zornberg (2017) tarafından yapılan çalışmada artan donatı elemanı boyunun çekme kapasitesine etkisi net bir şekilde görülmüş, ancak zemin-geosentetik kompozit (SGC) malzeme rijitlik (K_{SGC}) değerinin belirgin bir şekilde değişmediği ortaya konulmuştur.

2.3.3. Donatı elemanı genişliğinin etkisi

Çekme deneylerinde kullanılan donatı elemanlarının genişliği, deney kutusu yan yüzeylerinde kutu ile zemin arasında sürtünme direncinin oluşmaması için uygun büyüklükte olmalıdır. Donatı elemanının genişliği nedeniyle kutu yan yüzeyi ile zemin arasında meydana gelecek sürtünme direnci, zemin-geosentetik donatı elemanı arasındaki çekme davranışını olumsuz etkilemektedir. Bu bakımdan kutu yan yüzeyi ile donatı elemanı arasındaki mesafenin uygun bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. ASTM D6706 standardına göre donatı elemanı kenarlarından kutu iç yüzeyine olan mesafe pürüzsüz kutu iç yüzeyi için en az 75 mm ve pürüzlü kutu iç yüzeyi için ise en az 150 mm olmalıdır. Jewell (1984) kutu iç yüzeylerinde sürtünme kuvvetleri oluşmaması için kutu iç yüzeyinin yağlanması veya yağlanmış membranla kaplanmasını önermiştir. Lopes ve Ladeira (1996) tarafından yapılan çalışmada artan donatı elemanı genişliği ile birim çekme kapasitesinde az miktarda düşüş gözlemlenmiştir. Bolt ve Duszyńska (2000) tarafından kumlu zemin ortamında geogrid donatı elemanları kullanılarak yapılan çekme deneylerinde, geogrid donatı elemanının genişliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi incelenmiştir. Geogrid donatı elemanı genişliği 30 cm ve 40 cm olacak şekilde hazırlanan deney numuneleri üzerinde yapılan çekme deneyleri sonucunda, artan eleman genişliği ile birim çekme kapasiteleri neredeyse benzer olduğu görülmüştür.

Hayashi, Alfaro ve Watanabe. (1996) tarafından yapılan çekme deneylerinde geogrid donatı elemanı genişliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında geogrid donatı elemanları 100 cm uzunluğunda ve 10, 20, 25, 30, 40, 50 ve 60 cm genişliğinde olmak üzere yedi farklı genişlikte hazırlanmıştır. 50 kPa düşey gerilme altında çekme kuvveti-deplasman davranışları incelenmiş ve elde edilen bulgular Şekil 2.6'da verilmiştir. Hayashi ve diğ. (1996), artan eleman genişliği ile çekme kapasitesinin azaldığını belirlemişlerdir. Geogrid donatı elemanı genişliği 30 ve 40 cm' ye kadar artan eleman genişliği ile çekme kapasitesi değişmemektedir. Fakat eleman genişliği 30 ve 40 cm' den sonra çekme kapasitesinde belirgin bir şekilde düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum artan eleman genişliği ile donatı elemanı üzerine uygulanan düşey gerilmenin eleman genişliği boyunca çekme deney kutusu boyutları nedeniyle tam yansıtılamamasından kaynaklandığı belirlenmiştir.



Şekil 2.6. Farklı eleman genişliklerine sahip geogrid donatı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri (Hayashi ve diğ., 1996)

Chang, Chang, Yang ve Yan (2000) tarafından yapılan çalışmada, donatı elemanı genişliği 10 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm ve 60 cm olan geogrid donatı elemanları kullanılarak yapılan çekme deneyleri ile donatı elemanı genişliğinin çekme kapasitesine etkisi incelenmiştir. Yapılan çekme deneyleri sonucunda, donatı elemanı genişliği 10 cm, 20 cm ve 25 cm olan geogrid donatı elemanlarının birim genişlikteki çekme kuvveti (kN/m)-deplasman (mm) eğrilerinin neredeyse benzer davranış gösterdiği ve birim genişlikteki çekme kapasitelerinin eşit olduğu belirlenmiştir. Fakat donatı elemanı genişliği 40 cm ve daha yüksek (50 cm ve 60 cm) olan elemanların çekme kapasiteleri, eleman genişliği 10 cm, 20 cm ve 25 cm olan elemanlara göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum Chang ve diğ. (2000) tarafından artan eleman genişliği ile donatı elemanı üzerine uygulanan düşey gerilmenin, kutu yanlarına yakın bölgelerde donatı elemanı üzerine genişlik doğrultusunda tam olarak uygulanamaması şeklinde açıklanmıştır.

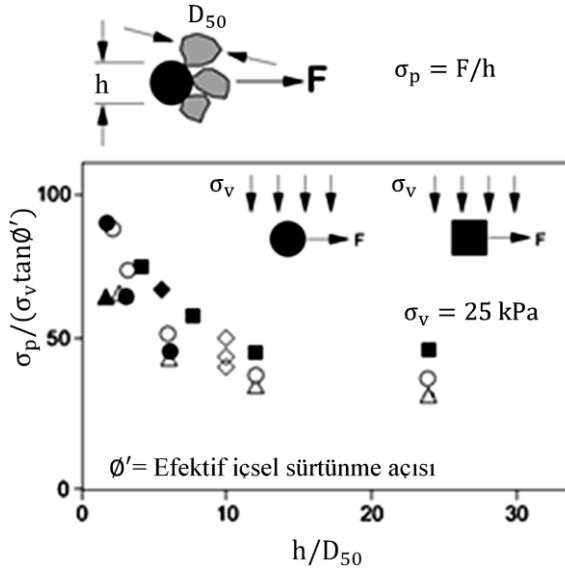
2.3.4. Zeminin dane dağılımının etkisi

Zeminin dane dağılımı veya ortalama dane çapı, zemin ile geosentetikler arasında meydana gelen sürtünme davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle enine donatı

elemanlarından oluşan geosentetiklerin (geogrid, hücresel yapı elemanı vb.) zeminler içindeki sürtünme davranışı, zeminlerin dane dağılımlarına önemli ölçüde bağlı olmaktadır. Jewell (1984) tarafından yapılan çalışmada, ortalama dane çapı (D_{50}) ile geogrid açıklığının sürtünme davranışına etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada geogrid donatı elemanları için yapılacak olan çekme deneylerinde, geogrid donatı elemanı açıklığının zeminin ortalama dane çapına oranı en az üç olması gerektiği önerilmiştir.

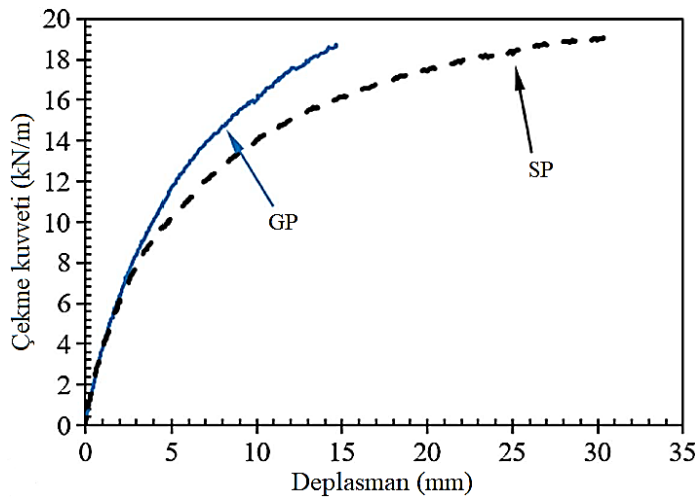
Lopes ve Lopes (1999) tarafından yapılan çalışmada, zeminlerin dane çapının geogrid donatı elemanlarının zeminler içerisindeki çekme davranışı üzerine etkisi iki farklı zemin türü kullanılarak incelenmiştir. Zemin dane çapının zemin-geogrid ara yüzey sürtünme davranışına etkisini inceleme amacıyla, aynı sıklık derecesine (D_r) sahip ortalama dane çapları (D_{50}) 0.43 mm ve 1.30 mm, içsel sürtünme açıları (ϕ) sırasıyla 35.7° ve 44.2° olan zemin numuneleri kullanılmıştır. Zemin-geogrid çekme davranışı, çekme dayanımları sırasıyla 55 kN/m ve 80 kN/m olan iki farklı geogrid donatı elemanı (GG1 ve GG2) kullanılarak incelenmiştir. GG1 donatı elemanları üzerinde yapılan çekme deneylerinde, GG1 donatı elemanı ortalama dane çapı büyük olan zemin ortamında malzeme çekme dayanımına ulaşarak yenilmiştir. Bu durum geogrid donatı elemanın zemin ortamındaki çekme davranışının önemli ölçüde malzeme çekme dayanımına bağlı olduğunu göstermektedir. Lopes ve Lopes (1999) malzeme dayanımı daha yüksek geogrid donatı elemanı (GG2) kullanarak, zemin-geogrid çekme davranışını incelemişlerdir. GG2 donatı elemanları üzerinde yapılan çekme deneylerinde, ortalama dane çapı büyük olan zemin ortamında çekme kapasitesinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Lopes ve Lopes (1999) tarafından yapılan çalışmada, geogrid donatı elemanlarının çekme davranışı, kullanılan zeminin dane çapına bağlı olarak farklılık gösterdiği ortaya konulmuştur.

Palmeira (2009) tarafından yapılan çekme deneylerinde, iki farklı geometride yuvarlak ve kare enine donatı elemanları üzerinde meydana gelen pasif dirençlerin zeminin ortalama dane çapı ile ilişkisi incelenmiştir (Şekil 2.7). Kare biçiminde olan enine donatı elemanları üzerinde meydana gelen pasif direnç değerleri yuvarlak donatı elemanına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 2.7’ de enine donatı elemanın yüksekliği (h) veya kalınlığının ortalama dane çapına oranı (h/D_{50}) 12’ den büyük olduğunda, enine donatı elemanı üzerinde meydana gelen pasif direnç değerlerinde bir değişim görülmemektedir.



Şekil 2.7. Farklı şekillere sahip enine donatı elemanı üzerinde meydana gelen pasif direnç ile B/D_{50} arasındaki ilişki (Palmeira, 2009)

Roodi ve Zornberg (2017) tarafından yapılan çalışmada, geosentetik donatı elemanları iki farklı dane çapına sahip zemin ortamında çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Zeminin dane dağılımının zemin-geosentetik çekme davranışına etkisini incelemek amacıyla, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (BZSS) göre SP (kötü derecelendirilmiş kum) ve GP (kötü derecelendirilmiş çakıl) olmak üzere iki farklı dane dağılımına sahip zemin numuneleri kullanılarak geosentetik donatı elemanlarının çekme kapasiteleri belirlenmiştir. Roodi ve Zornberg (2017) tarafından yapılan çalışmada, artan dane çapı boyu ile çekme kapasitesi artmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Zemin türüne bağlı olarak çekme kuvveti ile deplasman arasındaki ilişki (Roodi ve Zornberg, 2017)

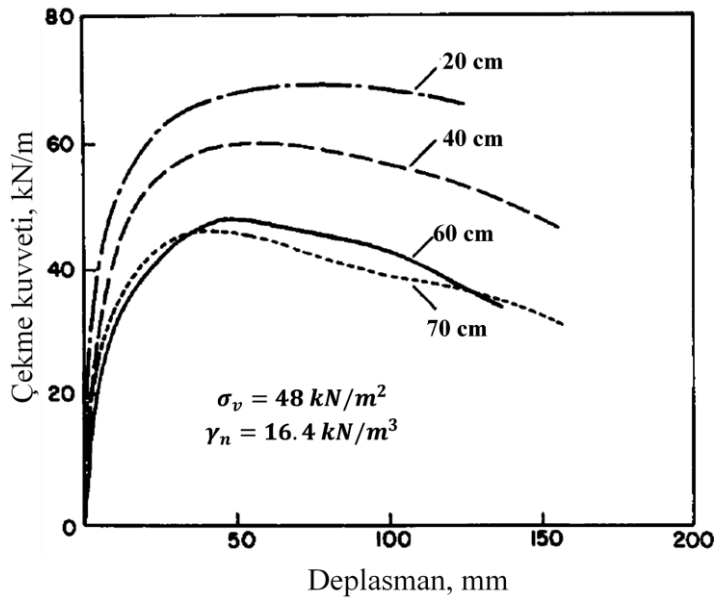
Han, Lin, Shu, Gong ve Huang (2018) tarafından laboratuvarında yapılan kesme kutusu deneylerinde farklı dane çapı dağılımlarına sahip zemin malzemeleri kullanılarak zemin-geogrid ara yüzey sürtünme davranışları incelenmiştir. Zemin dane çapının zemin-geogrid ara yüzey sürtünme davranışına etkisini incelemek amacıyla; dane çapları 12.5-19 mm, 19-25 mm ve 25-37.5 mm aralıklarında olan zemin malzemeleri kullanılarak 50, 100 ve 150 kPa düşey gerilmeler altında kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Han ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada, artan dane çapının zemin-geogrid ara yüzey kayma direncini arttırdığı belirlenmiştir.

2.3.5. Donatı elemanı üzerindeki zemin yüksekliğinin etkisi

Çekme deneylerinde donatı elemanı üzerindeki zemin yüksekliği, zemin-geosentetik ara yüzey sürtünme davranışını etkilemektedir. Düşük zemin yüksekliğinde, donatı elemanı ile zemin arasındaki etkileşimden dolayı zeminde meydana gelmesi beklenen hacimsel genişleme tam olarak gerçekleşmemektedir. Bu durumda kısıtlanan hacimsel genişleme zeminde düşey gerilme artışına neden olmaktadır. Farrag, Acar ve Juran (1993), farklı zemin yüksekliklerinde yaptıkları çekme deneyleri sonucunda, donatı elemanı üzerindeki en uygun zemin yüksekliğinin 30 cm olarak belirlemişlerdir. Bu bakımdan Farrag ve diğ. (1993) tarafından geliştirilen çekme deney kutusu yüksekliği 760 mm olarak belirlenmiştir. ASTM D6706 standardına göre donatı elemanı altındaki ve üstündeki zemin yüksekliği en az 150 mm veya D_{85} ' in en az 6 katı veya maksimum dane çapının (D_{maks}) ise en az üç katı olmalıdır.

Geogrid donatı elemanı üzerindeki zemin yüksekliği düşük olması durumunda donatı elemanı üzerinde meydana gelen düşey gerilme artmakta olup çekme sırasında zemin hareketleri kısıtlanmaktadır. Zemin ile geogrid donatı elemanı arasındaki sürtünme direnci, genellikle geogrid donatı elemanın üst kısmı ile zemin arasında meydana gelmektedir. Farrag ve diğ. (1993) tarafından yapılan çekme deneylerinde geogrid donatı elemanı üstündeki ve altındaki toplam zemin yüksekliği 20 cm, 40 cm ve 60 cm olarak belirlenmiştir. Ayrıca zemin-geogrid çekme davranışı, geogrid donatı elemanı altında 30 cm, üstünde de 40 cm zemin yüksekliği (toplam 70 cm) olmak üzere donatı elemanı üstünde ve altında farklı yüksekliklerde incelenmiştir. Zemin yüksekliğinin etkisini incelemek amacıyla yapılan çekme deneyleri ile elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 2.9' da verilmiştir. Farrag ve diğ. (1993) tarafından yapılan çalışma ile düşük zemin yüksekliklerinde geogrid donatı

elemanının çekme kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Geogrid donatı elemanı üzerindeki zemin yüksekliği 30 cm' den 40 cm' ye çıkarıldığında çekme kapasitesinde önemli ölçüde bir değişim gözlemlenmemiştir. Farrag ve diğ. (1993) tarafından, elde edilen bulgular neticesinde geogrid donatı elemanı üstündeki ve altındaki zemin yüksekliği 30 cm olduğunda, düşey gerilme etkisinin çekme davranışına etkisi olmamakta veya önemli ölçüde minimize olduğu belirlenmiştir.



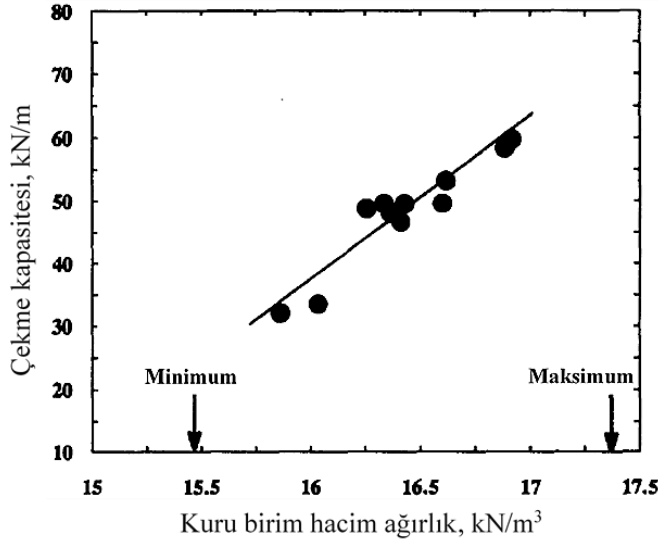
Şekil 2.9. Donatı elemanı üstündeki ve altındaki zemin yüksekliğinin çekme davranışına etkisi (Farrag ve diğ., 1993)

2.3.6. Zeminin sıkılığının etkisi

Granüler zeminlerin sıkılık durumu, zeminlerin mukavemet ve deformasyon özelliklerini etkilemektedir. Özellikle sıkı zeminlerin mukavemeti daha yüksek olmakta ve yükler altında hacimsel genişleme davranışı göstermektedir. Zemin ile geogrid arasındaki sürtünme direnci önemli ölçüde zemin sıkılığından etkilenmektedir. Sıkı zeminlerde, çekme yükleri altında donatı elemanı üzerinde meydana gelen kayma gerilmeleri zeminlerde hacimsel genişleme davranışı göstermesine neden olmaktadır. Zemin-geogrid ara yüzeyinde bulunan zeminin hacimsel olarak genişlemesi zemin-geogrid sürtünme davranışını etkilemektedir (Hayashi ve diğ., 1999; Alfaro ve Pathak, 2005). Hacimsel genişlemenin büyüklüğü, zemin sıkılığına, zemin yüksekliğine ve uygulanan düşey gerilmeye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Eğer zeminde meydana gelecek olan hacimsel genişlemeye izin verilmez (düşük zemin

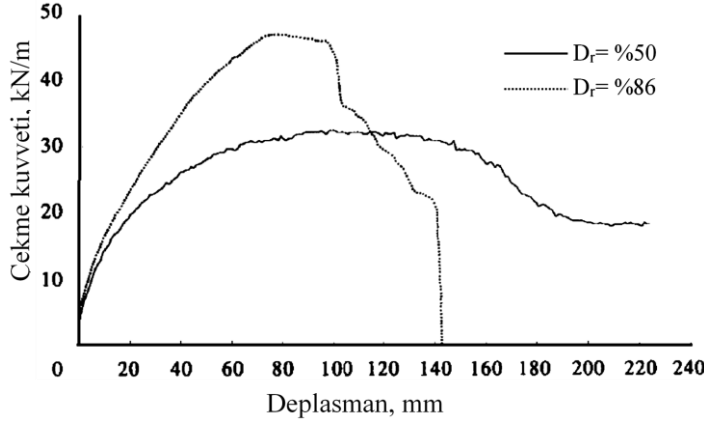
yüksekliği, yüksek düşey gerilme) ise çekme direncinde artış gözlemlenmektedir (Hayashi ve diğ., 1996).

Farrag, Acar ve Juran (1993) tarafından yapılan çalışmada, zemin sıkılığının zemin-geosentetik çekme davranışına etkisi farklı zemin sıkılıklarında incelenmiştir. Zemin sıkılığının etkisini incelemek için kuru birim hacim ağırlıkları 15.7 kN/m^3 , 16.4 kN/m^3 ve 16.7 kN/m^3 olan üç farklı zemin sıkılıklarında geogrid donatı elemanları zemin ortamında çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Çekme deneyleri sonunda, artan zemin sıkılığı ile geogrid donatı elemanlarının çekme kapasitesi de artmıştır (Şekil 2.10). Farrag ve diğ. (1993) tarafından yapılan çalışmada, zemin sıkılığının çekme kapasitesine etkisi net bir şekilde ortaya koyulmuştur.



Şekil 2.10. Zemin yoğunluğunun çekme kapasitesine olan etkisi (Farrag ve diğ., 1993)

Lopes ve Ladeira (1996) tarafından yapılan çekme deneylerinde zemin sıkılığının çekme kuvvetine etkisi incelenmiştir. Rölatif sıkılık (D_r) değerleri % 50 ve % 86 olan iki farklı sıkılık durumunda geogrid donatı elemanlarının zemin ortamında çekme davranışları belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar çekme kuvveti-deplasman ilişkisi açısından Şekil 2.11' de verilmiştir. Rölatif sıkılık durumu % 50 için geogrid donatı elemanı ile zemin arasındaki çekme kuvveti yaklaşık 32.2 kN/m değerlerinde olduğu görülmüştür. Fakat sıkı durum için ise ($D_r = \% 86$) çekme kuvveti 45.3 kN/m değerine kadar yükselmiş ve daha sonra geogrid donatı elemanı çekme dayanımını aştığı için hızlı bir düşüş göstermiştir.



Şekil 2.11. Zemin sıkılığın çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi (Lopes ve Ladeira, 1996a)

Bolt ve Duszyńska (2000) tarafından kumlu zemin ortamında geogrid donatı elemanları kullanılarak yapılan çekme deneylerinde, zemin sıkılığının zemin-geogrid donatı elemanı arasında meydana gelen çekme kapasitesine etkisi incelenmiştir. Rölatif sıkılık (D_r) değerleri %38 ve %82 olarak hazırlanan zemin ortamlarında geogrid donatı elemanlarının çekme kapasiteleri sıkılığı yüksek olan zemin durumunda daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada rölatif sıkılık değeri %82 için çekme kapasitesi artan deplasman değeri ile artmakta olup fakat donatı elemanının çekme dayanımına ulaşması nedeniyle donatı elemanı yenilmiştir. Bu nedenle Bolt ve Duszyńska (2000) tarafından yapılan çalışmada, donatı elemanının çekme dayanımı çekme kapasitesini etkilediği görülmüştür.

Zhang, Yasufuku ve Ochiai (2007) tarafından yapılan çalışmada, gevşek ve sıkı zemin koşullarında geogrid donatı elemanının zeminler içerisindeki çekme davranışı incelenmiştir. Zhang ve diğ. (2007) tarafından yapılan çalışma sonucunda sıkı zemin koşullarında geogrid donatı elemanının çekme kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Zhang ve Yasufuku (2009) tarafından yapılan, zemin-geogrid ara yüzey sürtünme davranışının belirlenmesine yönelik diğer bir çalışma kapsamında çekme deneyleri üç farklı zemin sıkılığında gerçekleştirilmiştir. Gevşek ($D_r = \%50$), orta sıkı ($D_r = \%80$) ve sıkı ($D_r = \%95$) zemin koşullarında hazırlanan kum malzemesi kullanılarak çekme deneyleri yapılmış ve elde edilen bulgular tartışılmıştır. Zhang ve Yasufuku (2009) tarafından elde edilen çekme deneyleri sonucunda, sıkılığı yüksek olan zemin ortamında geogrid donatı elemanının çekme kapasitelerinin yüksek olduğu belirlenmiştir.

Wang, Chen, Liu, Kang ve Wang (2019) tarafından yapılan laboratuvar çekme deneylerinde, geogrid donatı elemanları farklı sıkılık koşulları altında çekme yüklerine maruz bırakılarak geogrid donatı elemanlarının zeminler ortamındaki çekme davranışları incelenmiştir. Kuru

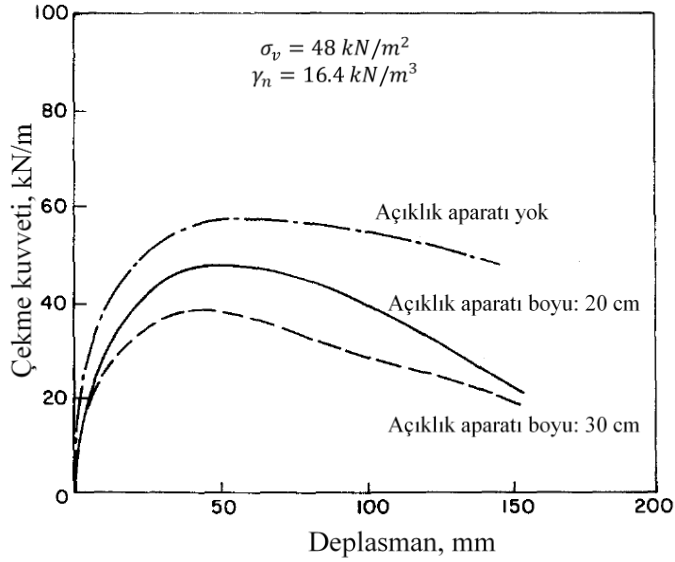
birim hacim ağırlıkları 1.51, 1.57 ve 1.68 kN/m³ olan zemin ortamlarında yapılan çekme deneyleri sonucunda, geogrid donatı elemanının çekme kapasitesi daha sıkı zemin koşullarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

2.3.7. Açıklık aparatı boyunun etkisi

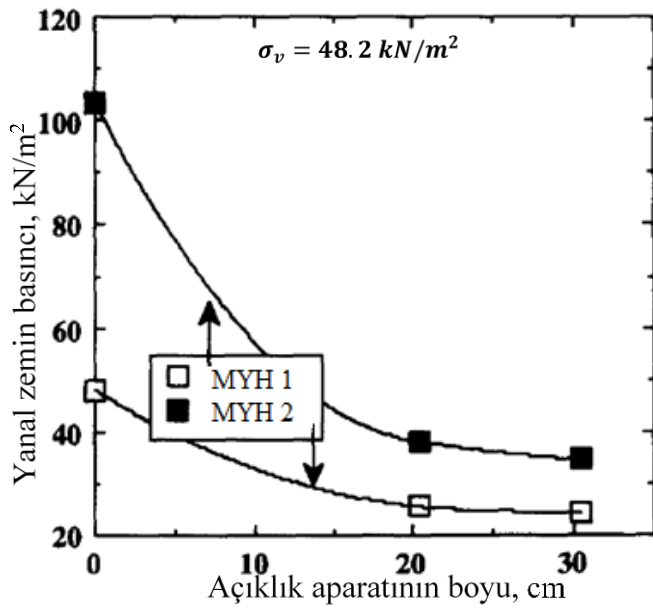
Çekme deneylerinde geosentetik donatı elemanlarının zeminler içerisindeki çekme kapasiteleri, çekme deney kutusu ön yüzünün imal edildiği malzeme türüne bağlı olmaktadır. Kutu ön yüzü oldukça rijit malzemedan (çelik, beton vb.) imal edilen çekme deney düzeneklerinde, kutu ön yüzünde çekme sırasında gerilme yığılmaları oluşmaktadır (Palmeira ve Milligan, 1989). Kutu ön yüzünde meydana gelen yanal gerilme yığılmaları nedeniyle zemin-geosentetik arasında meydana gelen çekme dirençleri etkilenmektedir. Bu bakımdan çekme deneylerinde kutu ön yüzünde gerilme yığılmaları oluşmaması için kutu ön yüzüne monte edilen bir açıklık aparatı kullanılmaktadır. Açıklık aparatı kullanılması ile geosentetik donatı elemanı, kutu ön yüzüne uzak bir mesafeden çekme yüklerine maruz bırakılmaktadır. Bu nedenle kutu ön yüzünde oluşacak olan gerilme yığılmaları da ötelenmiş olmaktadır.

Farrag, Acar ve Juran (1993), açıklık aparatı boyunun çekme kuvvetine ve kutu ön yüzünde meydana gelen yanal basınca etkisini incelemişlerdir. Geogrid donatı elemanı çekme yüküne maruz bırakıldığında kutu ön yüzünde gerilme yığılması oluşmakta ve buna bağlı olarak çekme kuvvetinde de bir miktar artış oluşmaktadır. Dolayısıyla kutu ön yüzüne yerleştirilen açıklık aparatı ile gerilme yığılması kutu ön yüzünden uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu bakımdan Farrag ve diğ., (1993) tarafından yapılan çalışmada, $\sigma_v=48$ kN/m² düşey gerilme altında açıklık aparatı kullanmadan ve açıklık aparatı boyu 20 cm ve 30 cm olmak üzere üç farklı sınır koşullarında çekme deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.12a' da verilmiştir. Buna göre açıklık aparatının boyu arttıkça maksimum çekme kuvveti değerinde de açık bir şekilde düşüş görülmektedir. Bu durum kutu ön yüzünde meydana gelen gerilme yığılmasının ortadan kalktığını veya minimize olduğunu göstermektedir. Ayrıca açıklık aparatı boyunun etkisini daha detaylı bir şekilde göstermek için kutu ön yüzüne yerleştirilen minyatür yük hücreleri (MYH) ile kutu ön yüzünde meydana gelen yanal basınçlar ölçülmüştür. Minyatür yük hücreleri deney kutusu ön yüzünde bulunan açıklık aparatının hemen üstünde (MYH 2) ve 15 cm yükseklikte (MYH 1) iki ayrı yere yerleştirilmiştir. Yapılan çekme deneylerinde kutu ön yüzünde oluşan yanal zemin basınçları açıklık aparatı

boyu arttıkça düşüş eğiliminde olduğu görülmüştür (Şekil 2.12b). Sonuç olarak Farrag ve diğ., (1993) yaptığı çalışmada 30 cm açıklık aparatı için optimum boy olarak belirlemiştir.



a)

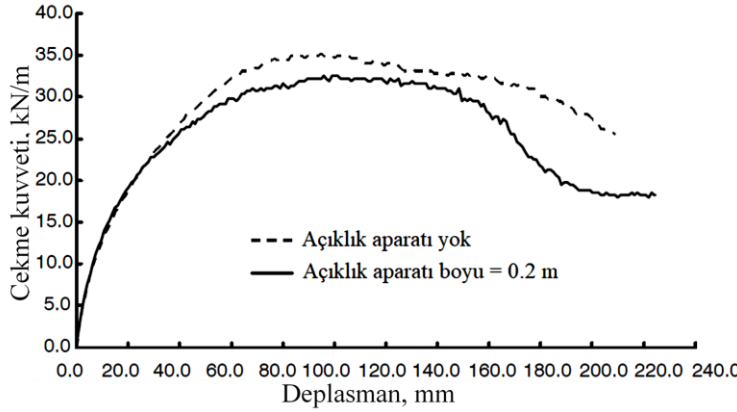


b)

Şekil 2.12. Açıklık aparatı boyunun çekme davranışına etkisi a) çekme kuvveti-deplasman ilişkisi b) kutu ön yüzünde meydana gelen yanal zemin basıncı ile açıklık aparatı boyu ilişkisi (Farrag ve diğ., 1993)

Lopes ve Ladeira (1996) tarafından yapılan çalışmada açıklık aparatı boyunun çekme davranışına etkisini incelemek amacıyla, geogrid donatı elemanı üzerinde aynı deney koşulları altında boyları 0 ve 0.2 m olan açıklığa sahip aparatlar kullanılmış ve elde edilen

sonuçlar Şekil 2.13’ te verilmiştir. Açıklık aparatının kullanılması ile geogrid donatı elemanın çekme kapasitesinde bir miktar düşüş gözlenmiştir. Sonuç olarak açıklık aparatı kullanılması ile kutu ön yüzünde oluşan gerilme yığılmalarının minimize edilmesinden dolayı geogrid donatı elemanın çekme kapasitesinde bir miktar azalma meydana gelmiştir.



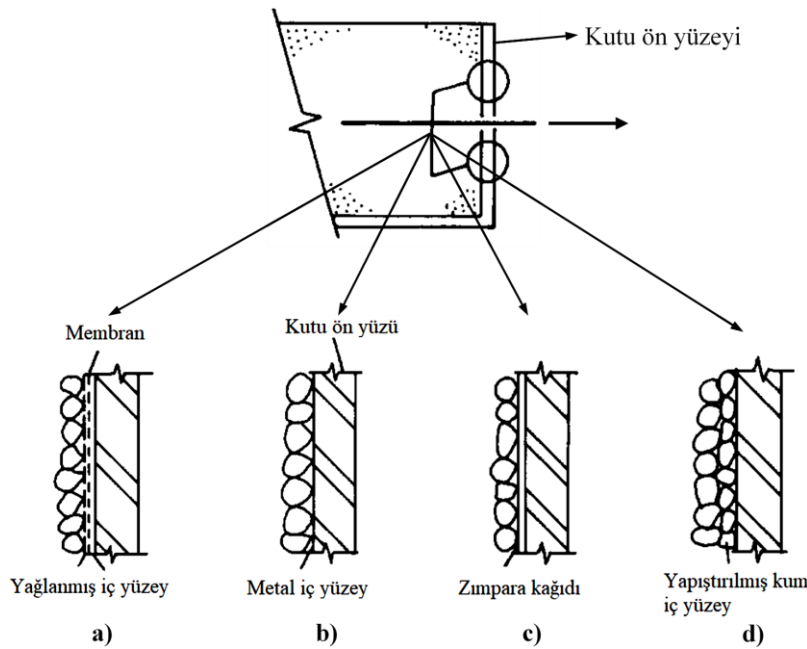
Şekil 2.13. Açıklık aparatının çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi (Lopes ve Ladeira, 1996)

Chang, Chang, Yang ve Yan (2000) tarafından yapılan çalışmada, açıklık aparatının boyunun çekme kapasitesine etkisi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, boyları 0 cm, 7.5 cm, 15 cm ve 20 cm olarak belirlenen açıklık aparatları kullanılarak çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Chang ve diğ. (2000) tarafından yapılan çalışmada en yüksek çekme kapasitesi değeri, açıklık aparatı boyunun 0 cm olduğu durumda meydana gelmiştir. Açıklık aparatı boyunun 15 cm ve 20 cm olduğu durumlarda ise çekme kapasitesinde belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Dolayısıyla Chang ve diğ. (2000) tarafından yapılan çalışmada, en uygun açıklık aparatı boyunun 15 cm veya 20 cm olduğu ortaya koyulmuştur. Ayrıca Chang ve diğ. (2000) tarafından yapılan çalışmada, farklı açıklık aparatı boylarında çekme kutusu ön yüzüne yerleştirilen minyatür yük hücreleri yardımı ile kutu ön yüzünde çekme yükünden dolayı meydana gelen gerilme yığılmaları belirlenmiştir. Açıklık aparatı boyu 15 cm ve 20 cm için kutu ön yüzünde meydana gelen gerilme yığılmalarının değerleri diğer açıklık aparatı boylarına göre neredeyse eşit miktarda ve oldukça düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir.

2.3.8. Kutu ön yüzünün etkisi

Geogrid donatı elemanları gibi enine donatı elemanlarından oluşan geosentetikler (hücre sel yapı elemanı vb.), sıkı zemin ortamlarında çekme yüklerine maruz bırakıldıklarında

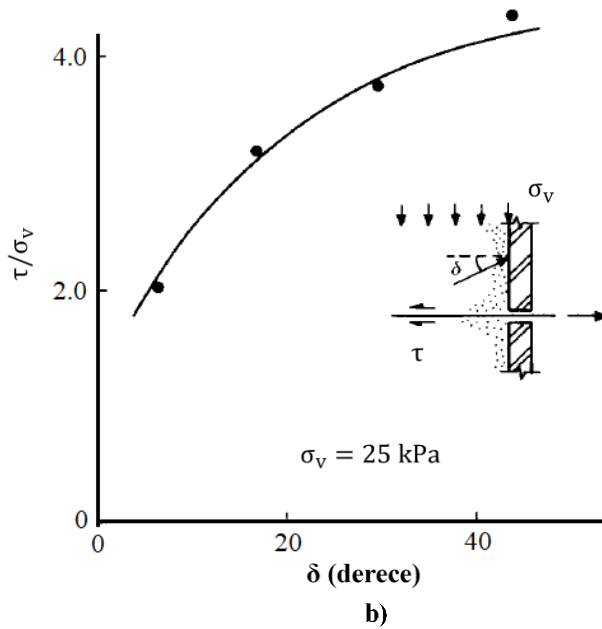
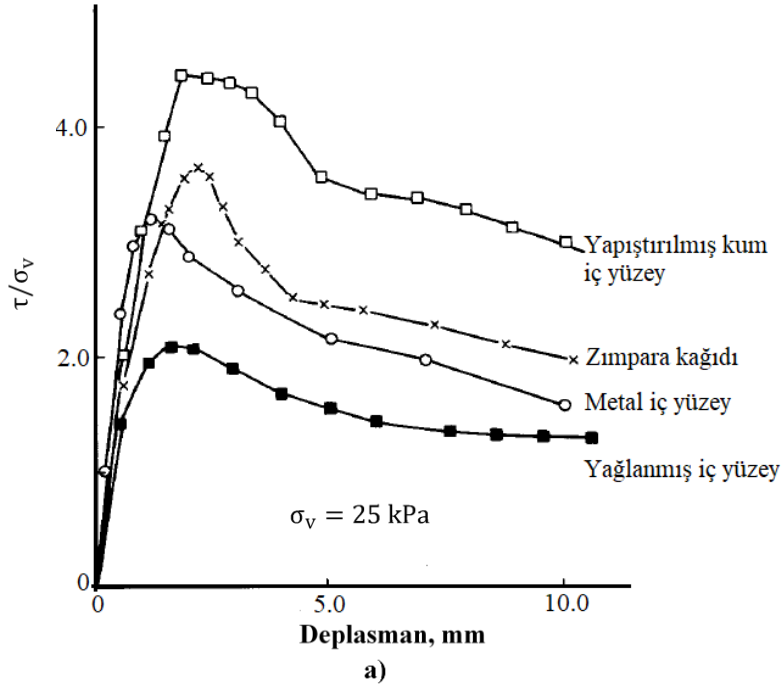
zeminlerde hacimsel genişleme meydana gelmektedir. Zeminde meydana gelen hacimsel genişlemeden dolayı kutu kenar yüzeylerinde gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Özellikle kutu ön yüzeyinde meydana gelen gerilme yığılmasının diğer yüzeylere göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Palmeira ve Milligan, 1989). Deney kutusu ön yüzünde meydana gelen gerilme yığılmaları kutu ön yüzü pürüzlülüğüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu doğrultuda Palmeira ve Milligan (1989) tarafından yapılan çekme deneylerinde geogrid donatı elemanlarının çekme davranışı, kutu ön yüzü ile zemin arasındaki sürtünme açısına bağlı olarak incelenmiştir. Kutu ön yüzü pürüzlülüğün etkisini incelemek için farklı pürüzlülüklerde kutu ön yüzü oluşturulmuştur (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Çekme deneylerinde hazırlanan farklı pürüzlülüklerdeki kutu iç yüzeyleri a) membran kaplama ile yağlanmış iç yüzey b) metal iç yüzey c) zımpara kağıdı ile kaplanmış iç yüzey d) yapıştırılmış kum daneleri ile oluşturulan iç yüzey (Palmeira ve Milligan, 1989)

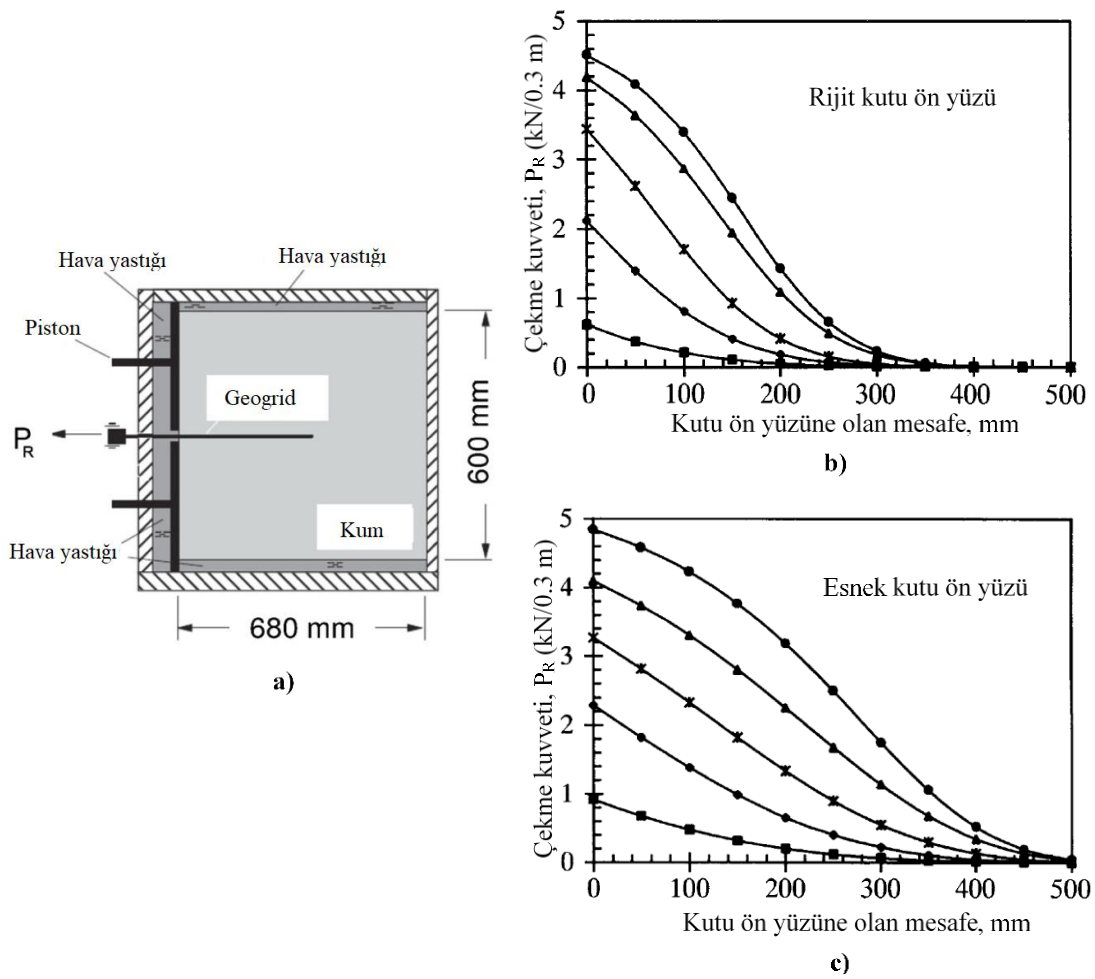
Palmeira ve Milligan (1989) tarafından farklı pürüzlülüklerde hazırlanan kutu ön yüzü iç cidarlarında (Şekil 2.13) yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 2.15'te verilmiştir. Maksimum çekme gerilmesi yapıştırılmış kum iç yüzeyinde, minimum çekme gerilmesi ise gres yağı ile yağlanmış kutu ön yüzü iç yüzeyinde elde edilmiştir. Ayrıca farklı pürüzlülüklerde hazırlanan kutu ön yüzü iç yüzeyleri ile zemin arasındaki sürtünme açısını (δ) belirlemek için kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Belirlenen kutu ön yüzü iç yüzey sürtünme açıları ile çekme gerilmeleri (τ) arasındaki ilişkiler Şekil 2.15b'de verilmiştir. Kutu ön yüzü iç yüzeyi ile zemin arasındaki sürtünme açısı arttıkça geogrid donatı

elemanları üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri artmaktadır. Dolayısıyla Palmeira ve Milligan (1989) tarafından yapılan çalışmada kutu ön yüzü iç yüzeyindeki pürüzlülük arttıkça, çekme yükleri altında kutu ön yüzünde meydana gelen gerilme yığılmalarının artmasından dolayı donatı elemanlarının çekme yüklerinin de arttığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.15. Farklı pürüzlülüklerdeki kutu iç yüzeylerine göre çekme davranışları a) normalize çekme gerilmesi-deplasman ilişkisi b) normalize çekme gerilmesi-duvar ön yüzü pürüzlülük açısı (Palmeira ve Milligan, 1989)

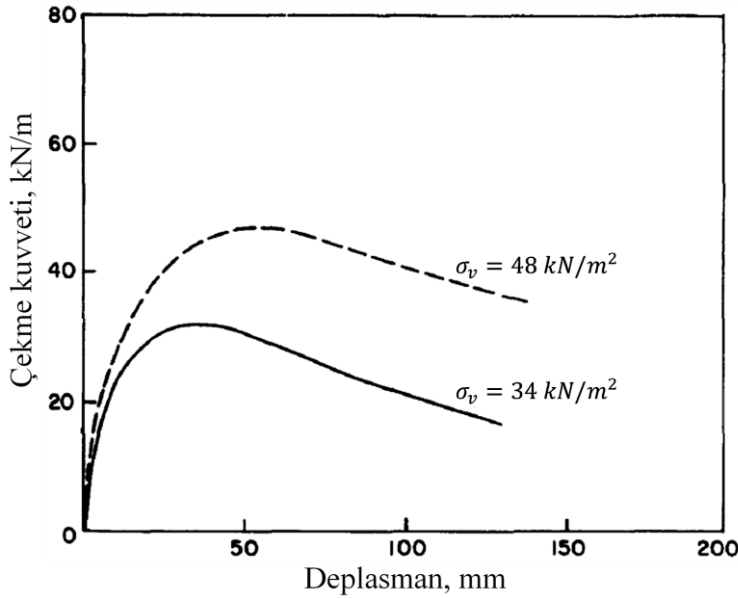
Çekme deney kutusu ön yüzü açısından zemin-geosentetik ara yüzey sürtünme davranışını etkileyen bir diğer faktör ise kutu ön yüzünün rijitliğidir. Sugimoto ve diğ. (2001) tarafından yapılan çekme deneylerinde kutu ön yüzü rijit ve esnek olmak üzere iki farklı rijitlikte hazırlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.16’ da verilmiştir. Esnek kutu ön yüzeyi deney kutusu iç yüzeyine yerleştirilen membranın içine basınçlı hava doldurularak elde edilmiştir. Sugimoto ve diğ. (2001) tarafından yapılan çekme deneylerinde, kutu ön yüzü rijitliğinin donatı elemanının çekme davranışını etkilediği belirlenmiştir. Esnek kutu ön yüzünde yapılan çekme deneylerinde donatı elemanları üzerinde meydana gelen deplasmanların dağılımları üniform iken, rijit kutu ön yüzünde ise deplasman dağılımları üniform olmamaktadır. Bu durum rijit duvar deneylerinde kutu ön yüzüne yakın bölgelerde bulunan zeminin sıkılığının artması sonucunda, donatı elemanları üzerinde meydana gelen deplasman dağılımlarının düzensizliği nedeniyle oluşmaktadır (Sugimoto ve diğ., 2001).



Şekil 2.16. Kutu ön yüzünün çekme davranışına etkisi a) çekme deney şematigi b) rijit kutu ön yüzü c) esnek kutu ön yüzü (Sugimoto ve diğ., 2001)

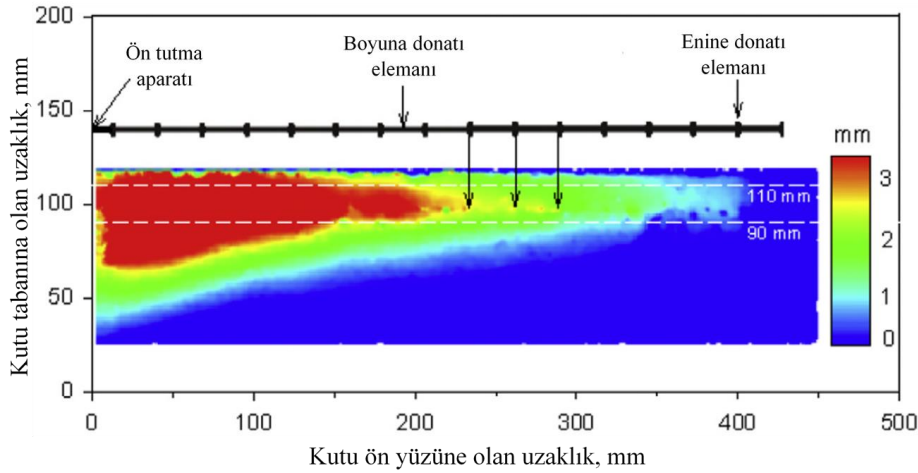
2.3.9. Düşey gerilmenin etkisi

Zemin-geogrid ara yüzeyinde meydana gelen zeminin hacimsel genişleme davranışı, zemin üzerine uygulanan düşey gerilmenin büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla uygulanan düşey gerilme seviyesine bağlı olarak zeminde meydana gelen hacimsel genişlemeden dolayı zemin-geogrid çekme davranışı farklılık göstermektedir. Farrag ve diğ. (1993) tarafından yapılan çalışmada, uygulanan düşey gerilmenin (σ_v) çekme kapasitesine etkisi Şekil 2.17’ de verilmiştir. Buna göre düşey gerilme değeri 34 kN/m^2 ’ ten 48 kN/m^2 ’ e yükseldiğinde çekme kapasitesinde belirgin bir artış gözlenmektedir.

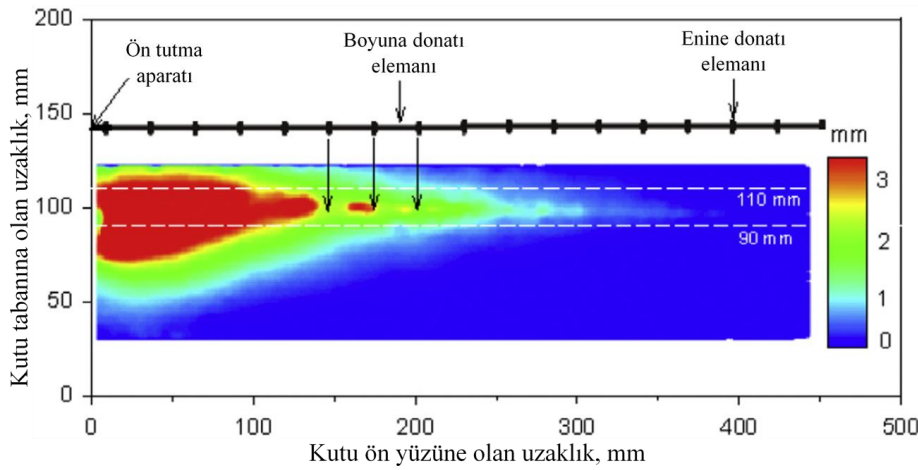


Şekil 2.17. Düşey gerilmenin çekme kapasitesine olan etkisi (Farrag ve diğ., 1993)

Ezzein ve Bathurst (2014) tarafından, geogrid donatı elemanları ile saydamlaştırılmış zemin arasında meydana gelen ara yüzey zemin hareketi incelenmiştir. Çekme deney düzeneği donatı elemanın hareketini görüntülemek için pleksi cam kullanılarak imal edilmiştir. Buna göre dijital kameralar tarafından alınan görüntüler görüntü işleme tekniği kullanılarak analiz edilmiş ve elde edilen bulgular Şekil 2.18’ de verilmiştir. Deney başlangıcından itibaren 15 dakika içerisinde alınan görüntülerle yapılan analizde, 10 ve 25 kPa uygulanan düşey gerilme altında geogrid donatı elemanı üzerinde meydana gelen hareketler verilmiştir (Şekil 2.18). Maksimum hareketler deney kutusu ön yüzünde meydana gelmiştir. Zemin-geogrid arasında sürtünmeden kaynaklı zeminde meydana gelen hacimsel artış, artan düşey gerilme ile azalmıştır (Şekil 2.18). Düşey gerilmenin zemin-geogrid ara yüzey sürtünme mekanizmasını etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğunu göstermektedir.



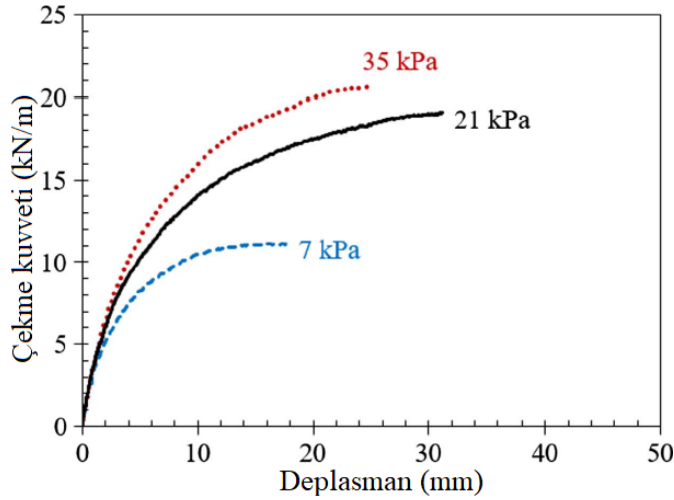
a) Düşey gerilme= 10 kPa



b) Düşey gerilme= 25 kPa

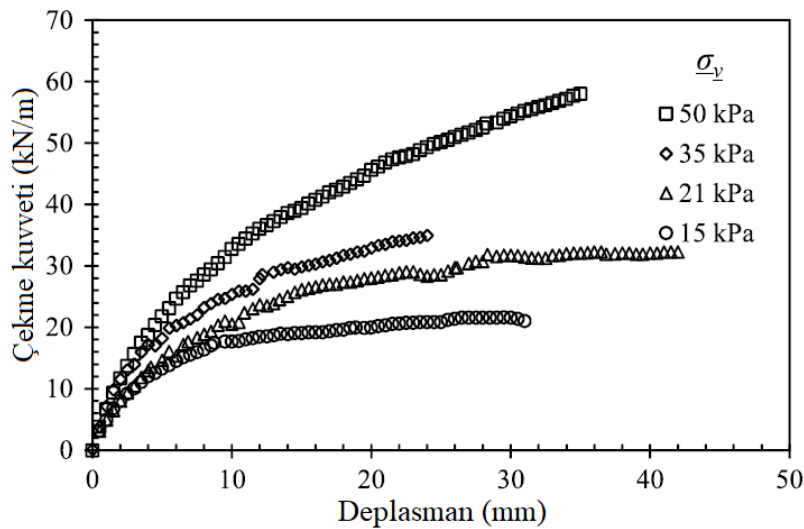
Şekil 2.18. Belli bir çekme anında ($t=0-15$ dk) geogrid donatı elemanı üzerinde elde edilen deformasyon çizgileri (Ezzein ve Bathurst, 2014)

Roodi ve Zornberg (2017) tarafından yapılan çalışmada, düşey gerilmenin geogrid donatı elemanının zemin içerisindeki çekme kapasitesine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada aynı boyutlarda hazırlanan geogrid donatı elemanları üzerinde 7, 21 ve 35 kPa olmak üzere üç farklı seviyede düşey gerilme uygulanmıştır. Roodi ve Zornberg (2017) tarafından yapılan çalışmada artan düşey gerilme ile geogrid donatı elemanın zemin ortamında ortaya koyduğu çekme kapasitesi artmaktadır. Düşey gerilme değeri 7 kPa için elde edilen çekme kapasitesi yaklaşık olarak 11 kN/m iken artan düşey gerilme ile (21 kPa ve 35 kPa) çekme kapasitesi 19 kN/m ve 21 kN/m değerlerine ulaştığı görülmüştür (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Düşey gerilmenin çekme kapasitesine olan etkisi (Roodi ve Zornberg, 2017)

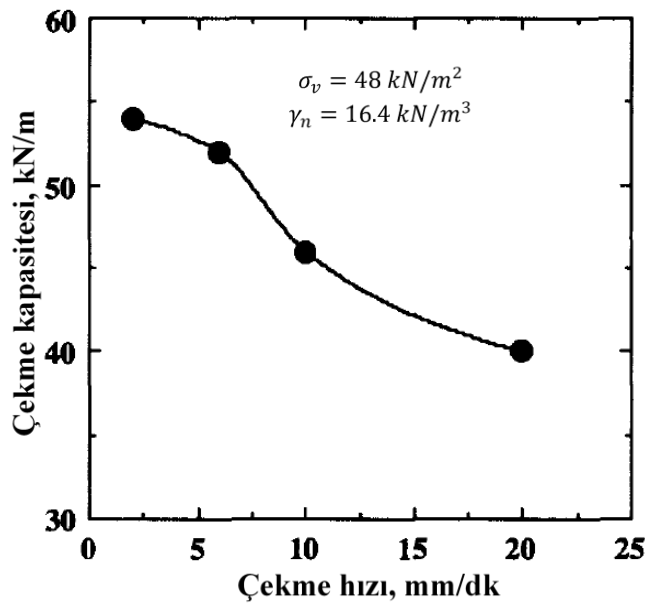
Morsy, Zornberg, Han ve Leshchinsky diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, düşey gerilmenin zemin-geosentetik ara yüzey sürünme davranışına etkisi laboratuvarında yapılan çekme deneyleri yardımı ile incelenmiştir. Geotekstil donatı elemanı 15, 21, 35 ve 50 kPa düşey gerilmeler altında çekme deneylerine maruz bırakılarak elde edilen bulgular tartışılmıştır. Morsy ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, artan düşey gerilme ile geotekstil donatı elemanının zemin içerisindeki çekme kapasitesinin arttığı görülmüştür (Şekil 2.20). Artan düşey gerilme değeri (15 kPa' dan 50 kPa' a) ile geotekstil donatı elemanının zemin içerisindeki çekme kapasitesi yaklaşık olarak üç kat arttığı belirlenmiştir. Morsy ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada düşey gerilmenin zemin-geotekstil çekme davranışına etkisi açık bir şekilde ortaya koyulmuştur.



Şekil 2.20. Düşey gerilmenin çekme kapasitesine olan etkisi (Morsy ve diğ., 2019)

2.3.10. Çekme hızının etkisi

Farrag, Acar ve Juran (1993) tarafından geogrid donatı elemanlarının zeminler içersindeki çekme hızının, sürtünme davranışına etkisini incelenmiştir. Bu amaçla, hızları sırasıyla 2 mm/dk, 6 mm/dk, 10 mm/dk ve 20 mm/dk olmak üzere dört farklı hız altında geogrid donatı elemanları zemin ortamlarında çekme işlemine tabi tutulmuştur. Farrag ve diğ., (1993) tarafından yapılan çalışmada çekme hızının 2 mm/dk ‘ dan 20 mm/dk’ ya yükseltilmesi ile çekme kapasitesinde yaklaşık olarak %25’ lik bir azalma gözlemlenmiştir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Çekme hızının çekme kapasitesine olan etkisi (Farrag ve diğ., 1993)

Bolt ve Duszyńska (2000) tarafından kumlu zemin ortamında geogrid donatı elemanları kullanılarak yapılan çekme deneylerinde, geogrid donatı elemanları iki farklı çekme hızlarına tabi tutularak çekme hızının çekme kapasitesine etkisi incelenmiştir. Çekme hızları sırasıyla 2 mm/dk ve 5 mm/dk olacak şekilde yapılan deneyler sonucunda, çekme hızının çekme kuvveti-deplasman davranışına etkisi ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir. Fakat geogrid donatı elemanları çekme kapasitelerine 5 mm/dk çekme hızı için daha düşük deplasman değerinde ulaştığı görülmüştür.

Chang, Chang, Yang ve Yan (2000) tarafından yapılan çalışmada, geogrid donatı elemanları zemin ortamında farklı çekme hızlarına tabi tutularak çekme hızının çekme kapasitesine etkisi incelenmiştir. Geogrid donatı elemanlarının zemin ortamındaki çekme kapasiteleri; 1 mm/dk, 5 mm/dk, 10 mm/dk, 20 mm/dk ve 50 mm/dk çekme hızlarında incelenmiştir. Chang

ve diğ. (2000) tarafından aynı deney koşulları altında yapılan çekme deneyleri sonucunda, geogrid donatı elemanlarının çekme hızı 1 mm/dk' dan 10 mm/dk' ya çıkarıldığında çekme kapasiteleri de 68.67 kN/m' den 59.32 kN/m' ye gerileyerek çekme kapasitesinde %16'lık bir azalma gözlemlenmiştir. Fakat geogrid donatı elemanına uygulanan çekme hızı 10 mm/dk' dan büyük (20 mm/dk ve 50 mm/dk) olduğu durumlarda, geogrid donatı elemanının çekme kapasitesinde belirgin bir değişim görülmemiştir.

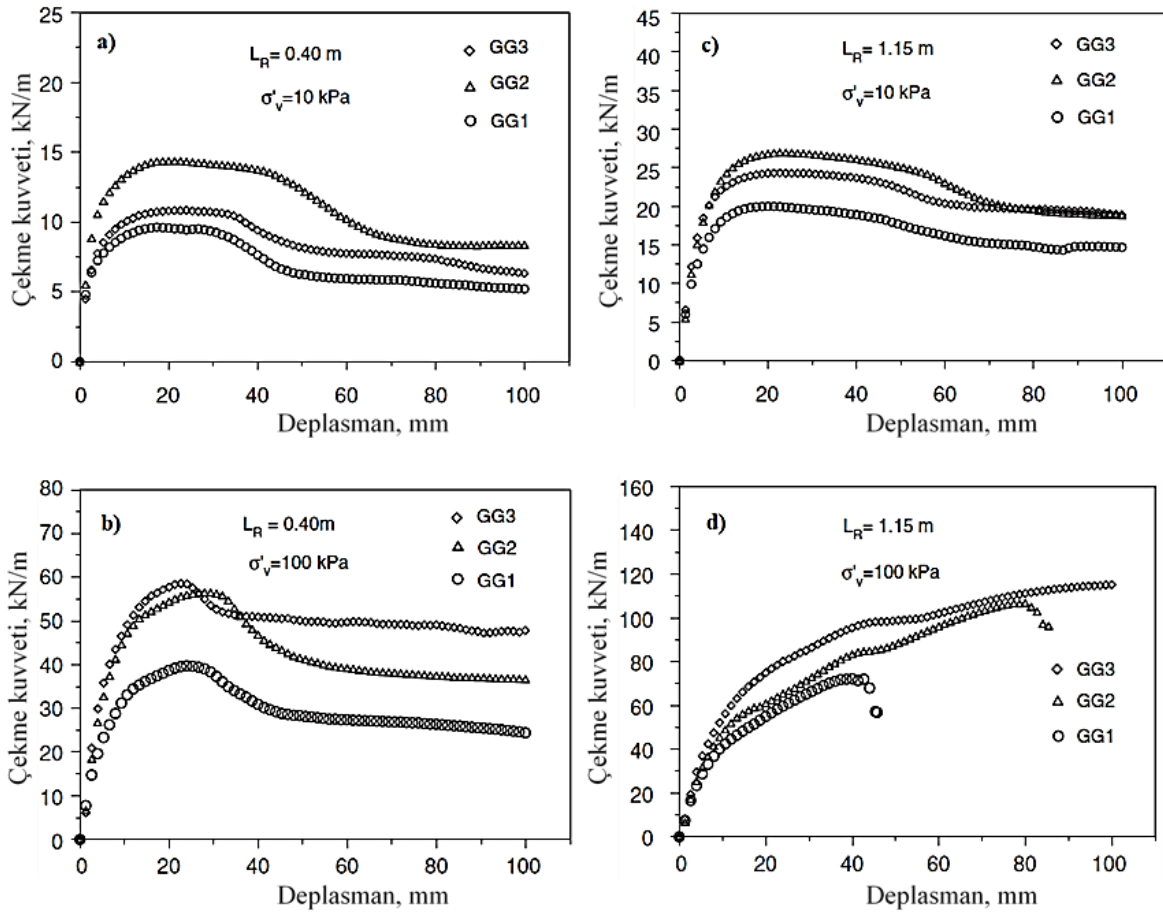
Palmeira (2004) tarafından yapılan çalışmada, geogrid donatı elemanları farklı çekme hızlarına tabi tutularak çekme hızının zemin-geogrid çekme davranışına etkisi incelenmiştir. Çekme hızları 0.1, 0.2, 0.5, 5, 10 ve 50 mm/dk olacak şekilde yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen çekme kuvveti-deplasman ilişkileri karşılaştırılmıştır. Yapılan çekme deneyleri sonucunda çekme hızının zemin-geogrid çekme davranışına önemli ölçüde etkisi olduğu belirlenmiştir. Çekme hızının 5 mm/dk ve daha büyük olduğu durumlarda çekme kapasitesinin belirgin olarak değişmediği görülmüştür.

2.3.11. Donatı elemanı türünün etkisi

Lopes ve Lopes (1999) tarafından yapılan çalışmada, geogrid donatı türünün zeminler içerisindeki çekme davranışı üzerine etkisi iki farklı rijitliğe sahip donatı elemanı kullanılarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada, çekme dayanımları sırasıyla 55 kN/m ve 80 kN/m olan iki farklı geogrid donatı elemanı (GG1 ve GG2) aynı sıklık derecesine (D_r) sahip ortalama dane çapları (D_{50}) 0.43 mm ve 1.30 mm, içsel sürtünme açıları (ϕ) sırasıyla 35.7° ve 44.2° olan zemin ortamlarında çekme deneylerine tabi tutulmuştur. GG1 donatı elemanı, ortalama dane çapı büyük olan zemin ortamında malzeme çekme dayanımına ulaşarak yenilmiştir. GG2 donatı elemanları üzerinde yapılan çekme deneylerinde, ortalama dane çapı büyük olan zemin ortamında çekme kapasitesinin GG1 donatı elemanına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Lopes ve Lopes (1999) tarafından yapılan çalışmada, geogrid donatı elemanlarının çekme davranışı, önemli ölçüde malzeme çekme dayanımına bağlı olduğu ortaya konulmuştur.

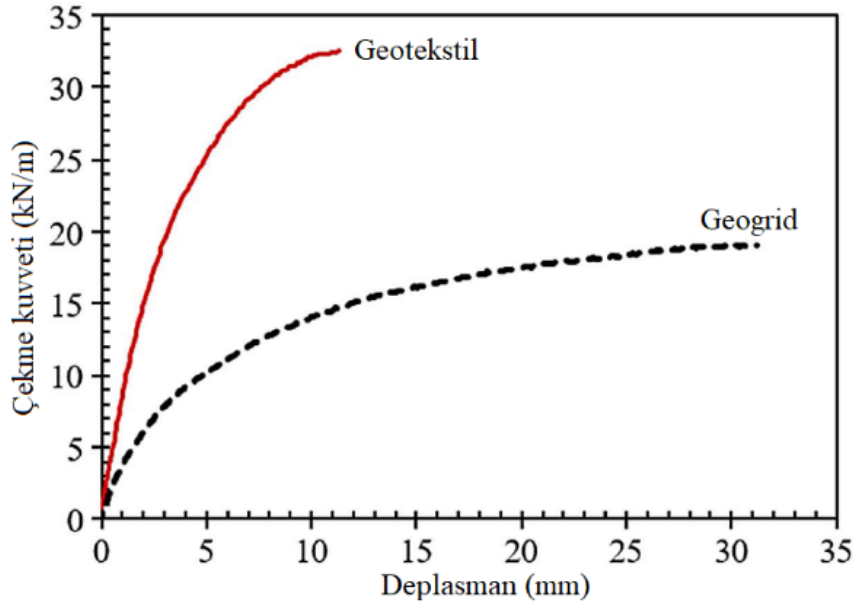
Moraci ve Recalcati (2006) tarafından yapılan çekme deneylerinde, üç farklı rijitliklere (GG3>GG2>GG1) sahip geogrid donatı elemanları üzerinde çekme deneyleri yapılarak donatı elemanının rijitliğinin çekme kapasitesine etkisi incelenmiştir. Moraci ve Recalcati (2006) tarafından yapılan çalışmada donatı elemanı rijitliğinin etkisini, donatı elemanı boyu

0.40 ve 1.15 m için 10 ve 100 kPa düşey gerilme altında incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.22’ de verilmiştir. Yapılan çekme deneyleri sonucunda, GG1 donatı elemanının çekme kapasitesi düşük, GG2 ve GG3 donatı elemanlarının ise yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca malzeme rijitliğinin yanında GG2 ve GG3 geogrid donatı elemanlarının üzerinde meydana gelen pasif direnç alanlarının GG1 donatı elemanına göre daha fazla olması GG2 ve GG3 donatı elemanlarının çekme kapasitesinin yüksek olmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.22. Farklı geogrid donatı elemanı türleri için çekme kuvveti-deplasman eğrileri (Moraci ve Recalcati, 2006)

Roodi ve Zornberg (2017) tarafından yapılan çalışmada, geogrid ve geotekstil donatı elemanları kullanılarak donatı elemanı türünün çekme davranışına etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada 12.4 kN/m malzeme çekme dayanımına sahip geogrid donatı elemanı ve 70 kN/m malzeme çekme dayanımına sahip geotekstil donatı elemanı kullanılmıştır. Aynı deney şartları (eleman boyutları ve uygulanan düşey gerilme) altında geogrid ve geotekstil donatı elemanı üzerinde yapılan çekme deneyleri sonucunda, geotekstil donatı elemanının çekme kapasitesinin daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 2.23).



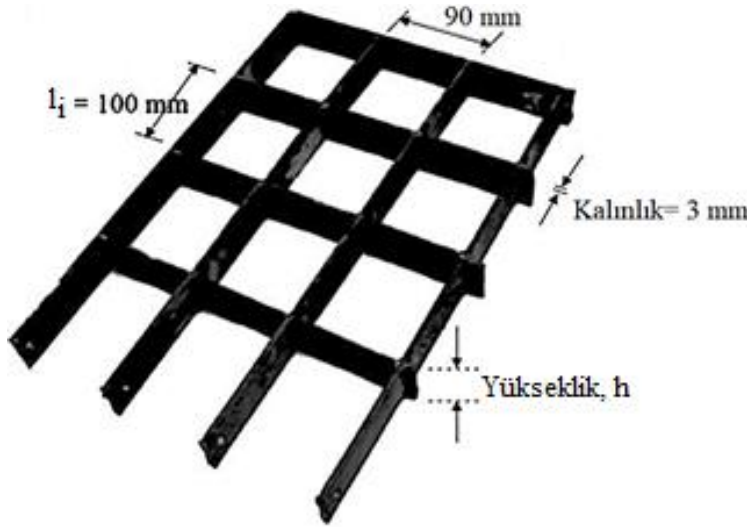
Şekil 2.23. Farklı donatı elemanı türleri için çekme kuvveti-deplasman eğrileri (Roodi ve Zornberg, 2017)

2.4. Zemin-Hücresele Yapı Elemanı (Geocell) Ara Yüzey Sürtünme Davranışının Belirlenmesi

Zemin-geosentetik ara yüzey sürtünme davranışı; genellikle geogrid, geoşerit ve geomembran gibi yüzeysel donatı elemanları kullanılarak belirlenmektedir. Fakat üç boyutlu ve hücresele yapıya sahip geosentetik yapı malzemeleri (geocell) ile zemin arasındaki sürtünme davranışını ortaya koyan çalışmalar yeterli düzeyde değildir. Hücresele yapı elemanları ile zemin arasındaki sürtünme davranışının belirlenmesi için yapılan laboratuvar çekme deneyleri sınırlı sayıda olup ancak birkaç araştırmacı tarafından yapılmıştır (Khedkar ve Mandal, 2009; Mohidin ve Alfaro, 2011; Han ve diğ., 2013; Manju ve Latha, 2013; Mehrjardi ve Motarjemi, 2018; Işık ve Gürbüz, 2018; Işık ve Gürbüz, 2020).

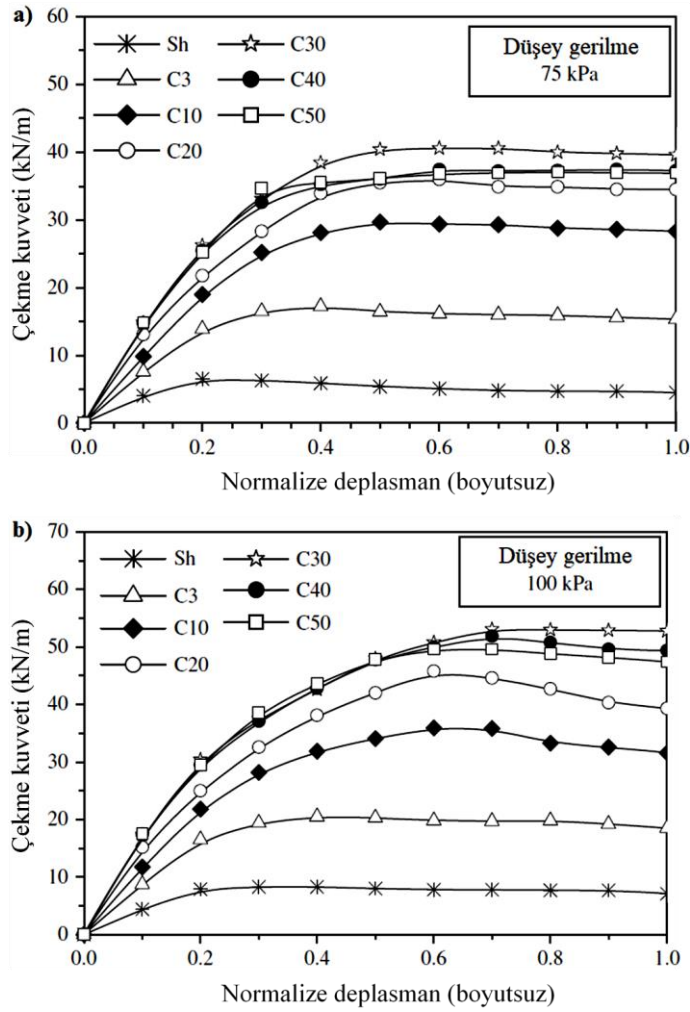
Khedkar ve Mandal (2009) tarafından yapılan toplam 16 adet çekme deneylerinde farklı yüksekliklere sahip hücresele donatı elemanlarının çekme davranışı incelenmiştir. Çekme deneylerinde kullanılan kum malzemesi deney düzeneğine %38 rölatif sıklıkta yerleştirilmiş ve bu sıklıkta yapılan kesme kutusu deneyleri sonucunda zeminin efektif içsel sürtünme açısı (ϕ') 31° olarak belirlenmiştir. Hücresele yapıli donatı elemanları boyuna ve enine elemanlardan oluşmakta olup enine donatı elemanları arasındaki uzaklık (l_i) 100 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 2.24). Hücresele donatı elemanları, yükseklikleri 3, 10, 20, 30, 40 ve 50 mm (C3, C10, C20, C30, C40 ve C50) olmak üzere altı farklı yükseklikte

hazırlanmıştır. Ayrıca donatı elemanı olarak aynı boyutlarda ve 0.5 mm kalınlığında metal levha (Sh) da kullanılmış ve hücresel donatı elemanları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında deneysel olarak elde edilen çekme kapasiteleri, teorik denklem ve numerik modellerle elde edilen çekme kapasiteleri ile karşılaştırılmıştır.



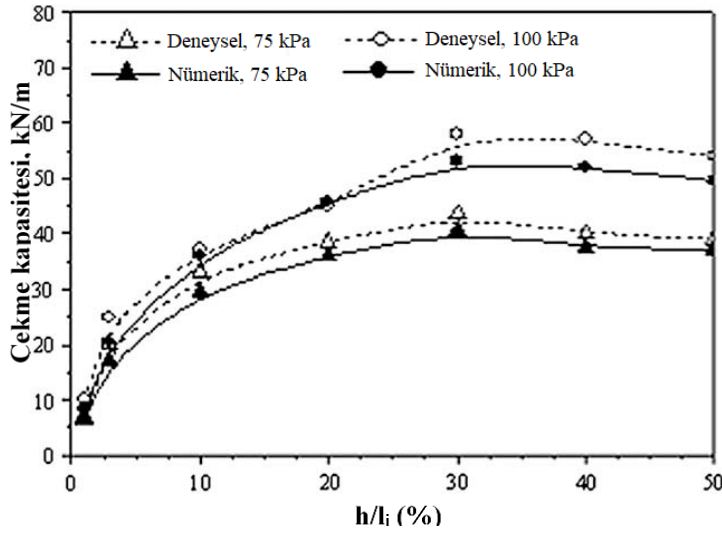
Şekil 2.24. Hücresel donatı elemanına ait şematik görünüş (Khedkar ve Mandal, 2009)

Khedkar ve Mandal (2009) tarafından yapılan çalışmada metal levha ve farklı yüksekliklerde hazırlanan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, 75 ve 100 kPa düşey gerilme altında belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.25’ te verilmiştir. Bu çalışmada, çekme kuvvetleri ile herhangi bir deplasman değerinin maksimum deplasman değerine bölünmesi ile elde edilen normalize deplasman değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Çekme kuvveti-normalize deplasman ilişkilerinden (Şekil 2.25) açıkça görüldüğü gibi artan hücre yüksekliği ile çekme kuvvetleri artmaktadır. Hücre yüksekliği 30, 40 ve 50 mm olan deney elemanları için çekme kuvvetindeki artış azalmakta olup çekme kuvveti-normalize deplasman davranışlarının benzer olduğu görülmüştür. Artan hücre yüksekliği ile enine ve boyuna donatı elemanları üzerinde ilave sürtünme ve pasif direnç alanları oluşacağından çekme kapasitesinin de artması beklenmektedir. Fakat Şekil 2.25a ve 2.25b’ de görüleceği üzere bu durum 30, 40 ve 50 mm hücre yükseklikleri için tam olarak görülmemektedir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında, çekme kapasitesini etkileyen diğer birçok faktörün (boyut etkisi, sınır koşulları vb.) olabileceği düşünülmektedir.



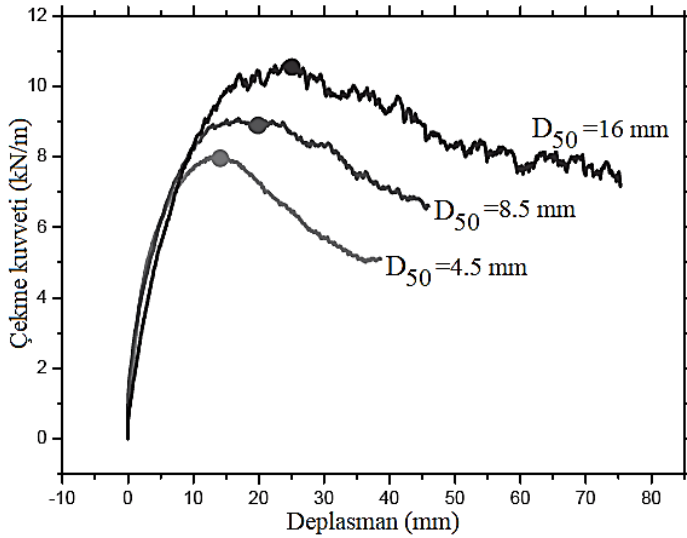
Şekil 2.25. Çekme kuvveti-normalize deplasman ilişkisi a) düşey gerilme=75 kPa b) düşey gerilme=100 kPa (Khedkar ve Mandal, 2009)

Khedkar ve Mandal (2009) tarafından yapılan nümerik çalışma sonucunda 75 kPa düşey gerilme altında elde edilen çekme kapasiteleri- h/l_i (donatı elemanı yüksekliği/enine donatı elemanları arasındaki uzaklık) eğrilerinin, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen eğriler ile oldukça iyi bir uyum gösterdiği görülmüştür (Şekil 2.26). Ayrıca 100 kPa düşey gerilme altında, %30, %40 ve %50 h/l_i oranları için deneysel olarak elde edilen çekme kapasiteleri nümerik çalışmadan elde edilen çekme kapasitelerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Fakat 100 kPa düşey gerilme altında, nümerik olarak elde edilen çekme kapasiteleri %3, %10 ve %20 h/l_i oranları için deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir. Nümerik ve deneysel çalışmalardan da görüleceği üzere hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri %30 h/l_i oranına kadar artmakta daha sonra %40 ve %50 h/l_i oranı için bir miktar azalma eğilimi göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri önemli ölçüde h/l_i oranlarından veya hücre yüksekliğinden etkilenmekte olduğu görülmüştür.



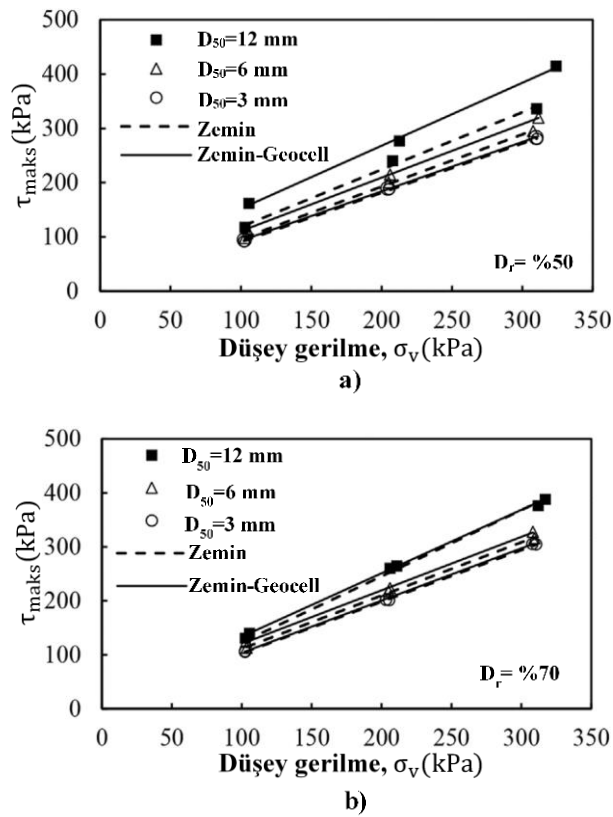
Şekil 2.26. Nümerik ve deneysel olarak belirlenen çekme kapasitesi ile H/S oranları arasındaki ilişki (Khedkar ve Mandal, 2009)

Han, Kiyota ve Tatsuoka (2013) tarafından yapılan çekme deneylerinde, hücresel yapı elemanlarının zeminler içerisindeki çekme davranışı, farklı dane çapı dağılımlarına sahip zemin malzemeleri kullanılmıştır. Hücresel yapı elemanları, 1 kPa düşey gerilme altında ortalama dane çapları (D_{50}) sırasıyla 4.5, 8.5 ve 16 mm olan zemin ortamlarında çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Çekme deneyleri sonucunda zeminin ortalama dane çapı arttıkça, hücresel yapı elemanlarının zeminler içerisinde ortaya koyacağı çekme kapasiteleri artmaktadır (Şekil 2.27).



Şekil 2.27. Ortalama dane çapına göre hücresel yapı elemanlarının zeminler içerisindeki çekme kuvveti-deplasman ilişkileri (Han ve diğ., 2013)

Mehrijardi ve Motarjemi (2018) tarafından yapılan çalışmada, hücresel yapı elemanı ile zemin arasındaki sürtünme davranışı kesme kutusu deneyleri yapılarak incelenmiştir. Kesme kutusu deneyleri 100, 200 ve 300 kPa düşey gerilmeler altında, farklı dane dağılımlara sahip (ortalama dane çapı 3, 6 ve 12 mm) üç farklı zemin malzemesi kullanılarak iki farklı rölatif sıkılıkta (%50 ve %70) yapılmıştır. Kesme kutusu deneyleri sonucunda kayma mukavemeti parametreleri olan zemin-hücresel yapı elemanı arasındaki sürtünme açısı, dilatasyon açısı ve kohezyon değerleri belirlenmiştir. Zemin ile hücresel yapı elemanı arasında meydana gelen kayma gerilmelerinin ve kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde Mohr-Coulomb yenilme zarfları çizilmiştir (Şekil 2.28). Maksimum kayma gerilmesi (τ_{maks}) ile düşey gerilme (σ_v) ilişkisinden de görüleceği üzere, zeminin ortalama dane çapı (D_{50}) arttıkça Mohr yenilme zarfı yukarı yönlü hareket etmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen kayma mukavemeti parametreleri Çizelge 2.3’ te verilmiştir. Mehrijardi ve Motarjemi (2018) tarafından yapılan bu çalışmada hücresel yapı elemanı kullanımı ile içsel sürtünme açısında çok belirgin bir değişim görülmemiş fakat kohezyon değerinde belirgin bir artış olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.28. Zemin-zemin ve zemin-hücresel yapı elemanı (geocell) arasında belirlenen Mohr yenilme zarfları a) $D_r = \%50$ b) $D_r = \%70$ (Mehrijardi ve Motarjemi, 2018)

Çizelge 2.3. Ortalama dane çapına göre içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri (Mehrijardi ve Motarjemi, 2018)

D ₅₀ (mm)	D _r =%50				D _r =%70			
	Zemin-zemin		Zemin-geocell		Zemin-zemin		Zemin-geocell	
	ϕ_{pik} (Derece)	Kohezyon c (kPa)	ϕ_{pik} (Derece)	Kohezyon c (kPa)	ϕ_{pik} (Derece)	Kohezyon c (kPa)	ϕ_{pik} (Derece)	Kohezyon c (kPa)
3	42.2	0	42.3	1.9	43.7	6.8	44.0	6.9
6	43.9	0.1	44.6	7.3	44.6	12.4	44.7	21.1
12	46.6	12.8	49.2	36	49.5	13.2	49.6	15.9

3. KOHEZYONSUZ ZEMİNLER İÇERİSİNDEKİ HÜCRESEL YAPI ELEMANLARININ (GEOCELL) ÇEKME KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK LABORATUVAR DENEY DÜZENEGİ

Hücresel yapı elemanları ile zeminler arasındaki sürtünme davranışının belirlenmesine yönelik hücresel yapı elemanları üzerinde laboratuvar çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Büyük ölçekli olarak imal edilen laboratuvar çekme deney düzeneğinde, farklı boyutlarda (genişlik, yükseklik ve uzunluk) ve rijitliklerde hazırlanan hücresel yapı elemanları kullanılarak çekme deneyleri yapılmıştır. Düşey gerilmenin, zemin-hücresel yapı elemanı arasındaki sürtünme davranışına etkisi incelemek amacıyla 10.12 kPa, 18.10 kPa ve 31.40 kPa düşey gerilmeler altında çekme deneyleri yapılmıştır. Farklı boyutlarda ve rijitliklerde hazırlanan hücresel yapı elemanları üzerinde çekme süresince meydana gelen deplasmanlar ve birim uzamalar, deplasman ölçerler ve gerinim pulları yardımı ile belirlenmiştir. Bu bölümde çekme deney düzeneği ve ekipmanları, deneylerde kullanılan malzemelere ait fiziksel ve mekanik özellikler, malzemelerin hazırlanışı, deneylerin yapılışı ve deney programı hakkında detaylı bilgiler sunulmuştur.

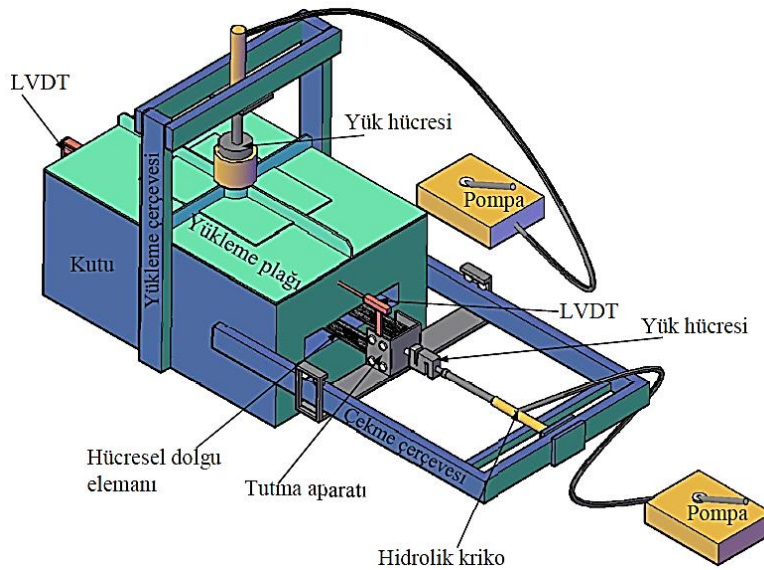
3.1. Çekme Deney Düzeneği

Yapı yükleri altında çekme kuvvetlerine maruz kalan geosentetiklerin zemin ortamındaki sürtünme davranışının belirlenmesine yönelik günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından tasarlanan çekme ve kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir (Chang ve diğ., 1977; Palmeira ve Milligan, 1989; Farrag ve diğ., 1993; Bergado ve Chai, 1994; Lopes ve Ladeira, 1996; Tatlısöz ve diğ., 1998; Bergado ve Teerawattanasuk, 2001; Moraci ve Gioffre, 2006; Zornberg ve diğ., 2009; Roodi ve Zornberg, 2017; Taghavi ve Mosallanezhad, 2017; Shen ve diğ., 2019; Morsy ve diğ., 2019; Isik ve Gurbuz, 2018; Isik ve Gurbuz, 2020; Isik ve diğ., 2020; Yunkul ve Gurbuz, 2020).

Genellikle iki boyutlu yüzeysel donatı elemanları olan geogrid, geotekstil ve geomembran gibi yapı malzemeleri kullanılarak geosentetiklerle ile zeminler arasında ortaya çıkabilecek sürtünme dirençleri laboratuvar ortamında belirlenmektedir (ASTMD-6706-01, 2001). Üç boyutlu yapıya sahip hücresel yapı elemanların (geocell) zeminler içerisinde ortaya koyacağı sürtünme davranışı, yüzeysel donatı elemanları için kullanılan laboratuvar deney elemanları

kullanılarak ortaya konulamamaktadır. Bu bakımdan hücresel yapı elemanları için tasarlanan çekme deney kutusunun boyutları ASTMD-6706’da belirtilen kriterler ölçüsünde hücresel yapı elemanlarına uygun bir şekilde bu çalışmada belirlenmiştir.

Deney kutusu boyutları; kutu iç yüzey cidarları ile zemin arasında sürtünmenin oluşmaması veya minimize edilmesi için kutu genişliği D_{85} ’in (%85’ ten geçen yüzdesine karşılık gelen dane çapı) 20 katından, kutu boyu tek bir hücresel yapı elemanın gözenek açıklığının 5 katından ve geosentetik elemanın altındaki ve üstündeki zemin yüksekliği ise D_{85} ’ in 6 katından daha fazla olacak şekilde belirlenmiştir (ASTMD-6706-01, 2001). Büyük ölçekli çekme deney düzeneği (1500 mm uzunluk, 1000 mm genişlik ve 700 mm yükseklik) Gazi Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında tasarlanmış ve imal edilmiştir. Çekme deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar farklı boyutlarda hücresel yapı elemanlarının kullanımına uygun olarak imal edilmiştir. Çekme deney düzeneğine ait genel görünüm şematik ve fotoğraf olarak sırasıyla Şekil 3.1 ve Resim 3.1’ de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çekme deney düzeneğine ait şematik görünüş

Çekme kutusunun imalatında 10 mm kalınlığında çelik plakalar kullanılmış olup plakalar birbirleriyle köşelerinden yan yüzeylerde kaynaklanmıştır. Çekme deney kutusu üzerinde deney sırasında numuneler üzerinde gerekli ölçümlerin alınabilmesi için yan yüzeylerde kabloların rahatlıkla geçebileceği boşluklar bırakılmıştır. Yükleme ve çekme işlemi için kutu kenarlarına ve üstüne kaynak yardımıyla birleştirilen çelik profiller (U profili) kullanılmıştır. Yükleme ve çekme işlemi Şekil 3.1 ve Resim 3.1’ den de görüleceği üzere bu profiller

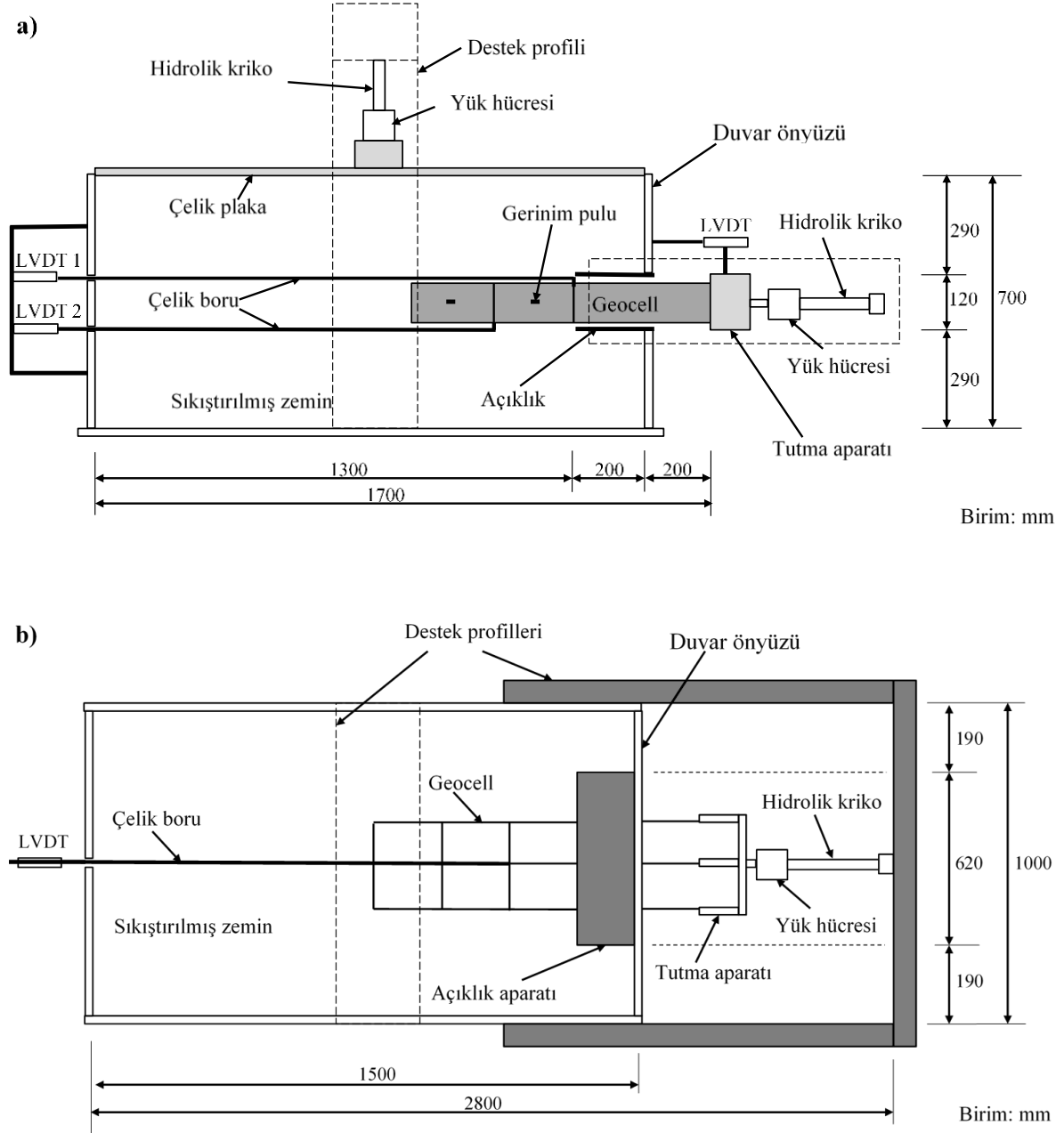
üzerine yerleştirilen ve iki taraflı (basma ve çekme işlemi) çalışabilen krikolar yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.1. Çekme deney düzeneğine ait genel görünüş

Yükleme ve çekme çerçevesine yerleştirilen krikolara yük hücreleri monte edilerek deney süresince hem yükleme hem de çekme anında oluşacak olan kuvvetlerin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Yükleme işleminin zemin yüzeyinde tüm alan boyunca eşit bir şekilde yapılabilmesi için boyutları 1000 mm x 1500 mm (genişlik x uzunluk) olan yükleme plakası kullanılmıştır. Zemin yüzeyine yükleme işleminin düzgün ve üniform olması için kalınlığı 10 mm olan yükleme plağı çelik destek profilleri ile güçlendirilmiştir.

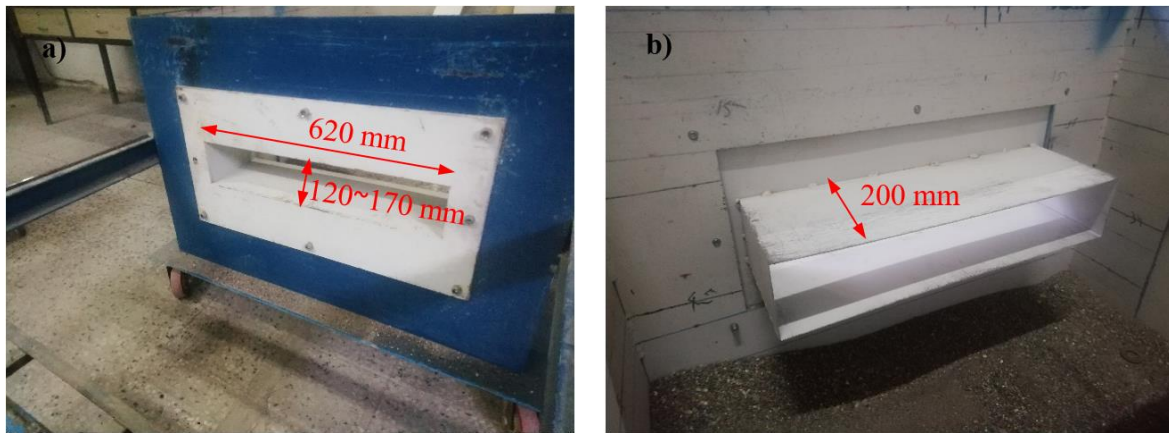
Çekme deney düzeneğine ait yandan ve üstten şematik görünüşler Şekil 3.2’ de verilmiştir. Şematik görünümde hücresel yapı elemanının deney düzeneğine yerleşimi ve konumu, yükleme ve çekme işlemini yapan hidrolik krikolar, düşey ve çekme yükünü ölçen yük hücreleri, hücresel yapı elemanını tutan ve çekme yükünü eleman kolları üzerine uygulayan tutma aparatı, farklı boyutlarda hücresel yapı elemanı için kullanılan açıklık aparatı ve hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan birim uzamalar ve deplasmanların ölçümü için kullanılan gerinim pulları ve LVDT’ ler (Doğrusal Değişkenli Türevsel Dönüştürücüler) gösterilmektedir.



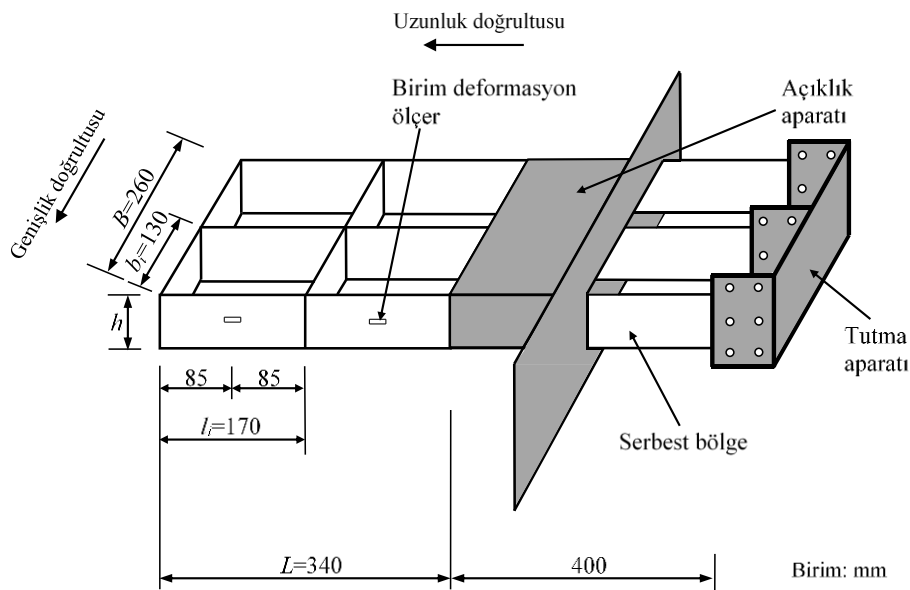
Şekil 3.2. Çekme deney düzeneğinin şematik görünüşü a) yandan görünüş, b) üstten görünüş

Çekme deneyi süresince deney kutusu iç yüzeylerinde oluşan cıdar sürtünme kuvvetlerinin minimize edilmesi için kutu iç yüzeyleri imalat aşamasında teflon boya ile boyanmıştır. Hücresel yapı elemanının zemin ortamından çekme sırasında çekme doğrultusunda kutu ön yüzünde meydana gelen gerilme yığılması oluşmaması için, uzunluğu önceki yapılan çalışmalarla da uyumlu olarak belirlenen ve uzunluğu 200 mm olan açıklık aparatı kullanılmıştır (Farrag ve diğ., 1993; Lopes ve Ladeira, 1996; Palmeira ve Milligan, 1989; Chang ve diğ., 2000; Moracia ve Recalcati, 2006). Açıklık aparatı kutu ön yüzüne monte edilebilen ve boyutları hücre yüksekliğine bağlı olarak değişebilen bir şekilde

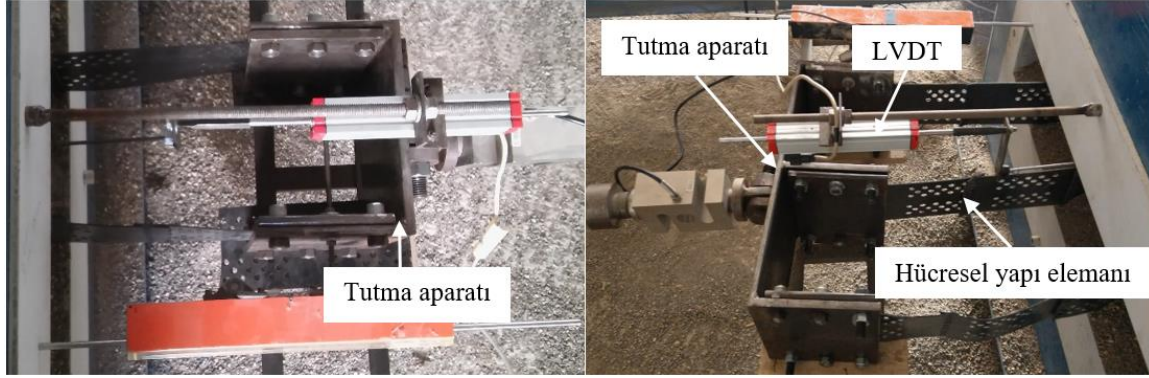
boyutlandırılmıştır (Resim 3.2a ve 3.2b). Deneysel çalışma kapsamında kullanılan açıklık aparatları; yüksekliği 100 mm hücresel yapı elemanları için boyutları 120 mm x 620 mm (yükseklik x genişlik), yüksekliği 150 mm hücresel yapı elemanları için boyutları 170 mm x 620 mm (yükseklik x genişlik) olan iki ayrı boyutlarda kutu ön yüzüne monte edilmiştir. Açıklık aparatı ve hücresel yapı elemanın yerleşimini gösteren şematik bir çizim Şekil 3.3’ te verilmiştir. Ayrıca hücresel yapı elemanına çekme yükünü uygulayabilmek için kullanılan tutma aparatları farklı genişliklerde hazırlanan hücresel yapı elemanları için özel olarak imal edilmiş olup Resim 3.3’ te verilmiştir.



Resim 3.2. Çekme deney kutu ön yüzüne monte edilen açıklıklık aparatı a) önden görünüş, b) kutu içinden görünüş



Şekil 3.3. Açıklık aparatı ve hücresel yapı elemanının şematik gösterimi



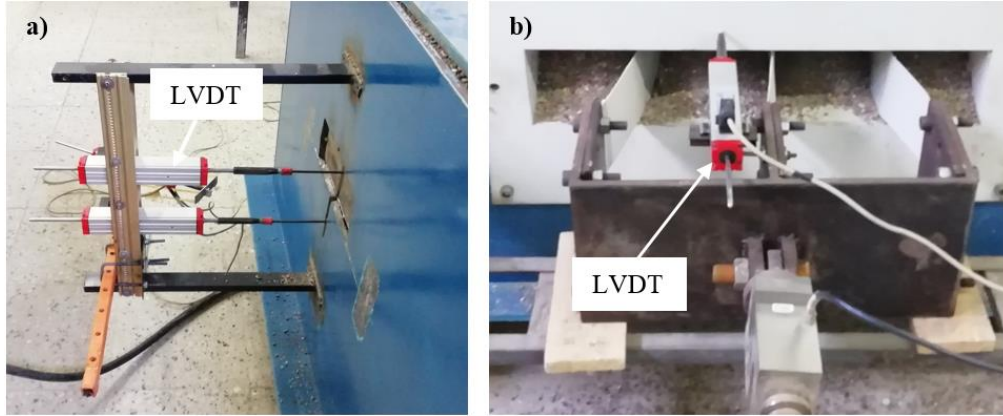
Resim 3.3. Çekme yükünün uygulanabilmesi için deneylerde kullanılan tutma aparatları

3.2. Ölçüm Cihazları

Deneysel çalışma kapsamında çekme deneylerinde uygulanan yükleri ve hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen deformasyonlar ve deplasmanları ölçmek için çeşitli ölçüm cihazları kullanılmıştır. Yükleme ve çekme yüklerini ölçmek için yük hücreleri, hücresel yapı elemanı üzerine uygulanan düşey gerilmeyi ölçmek için minyatür yük hücresi, hücresel yapı elemanı üzerinde meydana gelen birim uzumalar için gerinim pulları, deplasmanları ölçmek için ise deplasman ölçerler (LVDT) ve deney süresince elde edilen ölçüm verilerinin toplanması ve işlenmesi için veri toplama sistemi (data logger) kullanılmıştır. Bu bölümde kullanılan cihazlara ait teknik bilgiler detaylı bir şekilde verilmiştir.

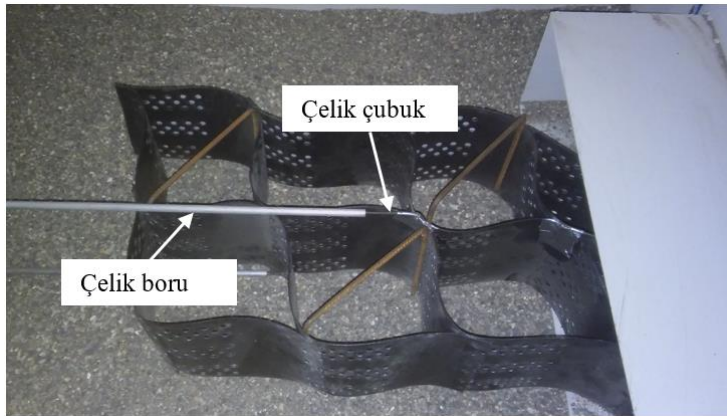
3.2.1. Deplasman ölçerler (LVDT' ler)

Zemin ortamına gömülü olan hücresel yapı elemanları üzerinde çekme yükleri altında meydana gelen deplasmanlar LVDT' ler (Doğrusal Değişkenli Türevsel Dönüştürücüler) yardımı ile ölçülmüştür. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan LVDT' ler maksimum 100 mm'ye kadar ölçüm yapabilmektedir (Resim 3.4). Hücresel yapı elemanı üzerinde boyunca meydana gelen deplasmanların belirlenmesi için kullanılan LVDT' ler çekme deney kutusu arkasına (Resim 3.4a) ve tutma aparatına monteli (Resim 3.4b) bir şekilde yerleştirilmiştir.



Resim 3.4. LVDT' lerin yerleşimi a) çekme deney kutusu arkasına, b) tutma aparatına

Çekme deney kutusu arkasına yerleştirilen LVDT' ler hücresel yapı elemanları üzerinde deplasman ölçümlerinin yapılacağı noktalara çelik çubuklar yardımı ile bağlanmıştır. Deney kutusu içerisinde ve zemin ortamında bulunan çelik çubuklar çekme anında ilave sürtünme direnci oluşturmaması için çelik boru içerisine konularak zemin ortamından izolasyonu sağlanmıştır (Resim 3.5). Ayrıca çelik çubuklar boru içerisine konulmadan önce yağlanarak çelik çubuk ile boru arasında oluşabilecek ilave sürtünme direncinin de önüne geçilmiştir.

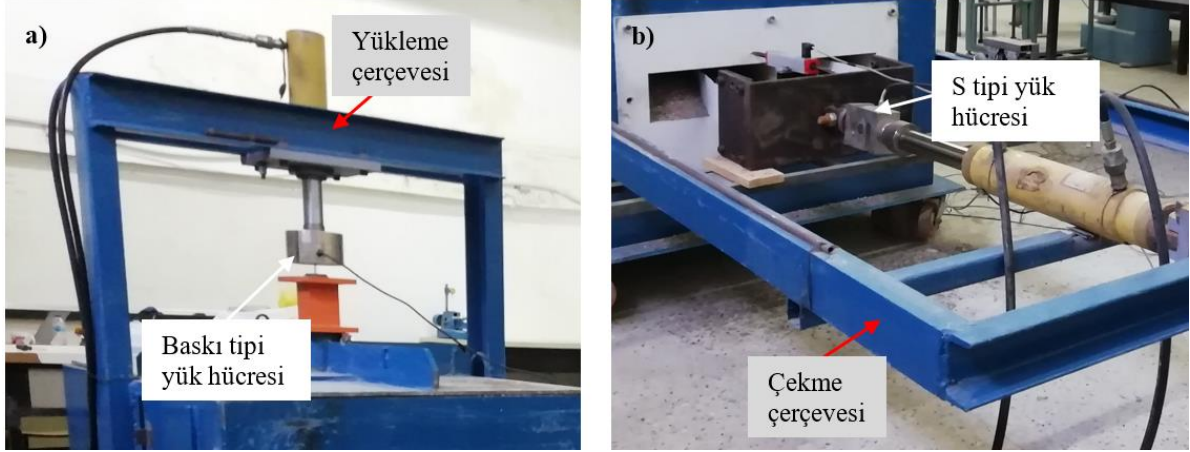


Resim 3.5. Bağlantı elemanı çelik çubuk ve boru

3.2.2. Yük hücresi

Deneysel çalışma kapsamında yükleme ve çekme işlemi süresince uygulanan yükleri ölçebilmek için yük hücreleri kullanılmıştır. Yükleme ve çekme çerçevesinde bulunan ve krikolara bağlı olarak konumlandırılan yük hücreleri Resim 3.6' da verilmiştir. Yükleme için baskı tipi 20 ton kapasiteli yük hücresi, çekme için ise S tipi 5 ton kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücrelerinin kalibrasyonları üretici firma tarafından verilen sertifika

bilgileri ile yapılmış ve doğruluğu laboratuvarında bulunan yükleme tipi test cihazları ile kontrol edilmiştir. Yükleme için kullanılan baskı tipi yük hücresi $\pm\%1$ hassasiyetinde olup minimum 2 kN ‘ a kadar, çekme için kullanılan S tipi yük hücresi ise $\pm\%1$ hassasiyetinde olup minimum 0.5 kN’ a kadar ölçüm yapabilmektedir.



Resim 3.6. Yükleme ve çekme yüklerini ölçmek için kullanılan yük hücreleri a) bası tipi b) S tipi

3.2.3. Minyatür yük hücresi

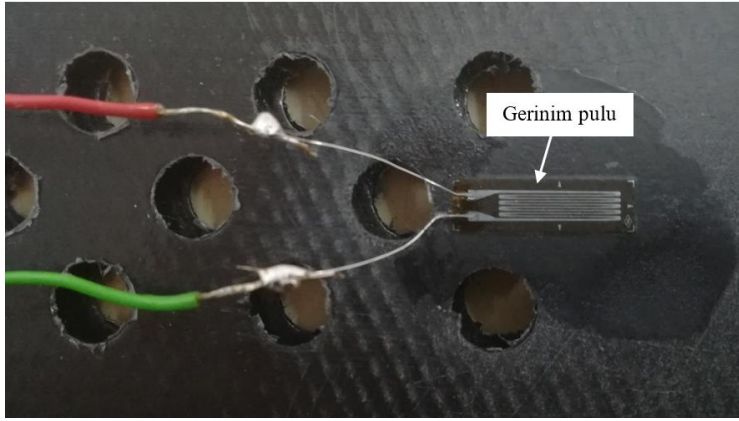
Hücresel yapı elemanı üzerinde üniform yüklemeden kaynaklanan düşey gerilmenin belirlenmesi için minyatür yük hücresi kullanılmıştır (Resim 3.7). Zemin ortamına yerleştirilen minyatür yük hücresi maksimum 2000 kPa gerilmelere kadar ölçüm yapabilmektedir. Minyatür yük hücresinin kalibrasyonları üretici firma tarafından verilen sertifika bilgileri ile laboratuvarında yapılmıştır.



Resim 3.7. Minyatür yük hücresi

3.2.4. Gerinim pulları

Hücresel yapı elemanı üzerinde deney süresince meydana gelen birim uzamalar, gerinim pulları yardımı ile belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan hücresel yapı elemanları, diğer birçok geosentetik (geogrid, geotekstil, geomembran) donatı elemanları gibi yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemeden üretilmiştir. Yapı yüklerinden dolayı çekme yükleri altında HDPE’ den üretilmiş geosentetikler üzerinde büyük miktarlarda uzamalar meydana gelmektedir. Uzama miktarlarının belirlenmesinde ölçüm kapasitesi yüksek olan gerinim pulları kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan gerinim pulları %15-20 arasında oluşan birim uzamaları ölçebilecek kapasitede seçilmiştir. Gerinim pulu 10 mm uzunluğunda olup tek doğrultuda ölçüm yapmaktadır (Resim 3.8). Üretici firma tarafından verilen kalibrasyon bilgileri ile birim uzama ölçümleri yapılmıştır.



Resim 3.8. Hücresel yapı elemanı üzerine yerleştirilen gerinim pulu

3.2.5. Veri toplama sistemi

Zemin ortamında hücresel yapı elemanı üzerine uygulanan düşey gerilmenin, çekme anında oluşan çekme kuvvetinin, deney süresince hücresel yapı elemanı üzerinde boyunca meydana gelen deformasyon ve deplasman değerlerinin ölçüm cihazları ile belirlenip bilgisayar ortamında işlenmesi için veri toplama cihazı kullanılmıştır. Veri toplama cihazı genel amaçlı yarı statik olup ölçüm cihazlarından (yük hücresi, minyatür yük hücresi, LVDT, gerinim pulları) gelen sinyalleri işleyerek dijital veri olarak bilgisayar ortamına aktarmaktadır. Toplam 8 adet sinyal kanalı bulunan veri toplama cihazına ait genel bir görünüş Resim 3.9’da verilmiştir.



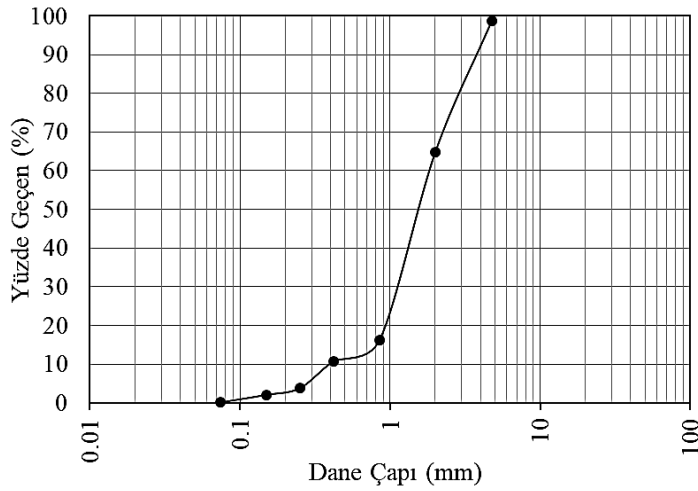
Resim 3.9. Veri toplama sistemi

3.3. Malzeme

Çekme deney düzeneğinde kullanılmak üzere hazırlanan kum malzemesine ait fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla malzeme üzerinde sırasıyla; elek analizi, özgül ağırlık, maksimum ve minimum boşluk oranı tayini ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Kum malzemesi çekme deney kutusuna belli bir sıkılıkta yerleştirilmiş olup tüm deneyler için aynı sıkılık değerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan hücresel yapı elemanına ait fiziksel ve mekanik özellikler hem laboratuvarında yapılan malzeme testi deneyleri ile hem de üretici firmadan alınan malzemeye ait değerler ile karşılaştırmalı olarak belirlenmiştir. Farklı boyutlarda hazırlanan hücresel yapı elemanları üzerinde bir dizi çekme deneyi yapılmıştır. Bu çalışmada hücresel yapı elemanı ile zemin arasındaki sürtünme davranışının tam olarak belirlenmesi için farklı boyutlarda hücresel yapı elemanları hazırlanarak sürtünme davranışına etkisi incelenmiştir.

3.3.1. Zemin

Deneyssel çalışma kapsamında granüler zemin malzemesinin elek analizi sonucu elde edilen dane dağılım eğrisi Şekil 3.4' te verilmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (BZSS) göre kötü derecelendirilmiş kum olarak belirlenen granüler zemin malzemesine ait elek analizi sonuçları Çizelge 3.1' de verilmiştir. Dane dağılım eğrisinden kumun ortalama dane çapı (D_{50}) 1,6 mm; eğrilik katsayısı (C_c) 1,1; ve üniformluk katsayısı (C_u) 3,2 olarak belirlenmiştir (ASTM D2487-16).



Şekil 3.4. Kum malzemesine ait dane dağılım eğrisi

Çizelge 3.1. Elek analizi sonuçları

Dane dağılım parametreleri	Değeri
Kaba kum yüzdesi (%)	35
Orta kum yüzdesi (%)	54
İnce kum yüzdesi (%)	11
Ortalama dane çapı, D_{50} (mm)	1,6
Efektif dane çapı, D_{10} (mm)	0,4
D_{30} (mm)	1,05
D_{60} (mm)	1,9
Üniformluk katsayısı, C_u	3,2
Derecelenme katsayısı, C_c	1,1

Kum malzemesinin özgül ağırlığının belirlenmesi için laboratuvarında üç adet piknometre deneyi yapılmıştır. Piknometre deney sonuçlarına göre kum malzemesinin özgül ağırlığı (G_s) (ASTM D854-14) ortalama olarak 2.64 belirlenmiştir. Özgül ağırlığı belirlenen kum malzemesi üzerinde sıkılık deneyleri yapılarak zeminin en gevşek ve en sıkı durumunu ifade eden maksimum ve minimum boşluk oranları standartlara (ASTM D4254-16) uygun olarak sırayla hesaplanmıştır. Maksimum (e_{maks}) ve minimum (e_{min}) boşluk oranları sırasıyla 0.79 ve 0.43, maksimum (γ_{kmaks}) ve minimum (γ_{kmin}) kuru birim hacim ağırlıkları ise sırasıyla 14.52 ve 18.10 kN/m³ olarak belirlenmiştir.

Çekme deneyleri tek bir sıkılıkta yapılmış olup deneylerde zemin malzemesi orta sıkı durumda hazırlanmıştır. Çizelge 3.2 'de (Das, 2007) zeminin rölatif sıkılığına bağlı olarak sınıflandırma verilmiştir. Zeminin sıkılık durumunu ifade eden rölatif sıkılık değerleri boşluk oranlarına bağlı olarak Eşitlik 3.1 yardımı ile hesaplanmıştır.

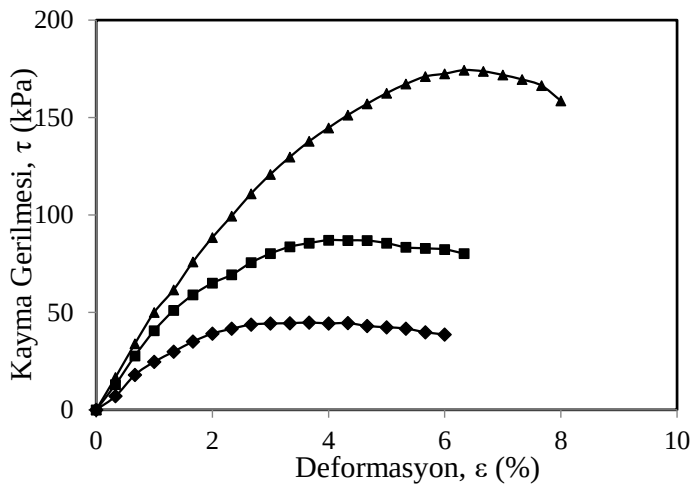
$$D_r = \frac{e_{maks} - e}{e_{maks} - e_{min}} \quad (3.1)$$

Burada e_{maks} maksimum boşluk oranı, e_{min} minimum boşluk oranı ve e ise sıkılık durumu belirlenmek istenen numunenin doğal boşluk oranıdır.

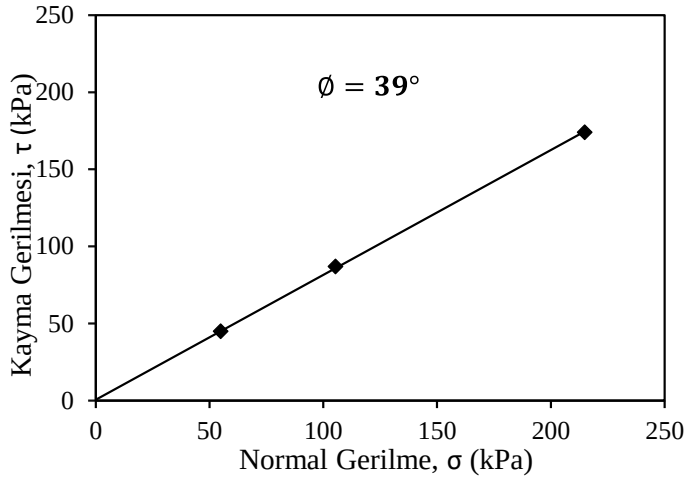
Çizelge 3.2. Rölatif sıkılık değerlerine göre sınıflandırma (Das, 2007)

Rölatif sıkılık, D_r (%)	Sıkılık durumu
0-15	Çok gevşek
15-35	Gevşek
35-65	Orta
65-85	Sıkı
85-100	Çok sıkı

Ortalama %50 rölatif sıkılıkta Çekme deney kutusuna yerleştirilen kum malzemesinin kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Gazi Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Kum malzemesi boyutları 60 mm x 60 mm olan kare kesitli kesme kutusuna rölatif sıkılığı %50 olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kum malzemesi istenilen sıkılık için belirlenen ağırlıklarda kesme kutusunda 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa normal gerilme altında yatay yönde kuvvet uygulayarak kesme işlemine tabi tutulmuştur. Kesme kutusu deneylerinden elde edilen gerilme-deformasyon eğrileri ve kırılma zarfı sırasıyla Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 'da verilmiştir. Kesme kutusu deney sonuçlarına göre kum malzemesinin kayma mukavemeti açısı $\phi=39^\circ$ ve kohezyonu $c=0$ kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.5. Kum malzemesine ait kesme kutusu deney sonucu



Şekil 3.6. Kum malzemesine ait kayma mukavemeti açısı grafiği

3.3.2. Hücresel yapı elemanı

Hücresel yapı elemanları polimerik şeritlerin birbirlerine kaynaklanması ile oluşturulan üç boyutlu ve gözenekli bir yapı malzemesidir (Resim 3.10). Üç boyutlu yapısı nedeniyle zemini içine hapsederek ve sararak kompozit bir yapı oluşturmaktadır. Deneysel çalışma kapsamında yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemeden üretilen delikli ve polimerik alaşım malzemeden (NPA) üretilen deliksiz olmak üzere iki tür hücresel yapı elemanı kullanılmıştır.

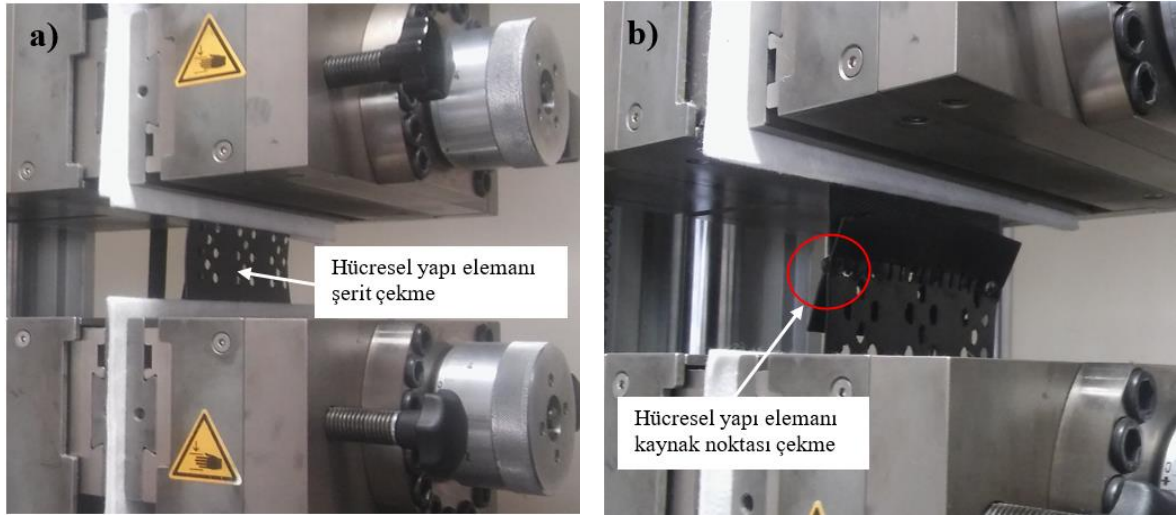


Resim 3.10. Hücresel yapı elemanı (geocell)

Bu çalışma kapsamında kullanılan ve iki farklı elastisite modülüne sahip hücresel yapı elemanlarına ait fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.3 'te verilmektedir. Hücresel yapı elemanlarına ait mekanik özellikleri, Cancelli ve diğ. (1993) tarafından önerilen şekilde laboratuvarda hücresel yapı elemanı şerit (Resim 3.11a) ve kaynak noktası (Resim 3.11b) çekme deneyleri ile belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. Hücresel yapı elemanının fiziksel ve mekanik özellikleri

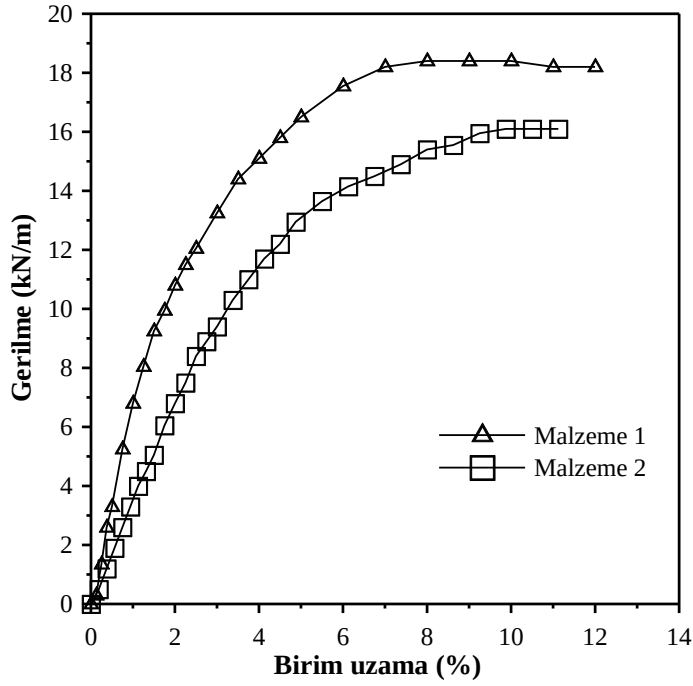
Hücresel yapı elemanı	HDPE (Malzeme 1)	NPA (Malzeme 2)
Hücre genişliği (b_i)	130 mm	130 mm
Hücre uzunluğu (l_i)	170 mm	170 mm
Hücre yüksekliği (h)	100, 150 mm	100 mm
Yoğunluk	0.965 g/cm ³	0.965 g/cm ³
Kalınlık	1.5 mm	1.0 mm
Çekme dayanımı ($\varepsilon=\%8$)	>18 kN/m	>16 kN/m
Kaynak dayanımı	>18 kN/m	>13 kN/m



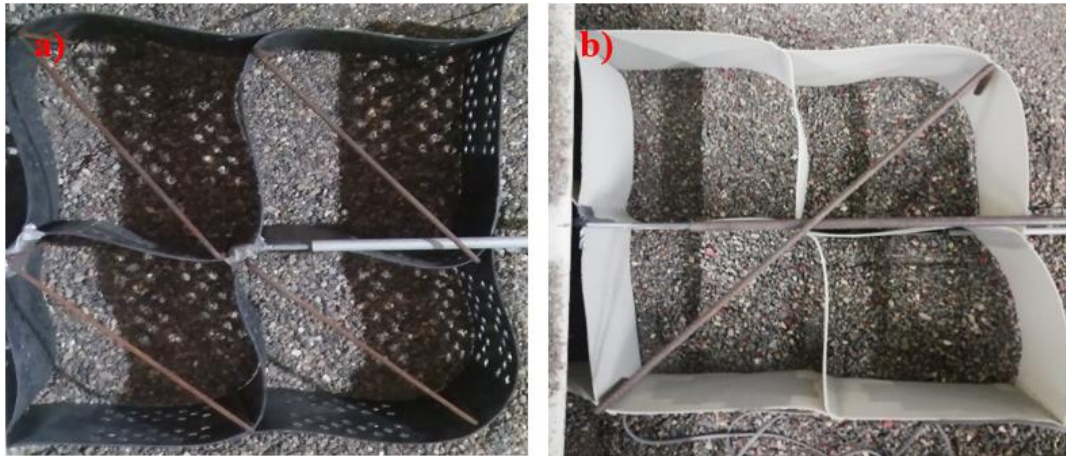
Resim 3.11. Hücresel yapı elemanları çekme dayanımı deneyleri a) şerit çekme, b) kaynak noktası çekme

Hücresel yapı elemanları üzerinde yapılan şerit ve kaynak noktası çekme deneyleri sonrası çekme ve kaynak noktası dayanımları belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.7 'de verilmiştir. Hücresel yapı elemanlarına ait malzeme gerilme-birim uzama eğrileri verilmiştir (Şekil 3.7). HDPE hücresel yapı elemanı için belirlenen şerit ve kaynak noktası çekme dayanımlarının eşit olduğu fakat NPA hücresel yapı elemanının çekme ve kaynak dayanımlarının farklı olduğu belirlenmiştir. HDPE malzemesinden üretilen hücresel yapı elemanının çekme ve kaynak dayanımı eşit olarak 18 kN/m iken, NPA malzemesinden üretilen hücresel yapı elemanının çekme dayanımı 16 kN/m ve kaynak dayanımı 13 kN/m olarak belirlenmiştir. Ayrıca hücresel yapı elemanlarına ait fiziksel ve mekanik özellikler üretici firma tarafından verilen değerlerle karşılaştırılmış ve bu değerlerin birbirleriyle örtüştüğü görülmüştür.

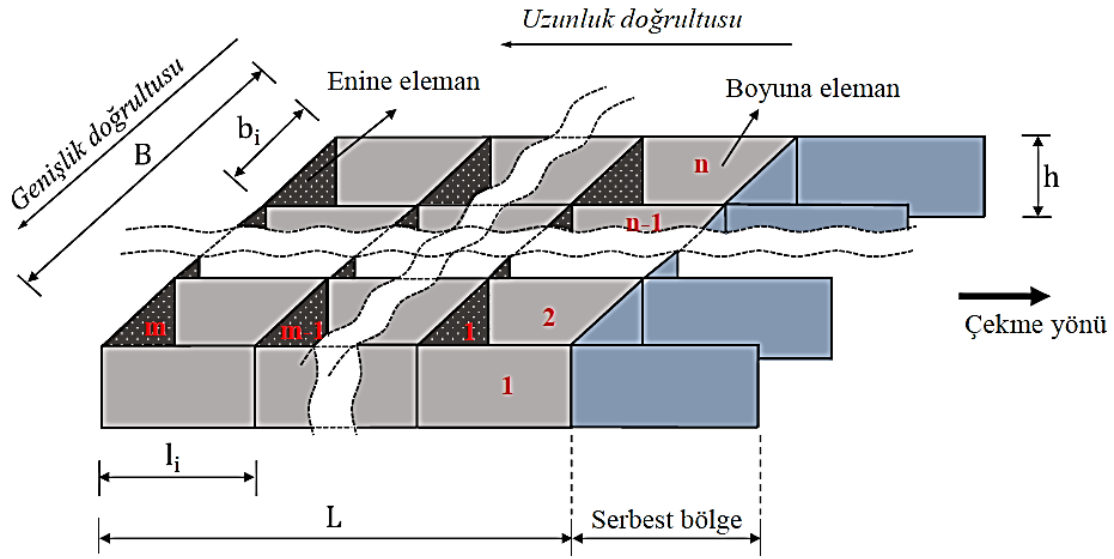
Farklı türde malzemeden üretilen hücresel yapı malzemelerinin hücre boyutları (uzunluk ve genişlik) eşit olup sadece Malzeme 2 için hücre yüksekliği 150 mm olan eleman kullanılmamıştır (Resim 3.12). Ayrıca Şekil 3.8’ de hücresel yapı elemanına ait şematik gösterim verilmektedir. Hücresel yapı elemanları boyutlarının etkisinin incelenmesi amacıyla farklı konfigürasyonlarda ve boyutlarda hazırlanmış ve hücreler dikdörtgen olarak çekmeye maruz kalacak şekilde çekme deney düzeneğine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Hücresel yapı elemanlarına ait gerilme-birim uzama grafikleri



Resim 3.12. Hücresel yapı elemanları; a) Malzeme 1 (delikli), b) Malzeme 2 (deliksiz)



Şekil 3.8. Hücresel yapı elemanına ait şematik gösterim

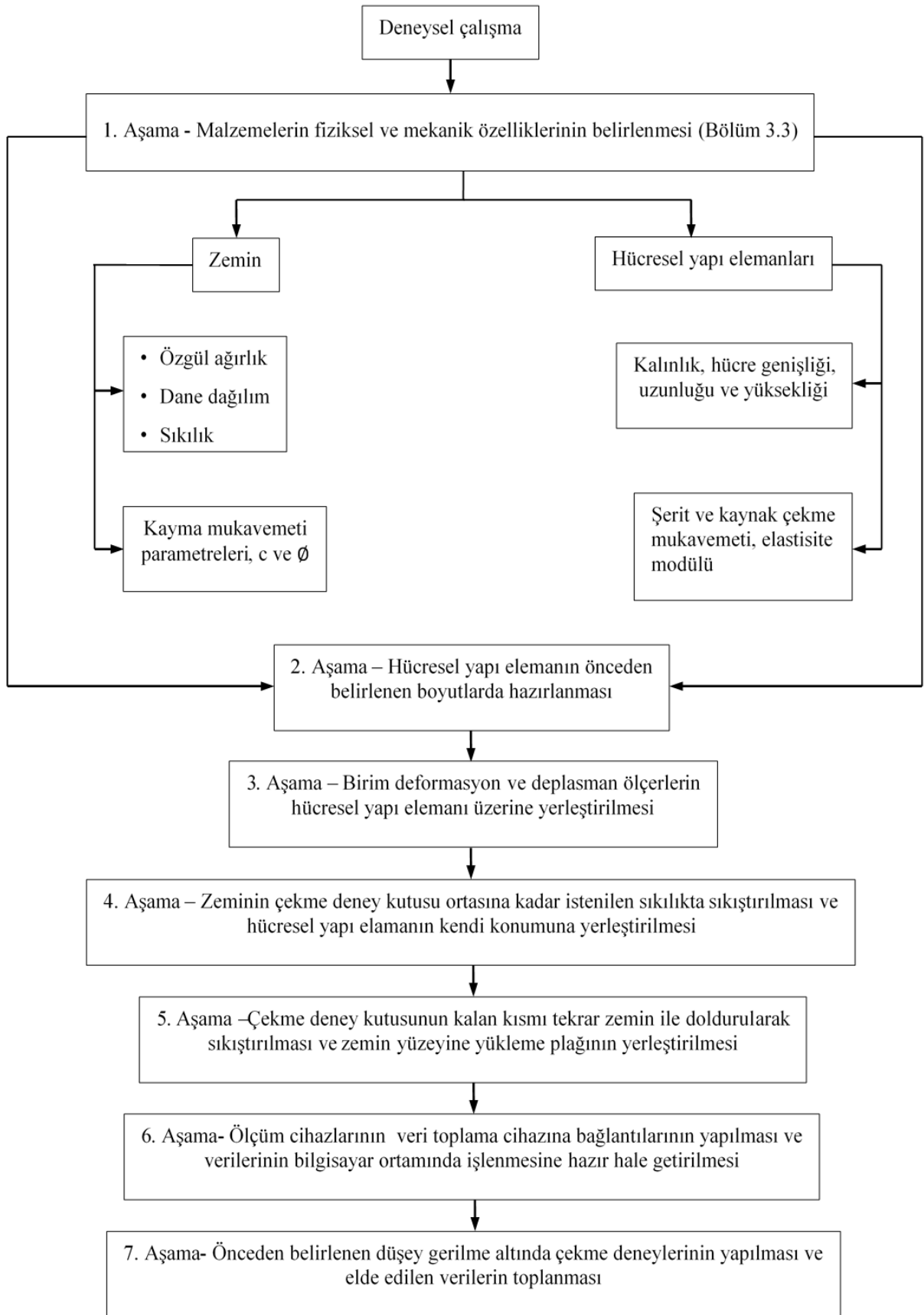
3.4. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışma kapsamında hücresel yapı elemanları çekme yükleri altında kohezyonsuz zemin ortamındaki sürtünme davranışı laboratuvarında yapılan çekme deneyleri ile araştırılmıştır. Hücresel yapı elemanları çekme deney düzeneğine boyutları ve yerleşim konfigürasyonları önceden belirlenmiş şekilde deney kutusuna yerleştirilmiş ve hücresel yapı elemanların boyutlarının sürtünme davranışına etkisi incelenmiştir. Deneylerde kullanılan zemin malzemesi deney kutusuna istenilen sıklıkta tokmak ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi yedi eşit parça halinde yapılmış olup her eşit parça için önceden belirlenmiş olan 125 tokmak vuruş sayısı ile yaklaşık olarak %50 rölatif sıklık değeri elde edilmiştir. Kohezyonsuz zemin ortamında farklı boyutlarda (uzunluk, genişlik ve yükseklik) ve konfigürasyonlarda hazırlanan hücresel yapı elemanları üzerinde yapılan deneysel çalışma aşamaları aşağıda verilen sıralamaya göre ve Şekil 3.9’ da verilen akış diyagramında özetlendiği gibi uygulanmıştır.

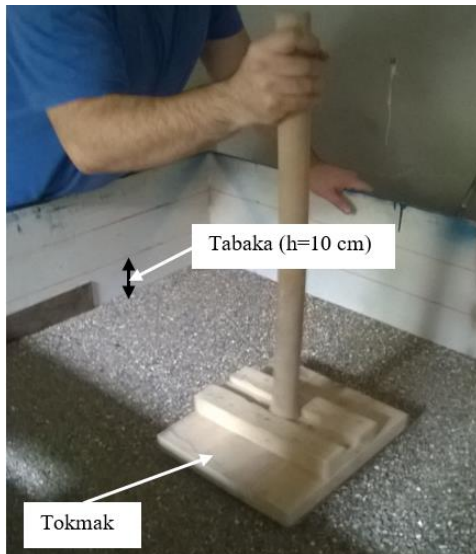
- 1) Zemin ve hücresel yapı malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri standartlara uygun şekilde laboratuvarında yapılan deneyler ile belirlenmiştir. Zemin malzemesinin dane dağılımının belirlenmesi için elek analizi, özgül ağırlığının belirlenmesi için piknometre, maksimum ve minimum boşluk oranlarının belirlenmesi için sıklık deneyleri, kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi için ise kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Hücresel yapı elemanlarının ise çekme ve kaynak dayanımlarının belirlenmesi için malzeme çekme deneyi yapılmıştır.

- 2) Çekme deney kutusu iç kısmı, yüksekliği ($H=70$ cm) boyunca sıkıştırma işlemi öncesi 10'ar cm' lik tabakalar halinde yedi eşit parçaya bölünmüştür (Resim 3.13). Daha sonra kum malzemesi hücresel yapı elemanının konumuna (kutu ortası) kadar önceden belirlenmiş ve sıklığı %50 olacak şekilde el yapımı tokmak (Resim 3.13) ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir.
- 3) Kutu ortasına kadar yapılan sıkıştırma işlemi bittikten sonra hücresel yapı elemanı üzerindeki gerinim pulları ve LVDT çubukları ile kendi konumuna yerleştirilmiştir (Resim 3.14). Daha sonra kutunun kalan kısmı yine rölatif sıklık %50 olacak şekilde zeminle doldurularak sıkıştırılmıştır.
- 4) Kutu doldurma ve sıkıştırma işlemi bittikten sonra kutu önyüzünden 20 cm uzaklıktan hücresel yapı elemanı tutma aparatına bağlanmıştır. Tüm bağlantı işlemleri tamamlandıktan sonra düşey olarak üniform yükleme yapmak için kullanılan yükleme plağı zemin yüzeyine yerleştirmiştir.
- 5) Deney sırasında ölçüm yapacak olan cihazların (yük hücreleri, LVDT' ler, gerinim pulları) veri toplama cihazına bağlantıları yapılarak deney verilerinin bilgisayar ortamında işlenmesine hazır hale getirilmiştir (Resim 3.15).
- 6) Daha sonra manuel hidrolik kriko yardımıyla istenilen yük altında çekme işlemi yapılmış elde edilen veriler toplanmıştır.

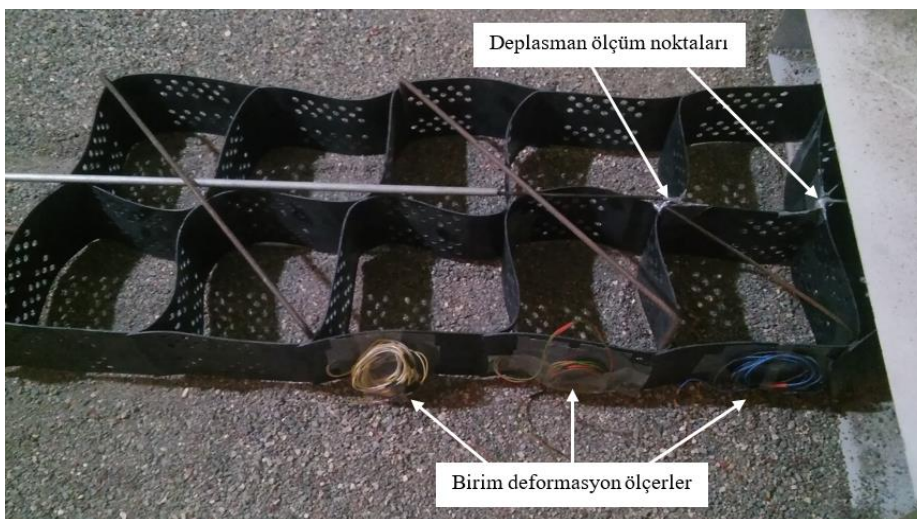
Çekme anında eleman boyunca oluşacak olan deplasmanları belirlemek için kullanılan deplasman ölçerler (LVDT) kutu önünde tutma aparatına ve kutu arkasında açılan açıklık bölgesine yerleştirilmiştir. Kutu içerisinden hücresel yapı elemanlarının düğüm noktalarına bağlanan ve kutu arkasına doğru uzatılan çelik çubuklar (çapı 4 mm) deplasman ölçerlere bağlanarak deney sırasında düğüm noktalarında oluşacak deplasmanlar belirlenmiştir. Burada düşey yük altında çelik çubuklar üzerinde de sürtünme direncinin oluşmaması için çelik çubuklar çapı daha büyük ve 8 mm olan çelik borular içerisinden deplasman ölçerlere bağlanmıştır. Çelik boru içerisinde de herhangi bir ilave sürtünme direnci oluşmaması için de ayrıca boru içleri her deney öncesi yağlanmıştır.



Şekil 3.9. Deneysel çalışma akış diyagramı



Resim 3.13. Sıkıştırma işleminde kullanılan tokmak ve tabaka sınırları



Resim 3.14. Kutu ortasına yerleştirilen hücresel yapı elemanı



Resim 3.15. Deney düzeneği ve veri toplama sisteminin genel bir görünüşü

3.4.1. Zeminin sıkıştırılma işlemi

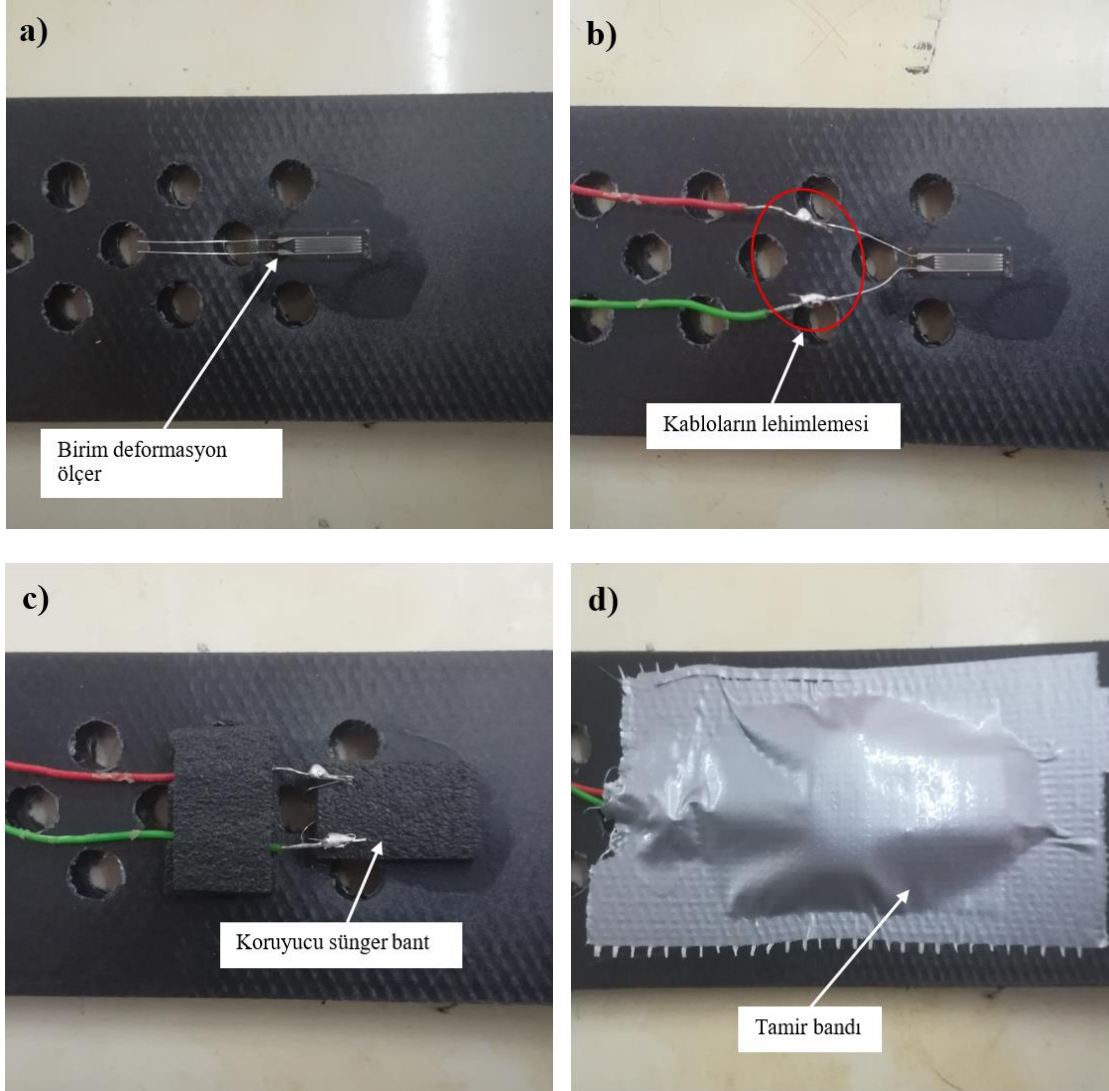
Deneysel çalışma kapsamında yapılacak olan tüm deneylerde zemin çekme deney kutusuna eşit rölatif sıklık değerlerinde yerleştirilmiştir. Çekme deneylerinin aynı koşullarda yapılması için ortalama %50 rölatif sıklığında zemin malzemesi çekme deney kutusuna yedi eşit tabaka halinde tokmakla sıkıştırılmıştır (Resim 3.13). Kalınlığı 100 mm olan her bir eşit tabakaya 245 kg ağırlığında zemin malzemesi kovalarla yerleştirilmiştir. Önceden belirlenen tokmak vuruş sayısı (150 adet) ile zemin malzemesi istenilen sıklık değerinde sıkıştırılmıştır. Her tabaka sıkıştırıldıktan sonra sıklık kontrolü yapılarak %50 rölatif sıklık için deney kutusuna yerleştirilen kohezyonsuz zemin malzemesinin birim hacim ağırlığı 16.11 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Sıkıştırma işlemi bittikten sonra veya yükleme plağının zemin yüzeyine yerleştirmeden önce zemin yüzeyi yüklemenin eşit bir şekilde tüm yüzeye yayılması için tesviye edilmiştir.

3.4.2. Gerinim pullarının hücresel yapı elemanı üzerine yerleştirilmesi

Deneysel çalışma kapsamında hücresel yapı elemanı üzerinde çekme anında meydana gelecek deformasyonların belirlenmesi için gerinim pulları kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan gerinim pulları üretici firma tarafından önerilen yöntemlerle hücresel yapı elemanı üzerine yerleştirilmiştir. Üretici firma tarafından tavsiye edilen yüzey temizleyicileri ve yapıştırıcıları kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan birim uzamaların hücresel yapı elemanları üzerine yerleştirilmesi aşağıda özetlenen işlem sırasında göre yapılmıştır.

- 1) Hücresel yapı elemanı üzerinde hücre duvarının tam ortasına gelecek şekilde gerinim pullarının yerleştirileceği bölge zımpara kâğıdı ile iyice zımparalanmış ve yapıştırma işleminin sağlıklı yapılabilmesi için aseton ile iyice temizlenmiştir (Resim 3.16a).
- 2) Gerinim pulları üretici firma tarafından önerilen özel yapıştırıcı kullanılarak temizlenen bölgeye yapıştırılmıştır (Resim 3.16a).
- 3) Gerinim pullarını elektronik kablolarla lehimleyerek deformasyon ölçümlerinin bilgisayar ortamında yapılabilmesi için veri toplama cihazına bağlanmıştır (Resim 3.16b).
- 4) Gerinim pullarının çekme deneyi süresince zemin ortamında zarar görmemesi için üzerleri süngerli bantlarla kaplanarak (Resim 3.16c) koruma altına alınmıştır. Daha sonra

çekme deneyi süresince gerinim pulları kablolarının lehim noktalarından kopmamaları için tamir bantları ile hücresel yapı elemanına bantlanmıştır (Resim 3.16d).



Resim 3.16. Gerinim pullarının (strain gauge) hücresel yapı elemanı üzerine yerleştirilmesi a) zımparalanmış ve temizlenmiş bölgeye gerinim pullarının yapıştırılması, b) elektronik kabloların lehimlemesi, c) gerinim pullarının koruyucu sünger bantla kaplanması, d) tamir bandı ile kaplanması

3.4.3. Deney programı

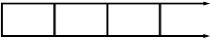
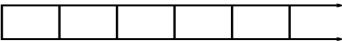
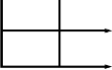
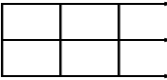
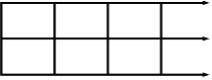
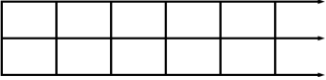
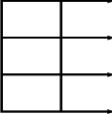
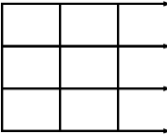
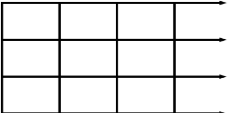
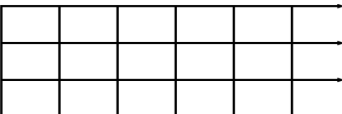
Deneyisel çalışma kapsamında zemin ile hücresel yapı elemanı arasındaki sürtünme davranışı, farklı boyutlarda ve konfigürasyonlarda hazırlanan ve rijitlikleri farklı olan iki tür hücresel yapı elemanı kullanılarak incelenmiştir. Deney programı Çizelge 3.4'te deney numunelerinin boyutları ve uygulanan düşey gerilme, Çizelge 3.5'te ise deneyel çalışma kapsamında hazırlanan numune konfigürasyonlarının şematik gösterimi ile verilmiştir.

Çizelge 3.4. Deney programı

Test No	Konfigürasyon (m-1)x(n-1)	Yükseklik, h, (mm)	Genişlik, B, (mm)	Uzunluk, L, (mm)	Genişlik boyunca hücre sayısı (n-1)	Uzunluk boyunca hücre sayısı (m)	Toplam hücre sayısı (S)	Düşey Gerilme (kPa)
1	1x1	100	130	170	1	1	1	10.12
2	1x1	100	130	170	1	1	1	18.10
3	1x1	100	130	170	1	1	1	31.40
4	1x2	100	130	340	1	2	2	10.12
5	1x2	100	130	340	1	2	2	18.10
6	1x2	100	130	340	1	2	2	31.40
7	1x3	100	130	510	1	3	3	10.12
8	1x5	100	130	850	1	5	5	10.12
9	2x1	100	260	170	2	1	2	10.12
10	2x1	100	260	170	2	1	2	18.10
11	2x1	100	260	170	2	1	2	31.40
12	2x2	100	260	340	2	2	4	10.12
13	2x2	100	260	340	2	2	4	18.10
14	2x2	100	260	340	2	2	4	31.40
15	2x3	100	260	510	2	3	6	10.12
16	2x5	100	260	850	2	5	10	10.12
17	3x1	100	390	170	3	1	3	10.12
18	3x1	100	390	170	3	1	3	18.10
19	3x1	100	390	170	3	1	3	31.40
20	3x2	100	390	340	3	2	6	10.12
21	3x2	100	390	340	3	2	6	18.10
22	3x2	100	390	340	3	2	6	31.40
23	3x3	100	390	510	3	3	9	10.12
24	3x5	100	390	850	3	5	15	10.12
25	1x1	150	130	170	1	1	1	10.12
26	1x1	150	130	170	1	1	1	18.10
27	1x1	150	130	170	1	1	1	31.40
28	1x2	150	130	340	1	2	2	10.12
29	1x2	150	130	340	1	2	2	18.10
30	1x2	150	130	340	1	2	2	31.40
31	1x3	150	130	510	1	3	3	10.12
32	1x5	150	130	850	1	5	5	10.12
33	2x1	150	260	170	2	1	2	10.12
34	2x1	150	260	170	2	1	2	18.10
35	2x1	150	260	170	2	1	2	31.40
36	2x2	150	260	340	2	2	4	10.12
37	2x2	150	260	340	2	2	4	18.10
38	2x2	150	260	340	2	2	4	31.40
39	2x3	150	260	510	2	3	6	10.12
40	2x3	150	260	510	2	3	6	18.10
41	2x5	150	260	850	2	5	10	10.12
42	3x1	150	390	170	3	1	3	10.12
43	3x1	150	390	170	3	1	3	18.10
44	3x1	150	390	170	3	1	3	31.40
45	3x2	150	390	340	3	2	6	10.12
46	3x2	150	390	340	3	2	6	18.10
47	3x2	150	390	340	3	2	6	31.40
48	3x3	150	390	510	3	3	9	10.12
49	3x3	150	390	510	3	3	9	18.10
50	3x5	150	390	850	3	5	15	10.12
51*	1x2	100	130	340	1	2	2	10.12
52*	1x2	100	130	340	1	2	2	18.10
53*	2x2	100	260	340	2	2	4	10.12
54*	2x2	100	260	340	2	2	4	18.10
55*	2x3	100	260	510	2	3	6	10.12

*Malzeme 2

Çizelge 3.5. Deneysel çalışma parametreleri ve numune konfigürasyonları

Hücresel yapı elemanı konfigürasyonları	Deney parametreleri
 (1x1)	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}, 18.10 \text{ kPa ve } 31.40 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=130 \text{ mm}, L=170 \text{ mm}$
 (1x2)*	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}, 18.10 \text{ kPa ve } 31.40 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=130 \text{ mm}, L=340 \text{ mm}$
 (1x3)	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=130 \text{ mm}, L=510 \text{ mm}$
 (1x5)	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=130 \text{ mm}, L=850 \text{ mm}$
 (2x1)	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}, 18.10 \text{ kPa ve } 31.40 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=260 \text{ mm}, L=170 \text{ mm}$
 (2x2)*	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}, 18.10 \text{ kPa ve } 31.40 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=260 \text{ mm}, L=340 \text{ mm}$
 (2x3)*	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}; 18.10 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=260 \text{ mm}, L=510 \text{ mm}$
 (2x5)	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=260 \text{ mm}, L=850 \text{ mm}$
 (3x1)	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}, 18.10 \text{ kPa ve } 31.40 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=390 \text{ mm}, L=170 \text{ mm}$
 (3x2)	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}, 18.10 \text{ kPa ve } 31.40 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=390 \text{ mm}, L=340 \text{ mm}$
 (3x3)	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}; 18.10 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=390 \text{ mm}, L=510 \text{ mm}$
 (3x5)	$\sigma_v = 10.12 \text{ kPa};$ $h=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}; B=390 \text{ mm}, L=850 \text{ mm}$

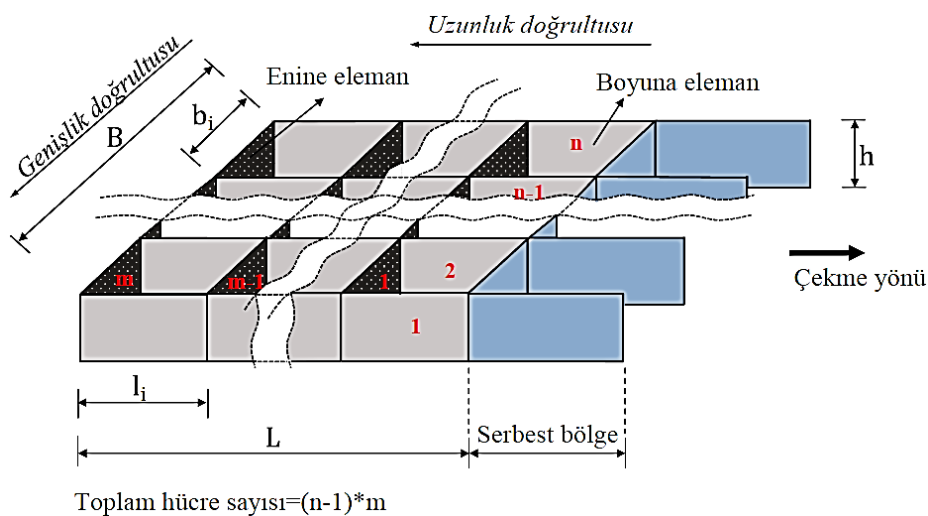
*Malzeme 2: Konfigürasyon 1x2 için $\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}; 18.10 \text{ kPa};$ Konfigürasyon 2x2 için $\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}, 18.10 \text{ kPa};$ Konfigürasyon 2x3 için $\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}$

Çizelge 3.5'te görüldüğü gibi her iki hücre yüksekliğinde ($h=100 \text{ mm}$ ve 150 mm) hücresel yapı elemanları üzerinde 1x1, 1x2, 1x3, 1x5, 2x1, 2x2, 2x3, 2x5, 3x1, 3x2, 3x3 ve 3x5 olmak üzere 12 adet farklı konfigürasyonlarda çekme deney işlemi yapılmıştır. Konfigürasyonları 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 olan deney numuneleri üzerinde $\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}, 18.10 \text{ kPa}$ ve 31.40 kPa düşey gerilme altında çekme deneyleri yapılmıştır. Fakat hücresel yapı elemanları üzerlerine uygulanan düşey gerilmenin artması ($\sigma_v = 18.10 \text{ kPa}$) nedeniyle,

hücresel yapı elemanlarının zeminler içerisinde ortaya koyacağı çekme kapasitesi malzeme çekme dayanımına ulaşmakta olup malzemeler üzerinde oluşan kopma ve akmalar meydana gelmektedir. Dolayısıyla hücre yüksekliği 100 mm olan hücresel yapı elemanlarında; konfigürasyonları 1x3, 1x5, 2x3, 2x5, 3x3 ve 3x5 olan, hücre yüksekliği 150 mm olan hücresel yapı elemanlarda; konfigürasyonları 1x3, 1x5, 2x5 ve 3x5 olan deney numunelerinde çekme deneyleri yapılamamıştır. Bu duruma benzer olarak düşey gerilme $\sigma_v = 31.40$ kPa için konfigürasyonları 1x3, 1x5, 2x3, 2x5, 3x3 ve 3x5 olan deney numunelerinde çekme deneyleri de yapılamamıştır. Ayrıca NPA malzemesinden üretilmiş hücresel yapı elemanları (Malzeme 2) üzerinde de sadece $\sigma_v = 10.12$ kPa ve 18.10 kPa düşey gerilme altında konfigürasyonları 1x2 ve 2x2, $\sigma_v = 10.12$ kPa düşey gerilme altında ise konfigürasyonu 2x3 olan numuneler üzerinde çekme deneyleri yapılabilmektedir.

4. HÜCRESEL YAPI ELEMANLARININ ÇEKME KUVVETLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI

Deneysel çalışma kapsamında zemin ile hücresel yapı elemanı arasındaki sürtünme davranışı 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilmeler altında incelenmiştir. Bu çalışmada boyutları (boy, genişlik ve yükseklik) ve yerleşim konfigürasyonları farklı olan (Çizelge 3.4 ve 3.5) ve önceden hazırlanmış hücresel yapı elemanları kullanılmıştır. Deneysel çalışma ağırlıklı olarak hücresel yapı elemanları ile zeminler arasındaki sürtünme davranışının belirlenmesi amacıyla laboratuvarında yapılan çekme deneylerini kapsamaktadır. Yapılan çekme deneyleri sonucunda deney numunelerinin çekme kapasiteleri, numuneler üzerinde oluşan birim uzamalar ve deplasmanlar belirlenmiş ve pratik amaçlar doğrultusunda kullanılmak üzere çekme kuvveti ve hücresel yapı elemanlarının boyutları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan toplam 55 adet hücresel yapı elemanlarına ait çekme kapasiteleri; hücresel yapı elemanları boyutlarına, eleman yerleşim konfigürasyonlarına ve rijitliklerine bağlı olarak Çizelge 4.1’ de verilmiştir. Bu numunelere ait çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-deplasman eğrileri EK-1’ de sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında yapılan çekme deneyleri sonucunda, hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri; deney elemanı boyutlarına, uygulanan düşey gerilmeye, yerleşim konfigürasyonuna ve rijitliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Özellikle hücresel yapı elemanı eleman boyutları yüksek olan elemanların çekme kapasitelerinin yüksek olduğu görülmüştür. Bu çalışma kapsamında çekme deneylerinde kullanılan hücresel yapı elemanı “n” adet boyuna ve “m” adet enine elemandan oluşmaktadır (Şekil 4.1).



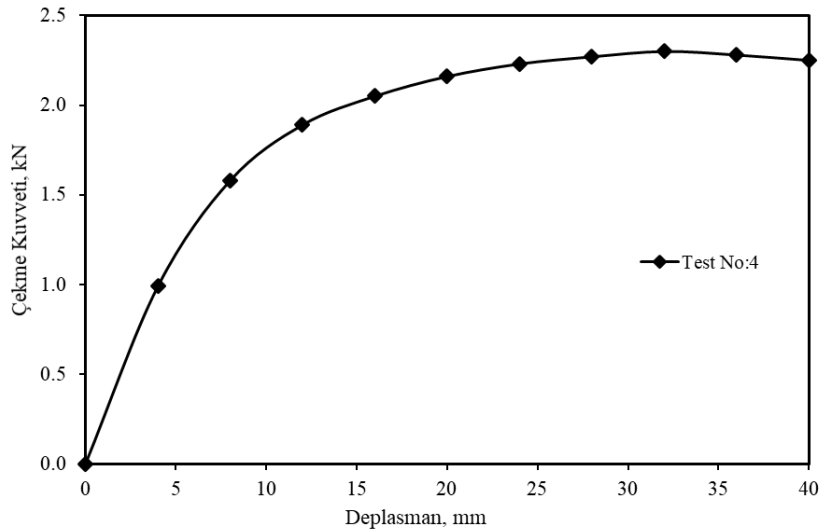
Çizelge 4.1. Deney programı ve numunelerin çekme kapasiteleri

Test No	Konfigürasyon (n-1)x(m)	Yükseklik, h, (mm)	Genişlik, B, (mm)	Boy, L, (mm)	Genişlik boyunca hücre sayısı (n-1)	Uzunluk boyunca hücre sayısı (m)	Toplam hücre sayısı (S)	Düşey Gerilme (kPa)	Çekme kuvveti (kN)
1	1x1	100	130	170	1	1	1	10.12	1.04
2	1x1	100	130	170	1	1	1	18.10	1.64
3	1x1	100	130	170	1	1	1	31.40	2.37
4	1x2	100	130	340	1	2	2	10.12	2.30
5	1x2	100	130	340	1	2	2	18.10	3.40
6	1x2	100	130	340	1	2	2	31.40	4.20
7	1x3	100	130	510	1	3	3	10.12	4.00
8	1x5	100	130	850	1	5	5	10.12	4.10
9	2x1	100	260	170	2	1	2	10.12	1.49
10	2x1	100	260	170	2	1	2	18.10	2.30
11	2x1	100	260	170	2	1	2	31.40	3.40
12	2x2	100	260	340	2	2	4	10.12	3.25
13	2x2	100	260	340	2	2	4	18.10	4.60
14	2x2	100	260	340	2	2	4	31.40	6.00
15	2x3	100	260	510	2	3	6	10.12	5.50
16	2x5	100	260	850	2	5	10	10.12	6.00
17	3x1	100	390	170	3	1	3	10.12	1.77
18	3x1	100	390	170	3	1	3	18.10	2.41
19	3x1	100	390	170	3	1	3	31.40	4.10
20	3x2	100	390	340	3	2	6	10.12	4.32
21	3x2	100	390	340	3	2	6	18.10	5.90
22	3x2	100	390	340	3	2	6	31.40	7.90
23	3x3	100	390	510	3	3	9	10.12	6.00
24	3x5	100	390	850	3	5	15	10.12	7.60
25	1x1	150	130	170	1	1	1	10.12	1.60
26	1x1	150	130	170	1	1	1	18.10	2.40
27	1x1	150	130	170	1	1	1	31.40	3.45
28	1x2	150	130	340	1	2	2	10.12	3.20
29	1x2	150	130	340	1	2	2	18.10	4.60
30	1x2	150	130	340	1	2	2	31.40	6.00
31	1x3	150	130	510	1	3	3	10.12	5.80
32	1x5	150	130	850	1	5	5	10.12	6.00
33	2x1	150	260	170	2	1	2	10.12	2.10
34	2x1	150	260	170	2	1	2	18.10	3.20
35	2x1	150	260	170	2	1	2	31.40	4.86
36	2x2	150	260	340	2	2	4	10.12	4.25
37	2x2	150	260	340	2	2	4	18.10	6.00
38	2x2	150	260	340	2	2	4	31.40	8.40
39	2x3	150	260	510	2	3	6	10.12	8.15
40	2x3	150	260	510	2	3	6	18.10	9.00
41	2x5	150	260	850	2	5	10	10.12	9.00
42	3x1	150	390	170	3	1	3	10.12	2.32
43	3x1	150	390	170	3	1	3	18.10	3.60
44	3x1	150	390	170	3	1	3	31.40	5.76
45	3x2	150	390	340	3	2	6	10.12	6.00
46	3x2	150	390	340	3	2	6	18.10	7.80
47	3x2	150	390	340	3	2	6	31.40	10.40
48	3x3	150	390	510	3	3	9	10.12	9.50
49	3x3	150	390	510	3	3	9	18.10	11.10
50	3x5	150	390	850	3	5	15	10.12	10.00
51*	1x2	100	130	340	1	2	2	10.12	2.50
52*	1x2	100	130	340	1	2	2	18.10	4.25
53*	2x2	100	260	340	2	2	4	10.12	3.40
54*	2x2	100	260	340	2	2	4	18.10	6.00
55*	2x3	100	260	510	2	3	6	10.12	4.50

*Malzeme 2

4.1. Çekme Kuvveti İle Deplasman İlişkisi

Çekme yükleri altında bulunan geosentetik donatı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman davranışı; zemin türüne, uygulanan düşey gerilme seviyesine, boyuna ve enine elemanlarının rijitliklerine, geosentetik donatı elemanının geometrisine ve deney koşullarına bağlı olarak farklılık göstermektedir (Palmeira ve Milligan 1989; Wilson-Fahmy ve diğ. 1994; Işık ve Gürbüz, 2020). Geosentetik donatı elemanının çekme kapasitesi, çekme deneyinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ilişkisinden belirlenmektedir. Çekme kuvveti-deplasman ilişkisinde maksimum çekme kuvveti çekme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.2’ de bir deney numunesine ait tipik çekme kuvveti-deplasman ilişkisi verilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan toplam 55 adet deney numunesine ait çekme kuvveti-deplasman ilişkileri EK-1’ de sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında, hücresel yapı elemanlarının kohezyonsuz zeminler içerisindeki çekme kapasiteleri 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir (“Kohezyonsuz Zeminler İçerisindeki Hücresel Yapı Elemanlarının Çekme Kapasitelerinin Belirlenmesine Yönelik Laboratuvar Deney Düzenegi” adlı bölümde Çizelge 3.4 ve 3.5’ e bakınız).



Şekil 4.2. Hücresel yapı elemanların kohezyonsuz zeminler içerisindeki tipik çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

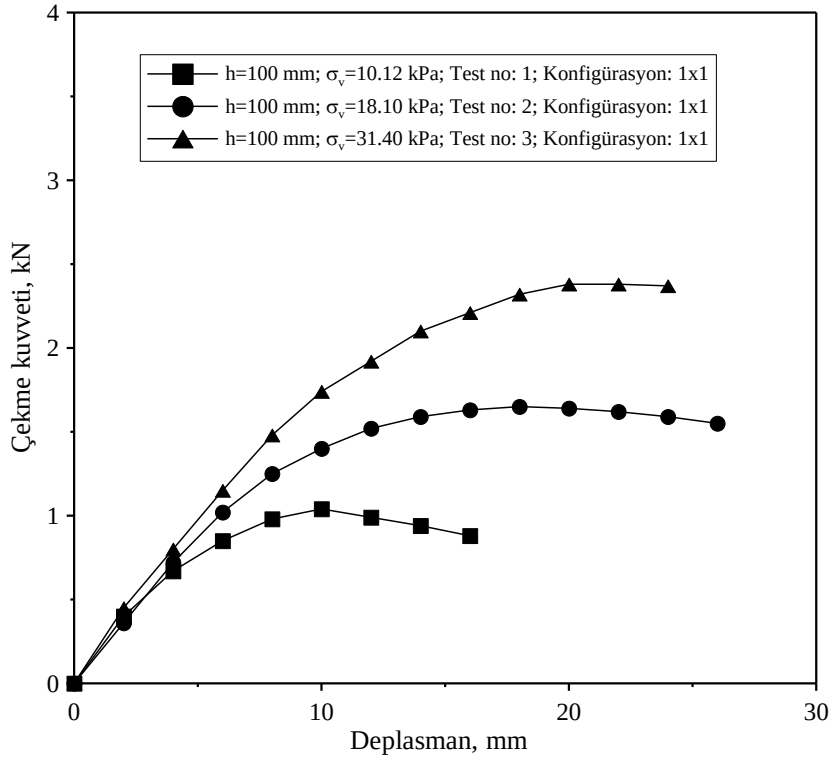
Tüm deney numunelerine ait çekme kuvveti-deplasman eğrileri Şekil 4.2 ‘de verilen eğriye benzer davranış göstermekte olup, çekme kuvveti değeri belirgin bir pik değer sergileyecek davranış göstermemektedir. Bu durum polimerik şerit malzemelerden üretilen hücresel yapı elemanlarının esnekliği ile açıklanabilmektedir. Dolayısıyla düşük rijitliğe sahip veya

esnekliği yüksek olan donatı elemanlarının maksimum çekme kuvveti belirgin bir pik davranış sergilememektedir. Fakat polimer malzemeye göre daha rijit veya esnek olmayan donatı elemanlarının maksimum çekme kuvvetleri belirgin bir pik gösterdiği bilinmektedir (Palmeira, 2004).

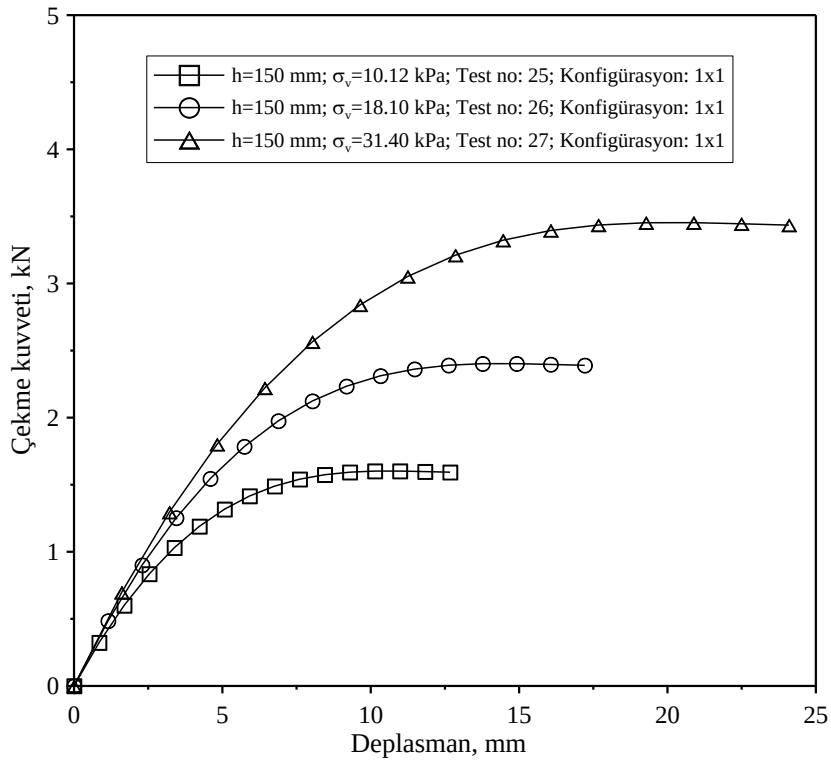
4.2. Düşey Gerilmenin Çekme Kapasitesine Etkisi

Laboratuvarıda yapılan çekme deneyleri 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilmeler altında yapılmış ve bazı deney numuneleri için çekme kuvveti-deplasman ilişkileri Şekil 4.3-4.14’te yükseklikleri 100 mm ve 150 mm olan hücresel yapı elemanları için verilmiştir. Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri artan hücre yüksekliği ve düşey gerilmeye bağı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, farklı boyutlarda ve rijitliklerde hazırlanan tüm deney numuneleri için de gözlemlenmiştir (EK-1). Düşey gerilmenin artması hücresel yapı elemanları üzerinde ilave sürtünme ve pasif direnç oluşturmaktadır. Dolayısıyla artan sürtünme ve pasif dirençler çekme kuvvetinin de artmasına neden olmaktadır (Farrag ve diğ., 1993; Işık ve Gürbüz, 2020).

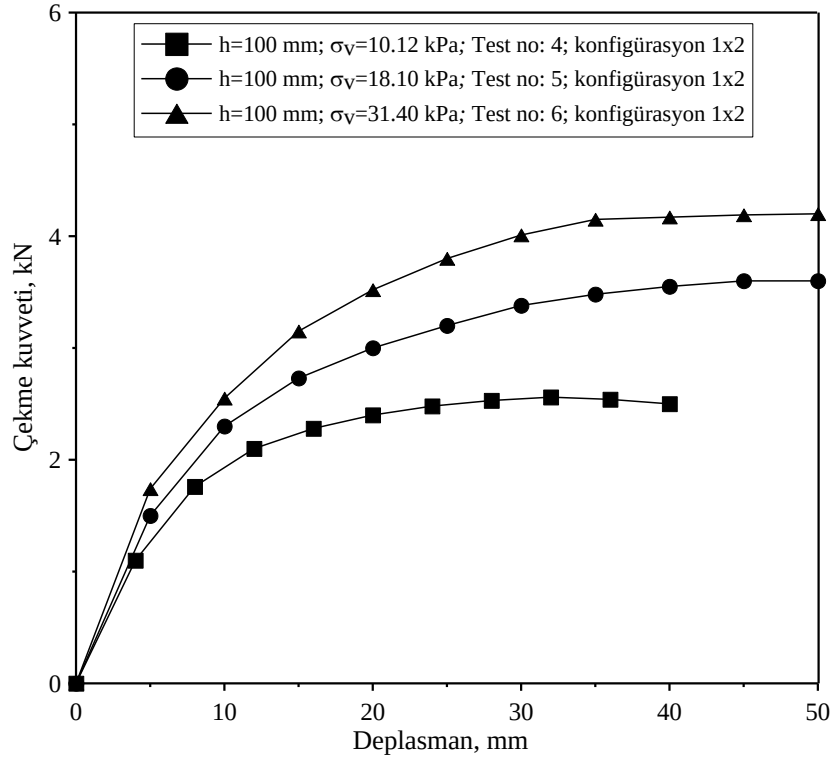
Çekme deneyleri 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilmeler altında iki farklı yüksekliğe ($h=100$ mm, $h=150$ mm), rijitlikleri farklı iki malzeme için ve farklı yerleşim konfigürasyonlarına sahip olan hücresel yapı elemanları üzerinde yapılmıştır. Yüksek düşey gerilmeler (18.10 ve 31.40 kPa) altında, yerleşim konfigürasyonları 1x3, 1x5, 2x3, 2x5, 3x3 ve 3x5 olan deney numuneleri üzerinde oluşan kopma ve akmalar nedeniyle çekme deneyleri gerçekleştirilememiştir. Düşük düşey gerilme altında ($\sigma_v=10.12$ kPa) hücresel yapı elemanlarının zemin içinde ortaya koydukları çekme kapasiteleri daha düşük deplasman değerlerinde mobilize olmaktadır. Artan düşey gerilme ($\sigma_v=18.10$ kPa, $\sigma_v=31.40$ kPa) ile hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan uzama miktarları da artmaktadır. Artan düşey gerilme ile hücresel yapı elemanları, maksimum çekme kuvvetlerine daha yüksek deplasman değerlerinde ulaştıkları belirlenmiştir. Bu durum yüksek düşey gerilme altında yapılan çekme deneyleri sonucunda hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan uzama miktarlarının daha fazla olduğu ile açıklanabilir. Artan düşey gerilme ile hücresel yapı elemanları üzerinde daha fazla uzamalar meydana gelmiş ve bazı deney numuneleri malzeme çekme dayanımlarına ulaştıkları için hücresel yapı elemanları üzerinde kopmalar veya aşırı uzamalar gözlemlenmiştir.



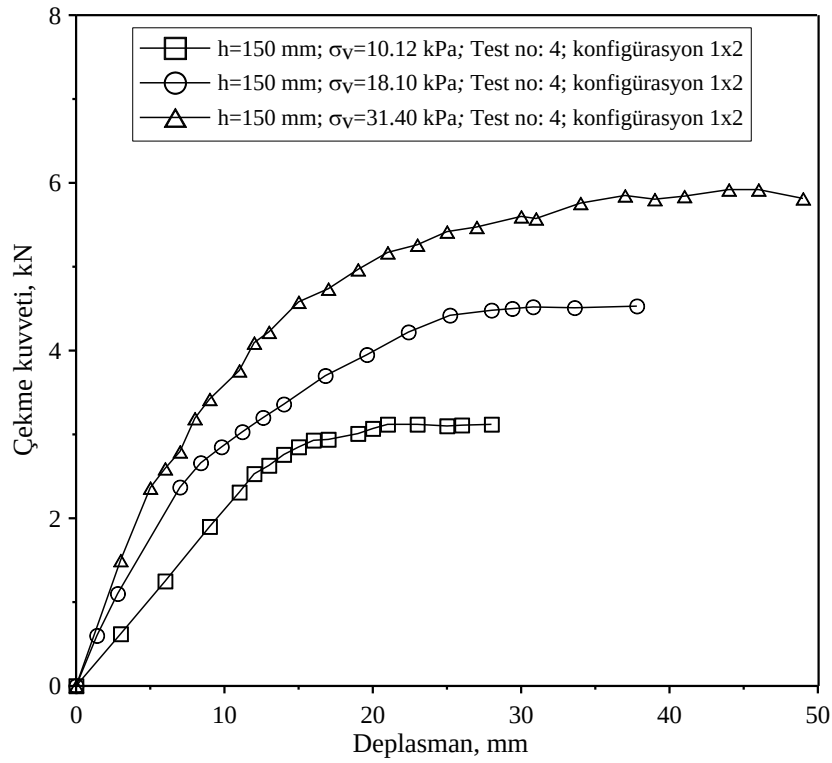
Şekil 4.3. Konfigürasyon 1x1 ve $h=100$ mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri



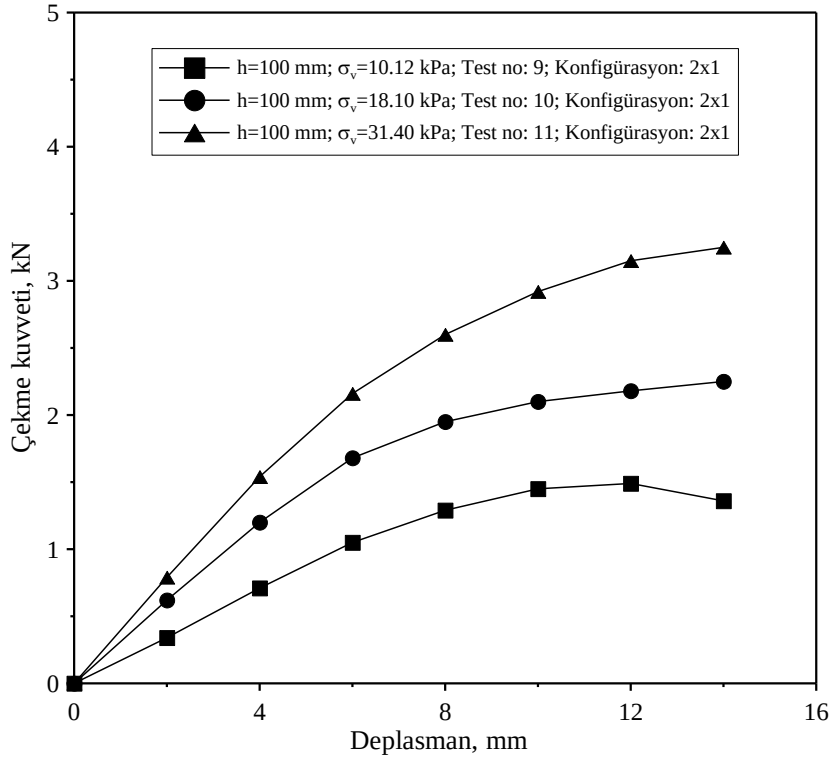
Şekil 4.4. Konfigürasyon 1x1 ve $h=150$ mm yükseklikleri için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri



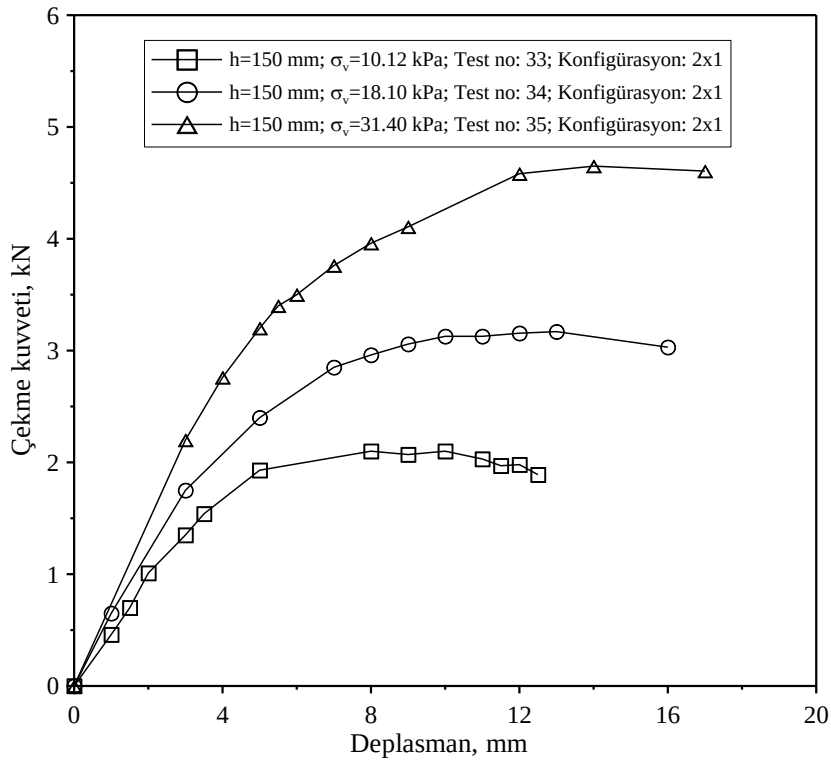
Şekil 4.5. Konfigürasyon 1x2 ve $h=100$ mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri



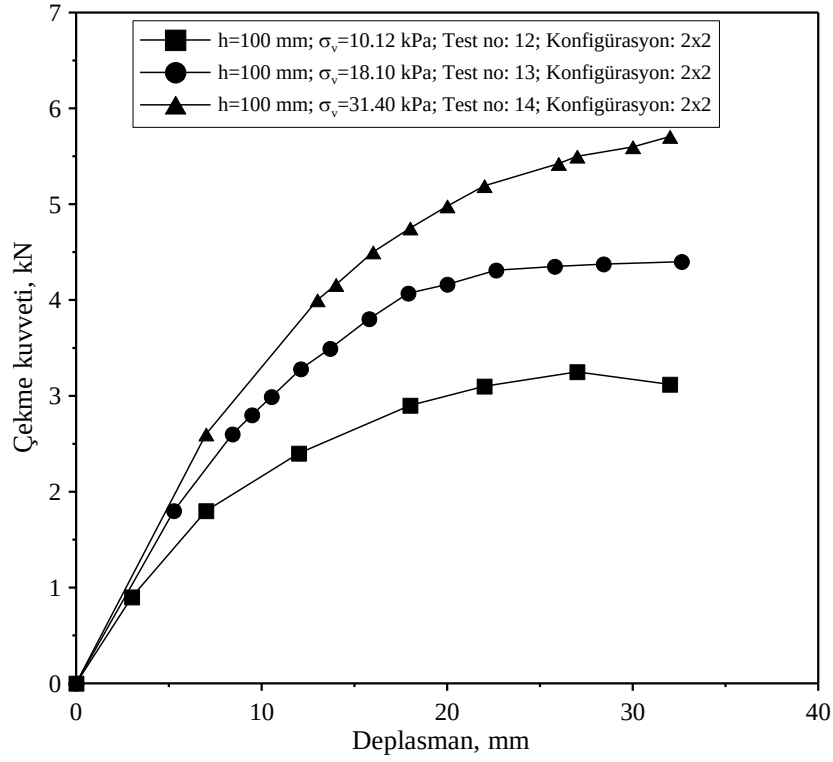
Şekil 4.6. Konfigürasyon 1x2 ve $h=150$ mm yükseklikleri için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri



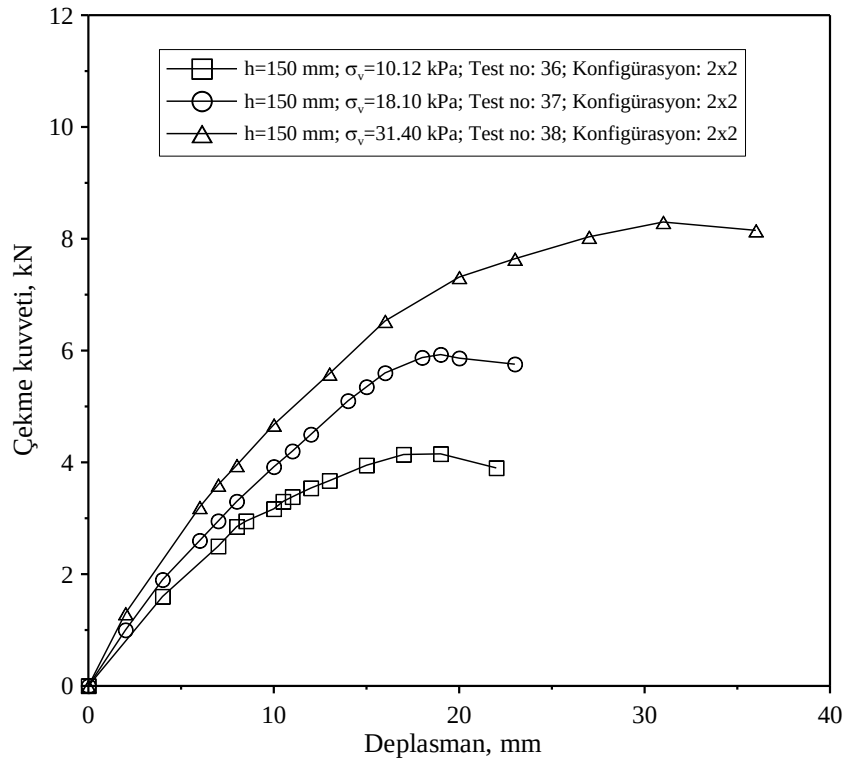
Şekil 4.7. Konfigürasyon 2x1 ve $h=100$ mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri



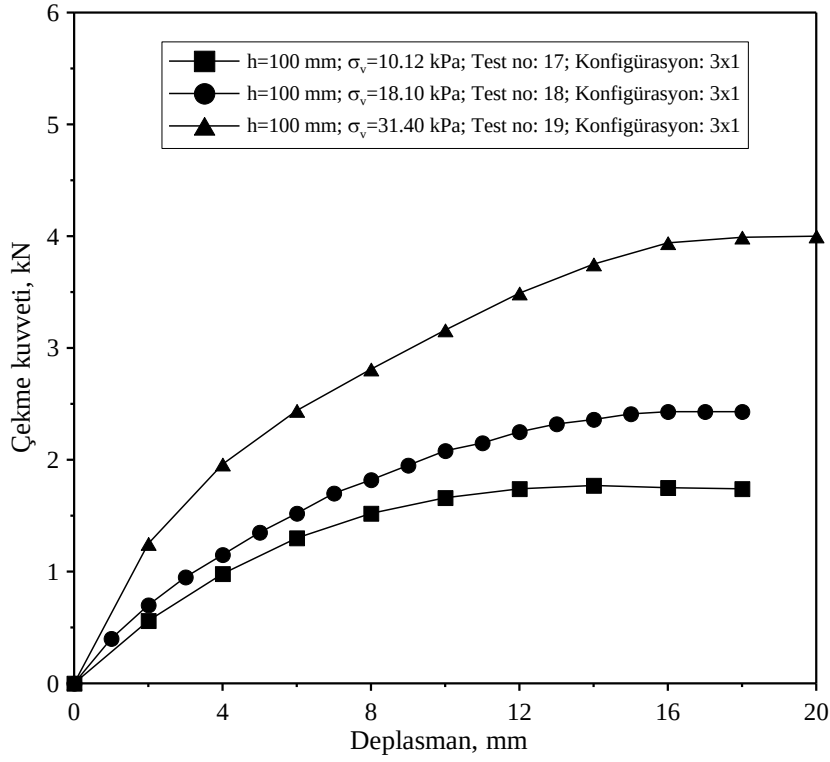
Şekil 4.8. Konfigürasyon 2x1 ve $h=150$ mm yükseklikleri için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri



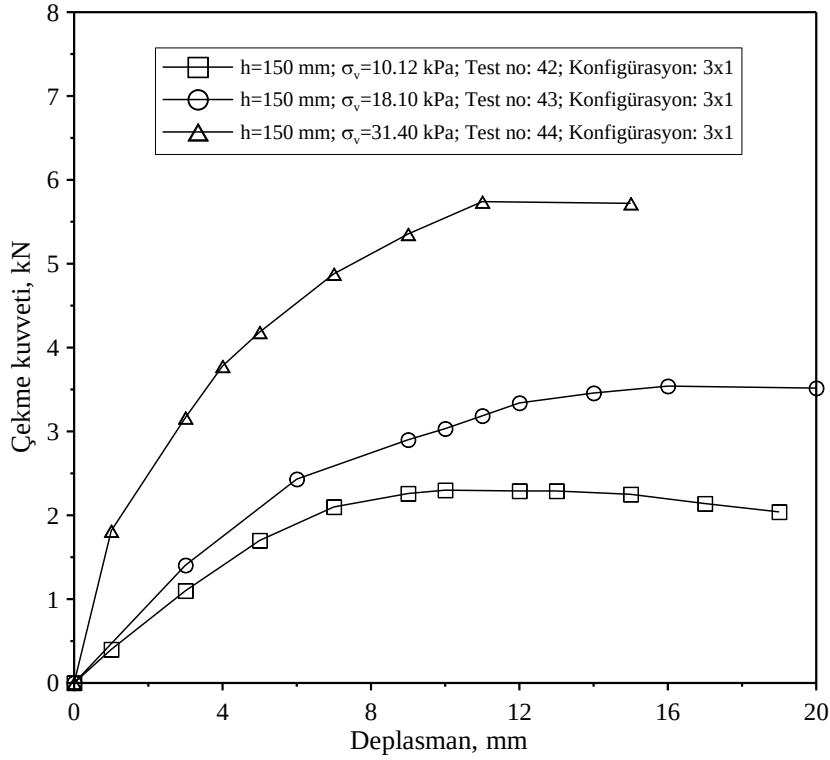
Şekil 4.9. Konfigürasyon 2x2 ve $h=100$ mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında çekme kuvveti-deplasman ilişkileri



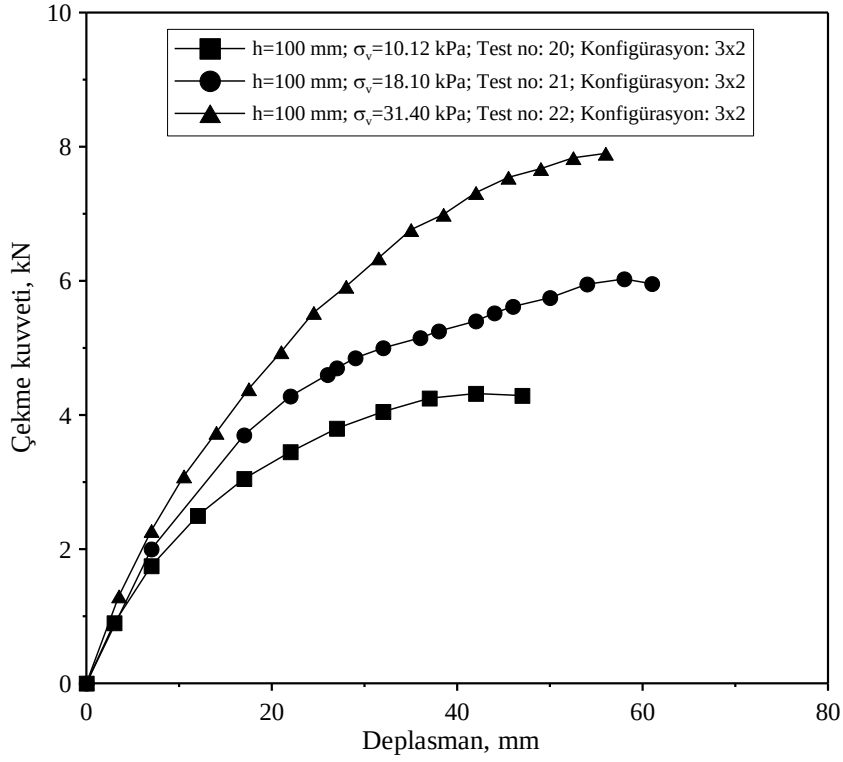
Şekil 4.10. Konfigürasyon 2x2 ve $h=150$ mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri



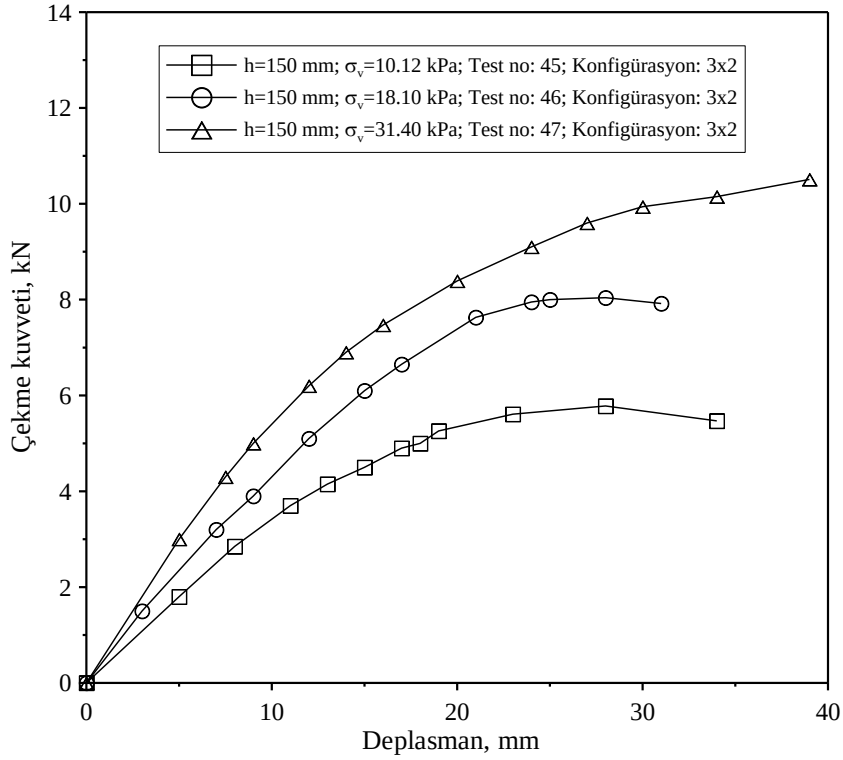
Şekil 4.11. Konfigürasyon 3x1 ve h=100 mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri



Şekil 4.12. Konfigürasyon 3x1 ve h=150 mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri



Şekil 4.13. Konfigürasyon 3x2 ve $h=100$ mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücrel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri

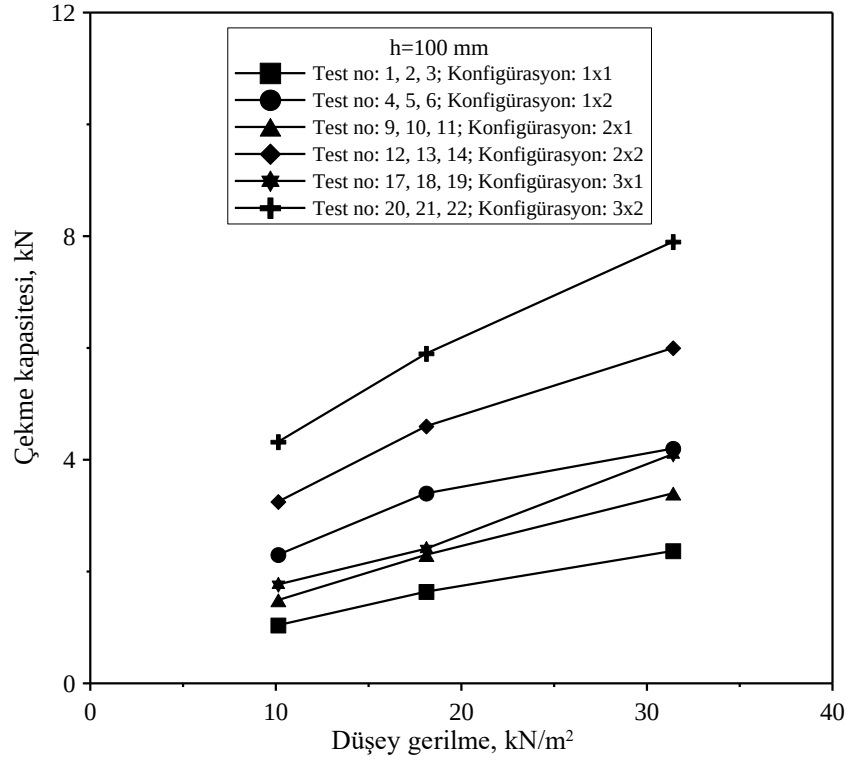


Şekil 4.14. Konfigürasyon 3x2 ve $h=150$ mm için 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında hücrel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri

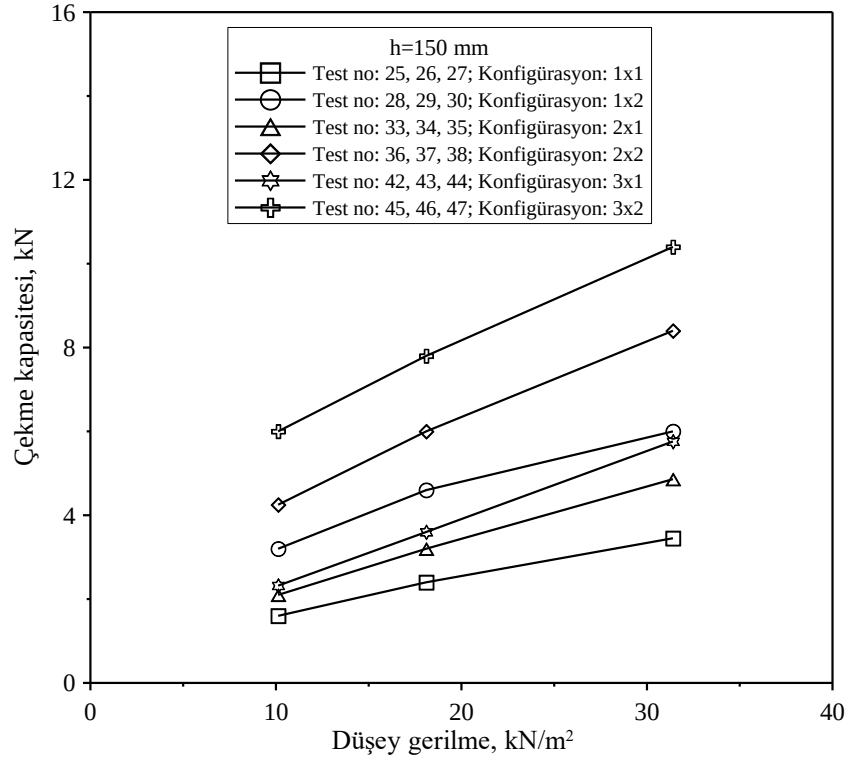
Bu bölümde, konfigürasyonları 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 olan deney numunelerinin çekme kapasiteleri, çekme kuvveti-deplasman eğrilerinden (Şekil 4.3-4.14) elde edilmiş ve düşey gerilme ile ilişkileri özet halinde Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çekme kapasitelerinin düşey gerilme ile değişimleri Şekil 4.15 ve 4.16’ te sunulmuştur. Hücre yükseklikleri 100 mm ve 150 mm olan tüm deneyler için çekme kapasiteleri artan düşey gerilme ile artmaktadır. Hücre yüksekliği 100 mm ve 1x2 konfigürasyona sahip olan deney numunelerinde artan düşey gerilme ile çekme kapasiteleri 2.30 kN’ dan 4.20 kN’ a kadar artmaktadır (Çizelge 4.2). Artan düşey gerilme ile hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelecek sürtünme ve pasif dirençlerin artışına bağlı olarak hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri de artmaktadır. Ayrıca aynı konfigürasyona sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri hücre yüksekliği 150 mm olan deney numuneleri için daha yüksek olduğu görülmektedir. 1x1 konfigürasyonu için, 100 mm hücre yüksekliğine sahip deney numunesinde çekme kapasitesi artan düşey gerilme ile 1.04 kN’ dan 2.37 kN’ a kadar artmakta, fakat hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunesinde çekme kapasitesi 1.60 kN’ dan 3.45 kN’ a kadar arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.2. Konfigürasyonları 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 olan deney numunelerinin çekme kapasitelerinin düşey gerilme ile değişimi

Test No	Konfigürasyon	Yükseklik, h (mm)	Çekme kapasitesi, kN		
			$\sigma_v=10.12$ kPa	$\sigma_v=18.10$ kPa	$\sigma_v=31.40$ kPa
1-3	1x1	100	1.04	1.64	2.37
4-6	1x2	100	2.30	3.40	4.20
9-11	2x1	100	1.49	2.30	3.40
12-14	2x2	100	3.25	4.60	6.00
17-19	3x1	100	1.77	2.41	4.10
20-22	3x2	100	4.32	5.90	7.90
25-27	1x1	150	1.60	2.40	3.45
28-30	1x2	150	3.20	4.60	6.00
33-35	2x1	150	2.10	3.20	4.86
36-38	2x2	150	4.25	6.00	8.40
42-44	3x1	150	2.32	3.60	5.76
45-47	3x2	150	6.00	7.80	10.40



Şekil 4.15. Hücre yüksekliği 100 mm için 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 konfigürasyonlarına sahip deney numunelerinin çekme kapasitelerinin düşey gerilme ile değişimi



Şekil 4.16. Hücre yüksekliği 150 mm için 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 konfigürasyonlara sahip deney numunelerinin çekme kapasitelerinin düşey gerilme ile değişimi

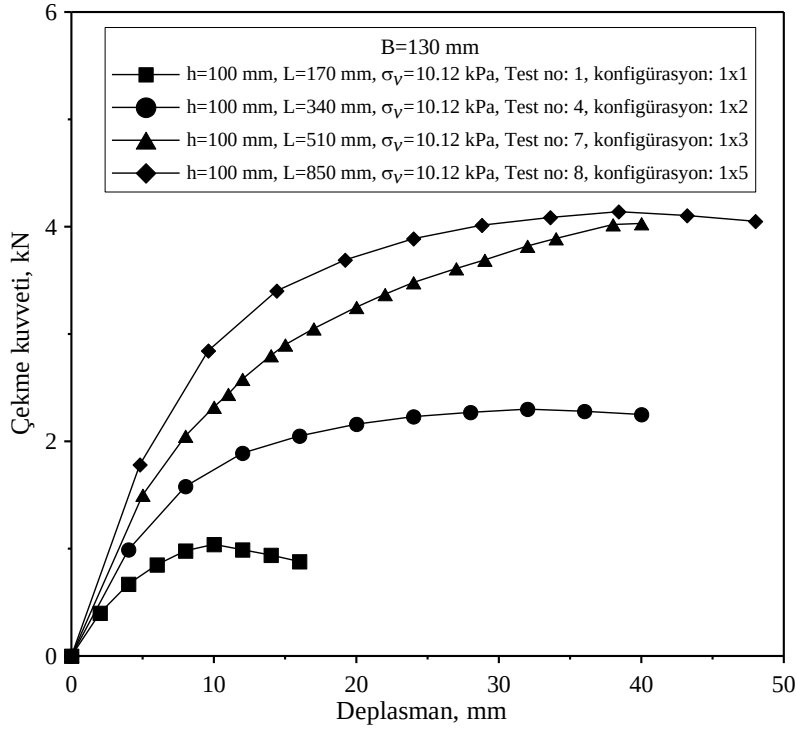
4.3. Hücresel Yapı Elemanlarının Boyutlarının Çekme Kapasitesine Etkisi

Laboratuvarda yapılan çekme deneyleri sonucunda zemin ile hücresel yapı elemanı arasındaki sürtünme direnci, hücresel yapı elemanı boyutlarına (L, B ve h) bağlı olarak incelenmiştir (Şekil 4.1). Çizelge 4.1 'de tüm deney numuneleri için hücresel yapı elemanlarının boyutları (yükseklik, genişlik ve boy) verilmiştir. Bu bölümde hücresel yapı elemanlarının uzunluğunun etkisi farklı eleman genişliğine (130, 260 ve 390 mm), genişliğinin etkisi aynı eleman uzunluğuna (170, 340, 510 ve 850 mm) ve yüksekliğinin etkisi (100 ve 150 mm) ise aynı konfigürasyona sahip numuneler için incelenmiş ve elde edilen bulgular sunulmuştur.

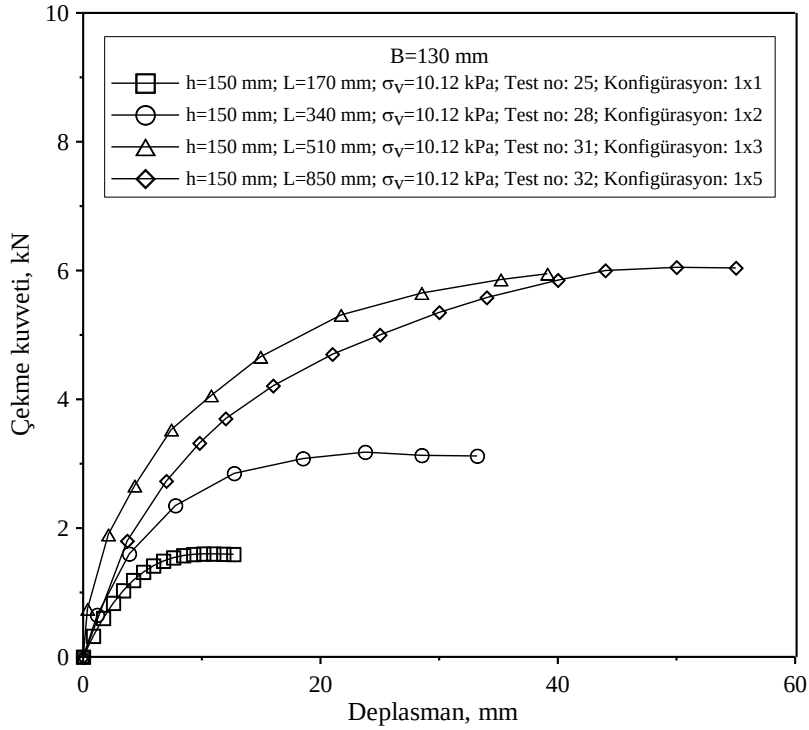
4.3.1. Hücresel yapı elemanı boyunun (L) çekme kapasitesine etkisi

Deneyisel çalışma kapsamında belirlenen hücresel yapı elemanlarının kohezyonsuz zeminler içinde gösterdikleri çekme kuvvetleri-deplasman ilişkileri hücresel yapı elemanlarının boylarına bağlı olarak incelenmiştir. Hücresel yapı elemanlarının boylarının çekme kapasitesine etkisini belirlemek amacıyla, aynı eleman genişliklerine sahip (B=130, 260 ve 390 mm) fakat boyları (L=170, 340, 510 ve 850 mm) farklı olan elemanların çekme kuvveti-deplasman ilişkileri incelenmiştir. Hücresel yapı elemanı yükseklikleri 100 mm ve 150 mm, boyları farklı ve konfigürasyonları 1x1, 1x2, 1x3, 1x5, 2x1, 2x2, 2x3, 2x5, 3x1, 3x2, 3x3 ve 3x5 olan hücresel yapı elemanları için 10.12 kPa düşey gerilme altında elde edilmiş ve bulgular Şekil 4.17-4.22' de sunulmuştur. Hücresel yapı elemanlarının kohezyonsuz zeminler içerisindeki çekme kapasitelerinin hücresel yapı elemanlarının boylarına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.17-4.22).

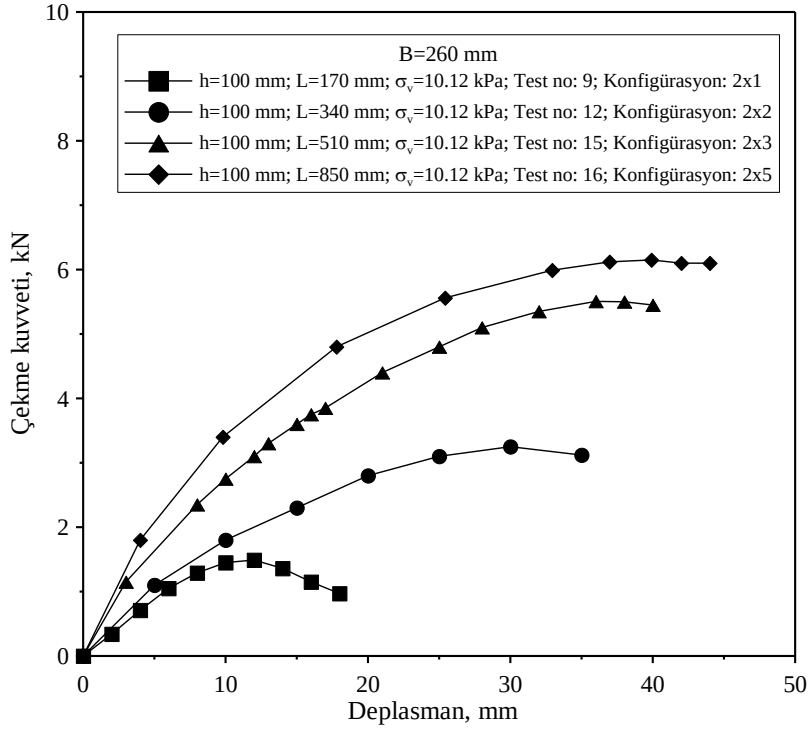
Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, eleman boyu 510 mm olan deney numunelerine kadar belirgin bir şekilde artmaktadır (Şekil 4.17). Fakat hücresel yapı elemanı boyu 850 mm için çekme kapasitesindeki değişim, hücresel yapı elemanı boyu 510 mm olan deney numunesine göre oldukça düşük seviyede olup çekme kuvveti-deplasman ilişkisi neredeyse benzer davranış göstermektedir. Bu davranış boyu 510 mm ve 850 mm olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerine ulaştıklarını göstermektedir.



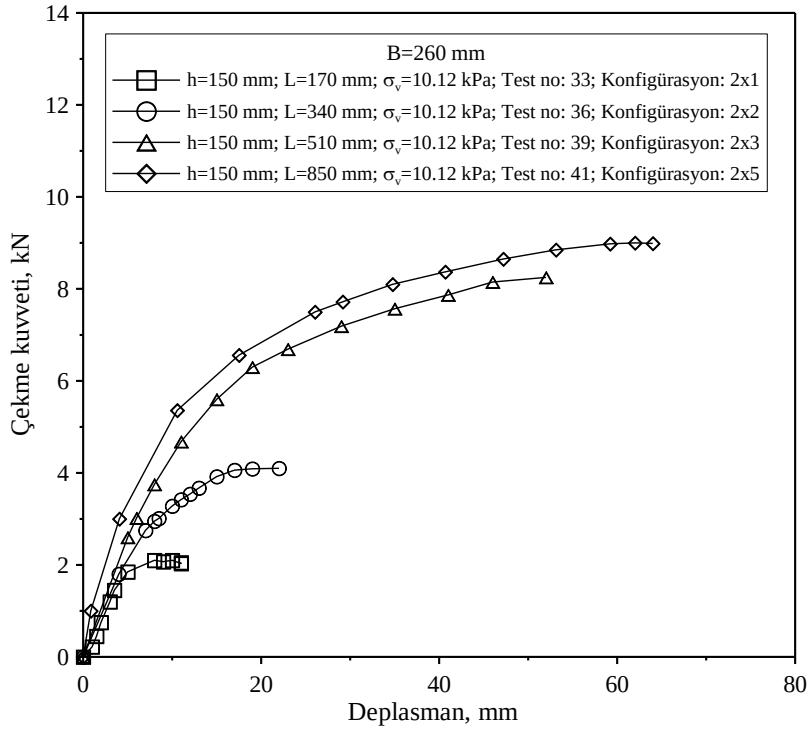
Şekil 4.17. Hüresel yapı elemanı genişliği 130 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hüresel yapı elemanı boyu ile değişimi



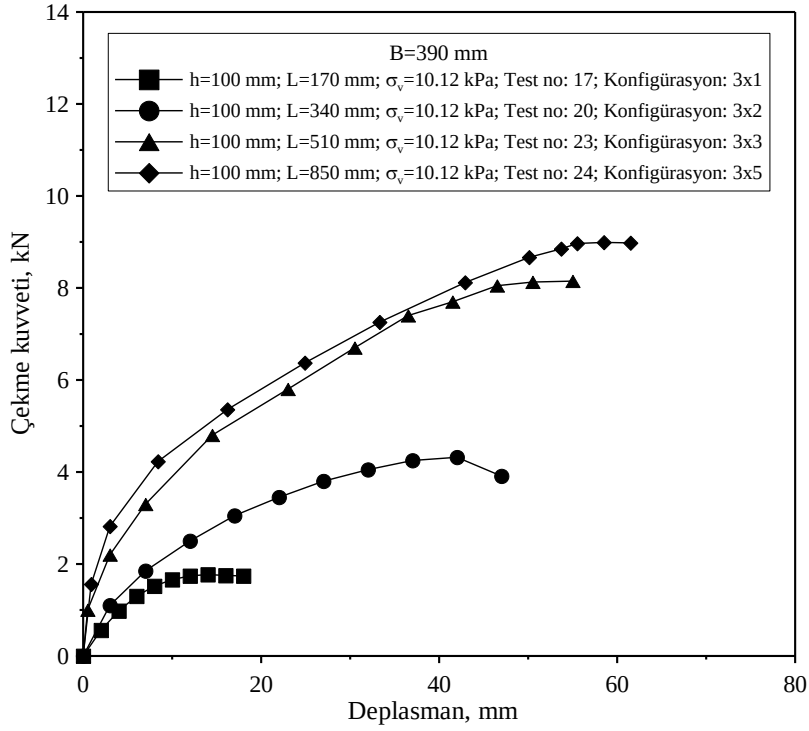
Şekil 4.18. Hüresel yapı elemanı genişliği 130 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hüresel yapı elemanı boyu ile değişimi



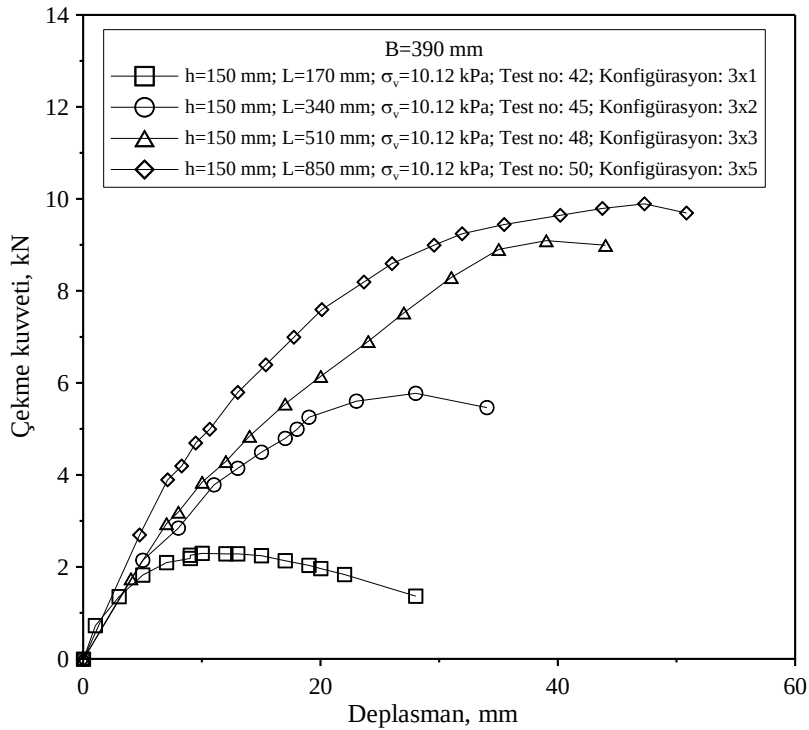
Şekil 4.19. Hücresel yapı elemanı genişliği 260 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı boyu ile değişimi



Şekil 4.20. Hücresel yapı elemanı genişliği 260 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı boyu ile değişimi



Şekil 4.21. Hüresel yapı elemanı genişliği 390 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hüresel yapı elemanı boyu ile değişimi



Şekil 4.22. Hüresel yapı elemanı genişliği 390 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hüresel yapı elemanı boyu ile değişimi

Hücresel yapı eleman boyu 510 mm'den büyük deney numuneleri, zemin ortamında çekme kapasitesine ulaşmış olup artan eleman boyu ile çekme kapasitesinin değişmeyeceği açıkça görülmüştür (Şekil 4.17-4.22). Genellikle hücresel yapı elemanı boyu 510 mm ve 850 mm olan deney numunelerinde çekme deneyi süresince numuneler üzerinde bölgesel akmalar meydana gelmiştir. Deney numuneleri üzerinde meydana gelen akmalar hücresel yapı elemanlarının malzeme dayanımına ulaştığını göstermektedir. Ayrıca bazı deney numunelerinde ise çekme dayanımlarına ($T_u=18$ kN/m) ulaşılan hücresel yapı elemanlarının kaynak bölgelerinde kopmalar meydana geldiği görülmüştür. Hücresel yapı elemanı boyu 510 mm ve 850 mm olan deney numunelerinin çekme kapasiteleri, hücresel yapı elemanının malzeme çekme dayanımına yakın değerlerde olduğu ve buna bağlı olarak değişmediği belirlenmiştir. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemeden üretilmiş hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerini belirleyen en önemli faktörlerden birinin malzeme dayanımı olduğu açıkça görülmektedir. Hücresel yapı eleman genişliği 130 mm, 260 mm ve 390 mm olan tüm deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkileri, Şekil 4.17' de elde edilen sonuçlara benzer olduğu belirlenmiştir.

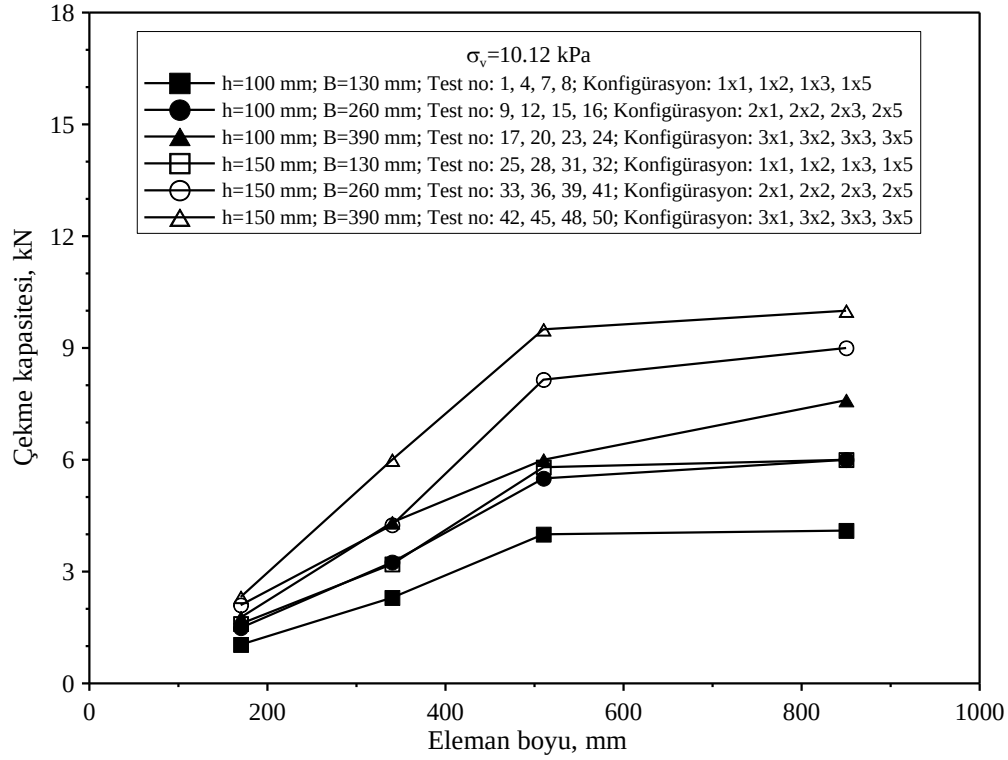
Düşey gerilme değerleri 18.10 ve 31.40 kPa için elde edilen çekme kuvveti-deplasman eğrileri ise EK-1' de sunulmuş ve belirlenen çekme kapasiteleri Çizelge 4.3' te verilmiştir. Hücresel yapı elemanı yükseklikleri 100 mm ve 150 mm ve farklı genişliklere sahip deney numunelerinin çekme kapasiteleri, farklı düşey gerilmeler (10.12, 18.10 ve 31.40 kPa) altında eleman boyu ile değişimi özet halinde tüm deneyler için verilmiştir (Çizelge 4.3). Malzeme çekme dayanımlarına ($T_u=18$ kN/m) ulaşan hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen akmalar ve kopmalar nedeniyle, hücre yükseklikleri 100 ve 150 mm için 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilmeler altında konfigürasyonları 1x3, 1x5, 2x3, 2x5, 3x3 ve 3.5 olan deney numuneleri üzerinde çekme deneyleri gerçekleştirilememiştir. Fakat hücre yüksekliği 150 mm ve konfigürasyonları 2x3 ve 3x3 olan deney numuneleri üzerinde 18.10 kPa düşey gerilme altında çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.3' te verilen çekme kapasitelerinin farklı düşey gerilmeler (10.12, 18.10 ve 31.40 kPa) altında eleman boyu ile değişimi özet halinde Şekil 4.23-4.25' te verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere eleman boyu 510 mm ve 850 mm olan deney numunelerinin çekme kapasiteleri neredeyse eşit olduğu görülmektedir. Fakat sadece hücre yüksekliği 100 mm ve konfigürasyonları 3x1, 3x2, 3x3 ve 3x5 deney numunelerinde, eleman boyu 510 mm ve 850 mm olan numunelerin çekme kapasitelerinin eşit olmadığı ve eleman boyu artıkça

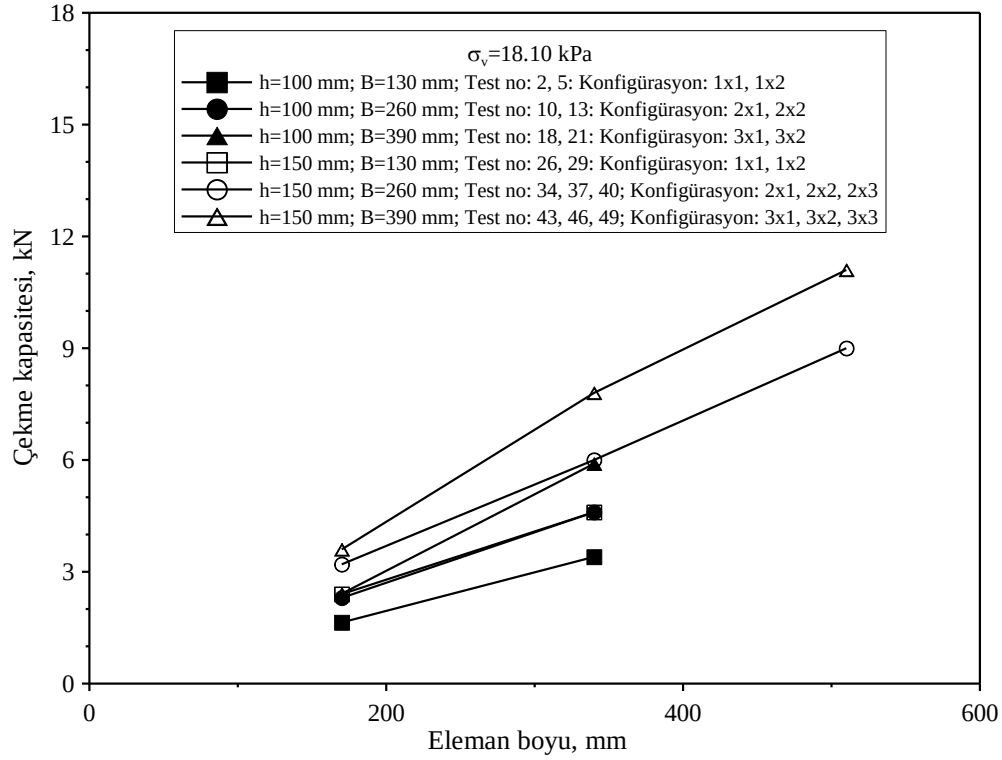
çekme kapasitesi de arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.23). Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular neticesinde hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri eleman boyu 510 mm' ye kadar olan numuneler için artmakta olup eleman boyu 510 mm 'den fazla olan numuneler (L=850 mm) için ise önemli ölçüde değişmediği ortaya çıkmıştır (Şekil 4.23-4.25). Sonuç olarak hücresel yapı elemanı boyunun çekme kapasitesine olan etkisi belirgin bir şekilde görülmüş, fakat HDPE malzemeden üretilmiş hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri malzeme çekme dayanımına bağlı olarak sınırlandırıldığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı hücresel yapı elemanı genişliklerine sahip numunelerin çekme kapasitelerinin eleman boylarına göre değişimi

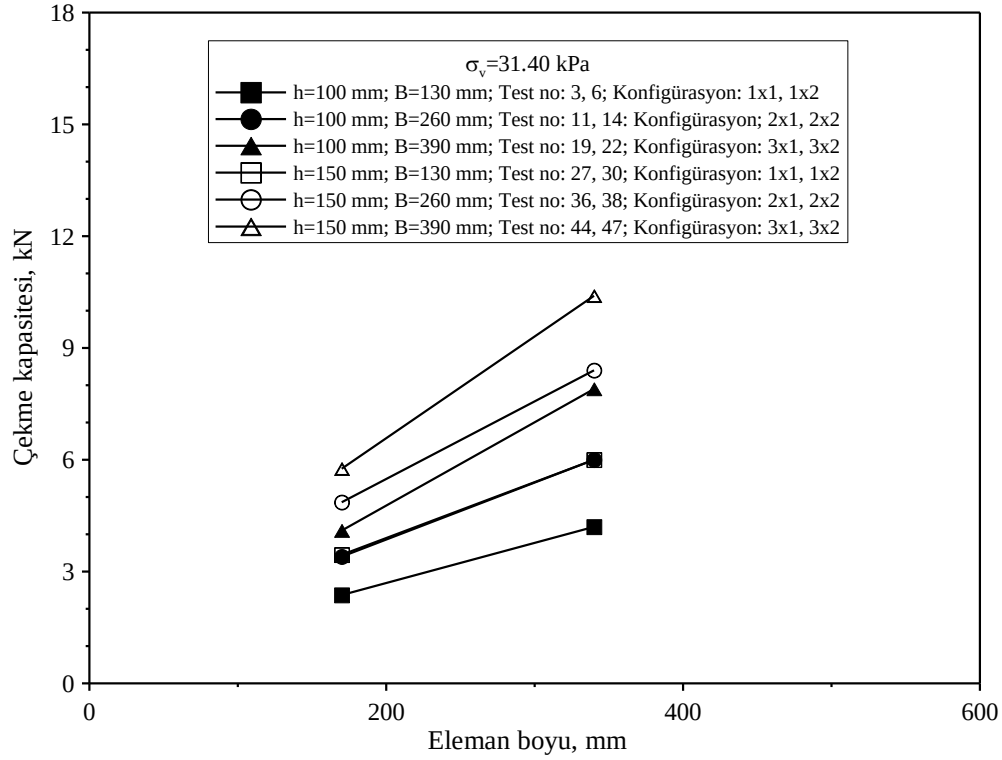
Test No	Konfigürasyon	Yükseklik, h (mm)	Genişlik, B (mm)	Boy, L (mm)	Çekme kapasitesi, kN		
					$\sigma_v=10.12$ kPa	$\sigma_v=18.10$ kPa	$\sigma_v=31.40$ kPa
1-3	1x1	100	130	170	1.04	1.64	2.37
4-6	1x2	100	130	340	2.30	3.40	4.20
7	1x3	100	130	510	4.00	-	-
8	1x5	100	130	850	4.10	-	-
9-11	2x1	100	260	170	1.49	2.30	3.40
12-14	2x2	100	260	340	3.25	4.60	6.00
15	2x3	100	260	510	5.50	-	-
16	2x5	100	260	850	6.00	-	-
17-19	3x1	100	390	170	1.77	2.41	4.10
20-22	3x2	100	390	340	4.32	5.90	7.90
23	3x3	100	390	510	6.00	-	-
24	3x5	100	390	850	7.60	-	-
25-27	1x1	150	130	170	1.60	2.40	3.45
28-30	1x2	150	130	340	3.20	4.60	6.00
31	1x3	150	130	510	5.80	-	-
32	1x5	150	130	850	6.00	-	-
33-35	2x1	150	260	170	2.10	3.20	4.86
36-38	2x2	150	260	340	4.25	6.00	8.40
39, 40	2x3	150	260	510	8.15	9.00	-
41	2x5	150	260	850	9.00	-	-
42-44	3x1	150	390	170	2.32	3.60	5.76
45-47	3x2	150	390	340	6.00	7.80	10.40
48, 49	3x3	150	390	510	9.50	11.10	-
50	3x5	150	390	850	10.00	-	-



Şekil 4.23. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında farklı genişliklere sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman boyuna bağlı olarak değişimi



Şekil 4.24. $\sigma_v=18.10$ kPa düşey gerilme altında farklı genişliklere sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman boyuna bağlı olarak değişimi



Şekil 4.25. $\sigma_v=31.40$ kPa düşey gerilme altında farklı genişliklere sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman boyuna bağlı olarak değişimi

4.3.2. Hücresel yapı elemanın genişliğin (B) çekme kapasitesine etkisi

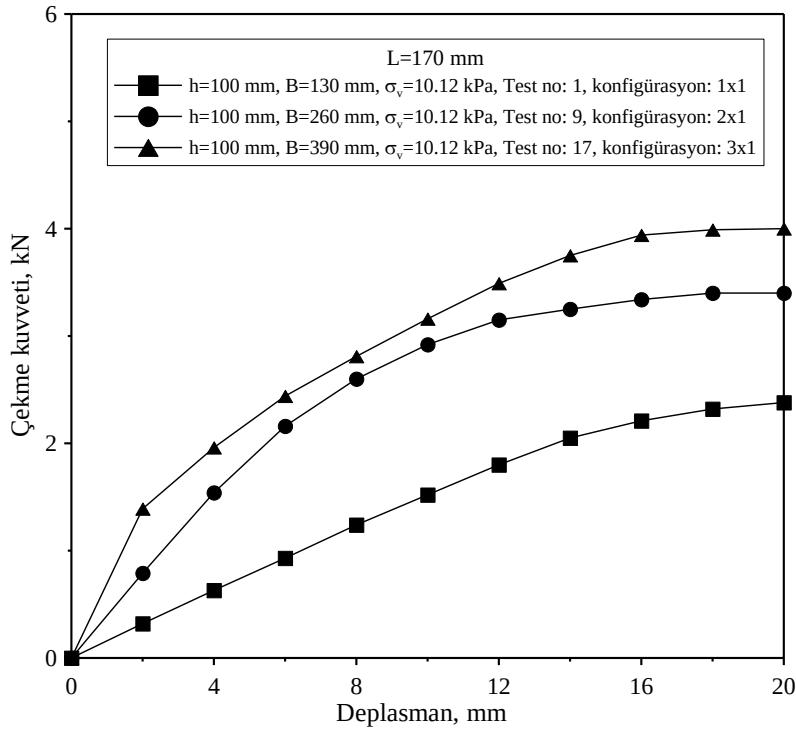
Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri üzerinde etkili olan bir diğer faktörde hücresel yapı elemanının genişliğidir. Hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri; 10.12 kPa düşey gerilme altında farklı eleman genişliği ($B=130, 260$ ve 390 mm), eleman boyu ($L=170, 340, 510$ ve 850 mm), hücre yüksekliği ($h=100$ ve 150 mm) ve konfigürasyonlar ($1 \times 1, 2 \times 1, 3 \times 1, 1 \times 2, 2 \times 2, 3 \times 2, 1 \times 3, 2 \times 3, 3 \times 3, 1 \times 5, 2 \times 5$ ve 3×5) için incelenmiştir ve Şekil 4.25-4.32' de verilmiştir. Düşey gerilme değerleri 18.10 ve 31.40 kPa olan deney numunelerine ait çekme kuvveti-deplasman ilişkileri ise Ek-1' de sunulmuştur.

Hücresel yapı elemanı genişliğin artmasına bağlı olarak çekme kapasitesi de artmaktadır (Şekil 4.26-4.33). Çekme kapasitesindeki artışlar, hücresel yapı elemanının boyutlarının artması sonucu artan sürtünme ve pasif direnç alanları ile açıklanabilir. Dolayısıyla hücresel yapı elemanlarının genişliğinin çekme kapasitesine direkt etkisi olduğu açıkça görülmektedir. Hücre yüksekliği 100 mm, eleman boyu 170 mm, eleman genişliği 130 mm, 260 mm ve 390 mm olan deney numunelerinin çekme kapasiteleri sırasıyla 1.04 kN, 1.49 kN ve 1.77 kN olarak belirlenmiştir (Şekil 4.26). Artan hücresel yapı elemanı genişliği ile çekme kapasitesinde yaklaşık olarak %60-70 civarında artış görülmektedir. Tüm deney

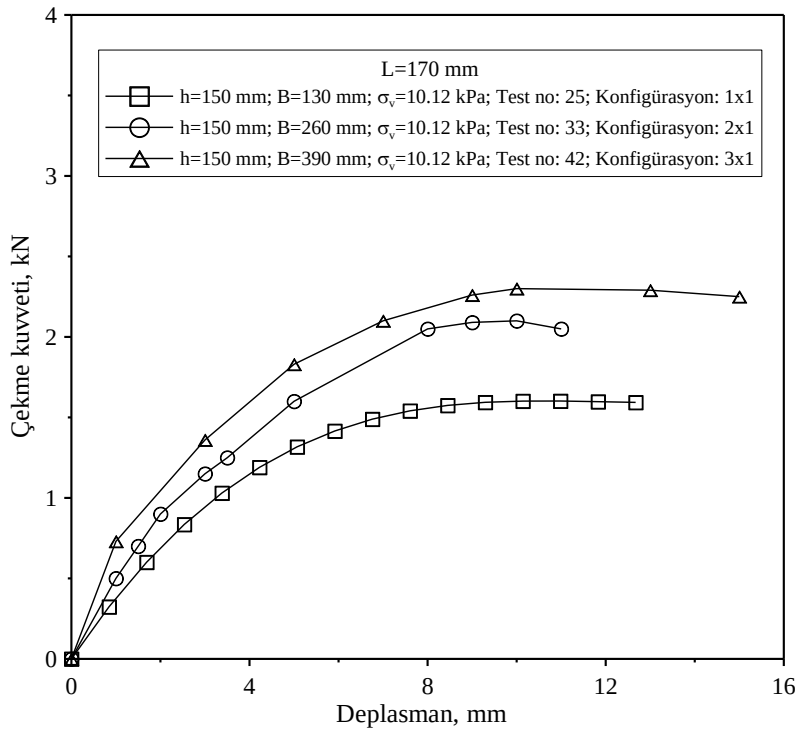
numunelerinin çekme kapasiteleri 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilmeler altında özet halinde Çizelge 4.4’ te verilmiştir. Tüm deney numunelerinde artan hücresel yapı elemanı genişliği ile çekme kapasitesi yaklaşık olarak Şekil 4.26’ da verilen deney numunelerine benzer olarak %60-70 civarında artmaktadır. Ancak bazı deney numunelerinde artan düşey gerilme ile hücresel yapı elemanlarının çekme dayanımlarına ulaştıkları için yüksek düşey gerilmeler (18.10 ve 31.40 kPa) altında deneyler gerçekleştirilememiştir. Hücresel yapı elemanlarına ait çekme kuvveti-deplasman eğrilerinden elde edilen çekme kapasitelerinin (Çizelge 4.4) eleman genişliği ile değişimi Şekil 4.34-4.36’ da verilmiştir. Hücre yüksekliği 100 mm ve 150 mm olan tüm deney numunelerinde artan eleman genişliği ile çekme kapasiteleri de artmaktadır. Çekme kapasitesini etkileyen en önemli faktörlerden birinin de hücresel yapı elemanının genişliği olduğu bu çalışma kapsamında ortaya konulmuştur.

Çizelge 4.4. Hücresel yapı elemanı çekme kapasitelerinin eleman genişliklerine göre değişimi

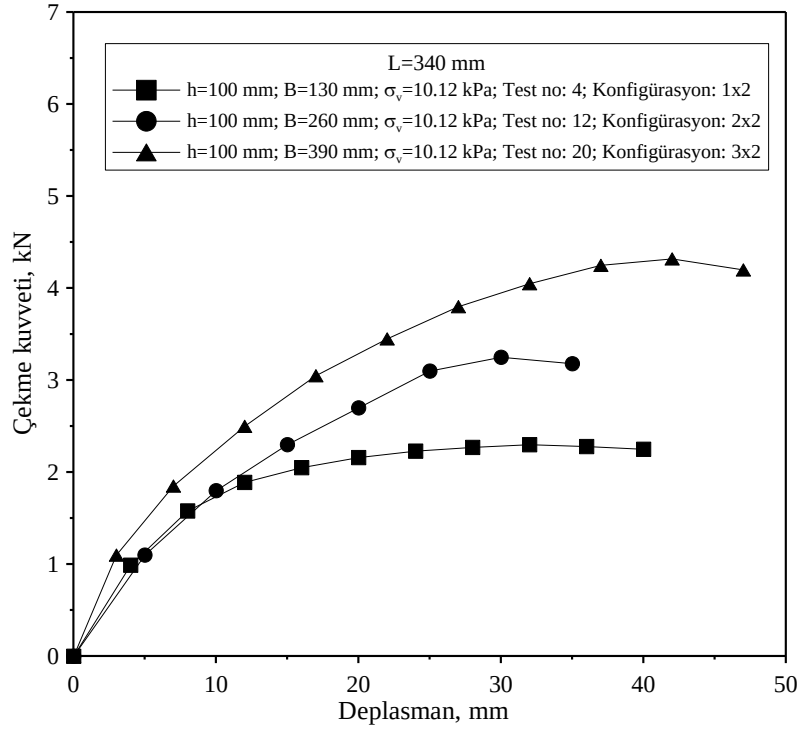
Test No	Konfigürasyon	Yükseklik, h (mm)	Genişlik, B (mm)	Boy, L (mm)	Çekme kapasitesi, kN		
					$\sigma_v=10.12$ kPa	$\sigma_v=18.10$ kPa	$\sigma_v=31.40$ kPa
1-3	1x1	100	130	170	1.04	1.64	2.37
9-11	2x1	100	260	170	1.49	2.30	3.40
17-19	3x1	100	390	170	1.77	2.41	4.10
4-6	1x2	100	130	340	2.30	3.40	4.20
12-14	2x2	100	260	340	3.25	4.60	6.00
20-22	3x2	100	390	340	4.32	5.90	7.90
7	1x3	100	130	510	4.00	-	-
15	2x3	100	260	510	5.50	-	-
23	3x3	100	390	510	6.00	-	-
8	1x5	100	130	850	4.10	-	-
16	2x5	100	260	850	6.00	-	-
24	3x5	100	390	850	7.60	-	-
25-27	1x1	150	130	170	1.60	2.40	3.45
33-35	2x1	150	260	170	2.10	3.20	4.86
42-44	3x1	150	390	170	2.32	3.60	5.76
28-30	1x2	150	130	340	3.20	4.60	6.00
36-38	2x2	150	260	340	4.25	6.00	8.40
45-47	3x2	150	390	340	6.00	7.80	10.40
31	1x3	150	130	510	5.80	-	-
39, 40	2x3	150	260	510	8.15	9.00	-
48, 49	3x3	150	390	510	9.50	11.10	-
32	1x5	150	130	850	6.00	-	-
41	2x5	150	260	850	9.00	-	-
50	3x5	150	390	850	10.00	-	-



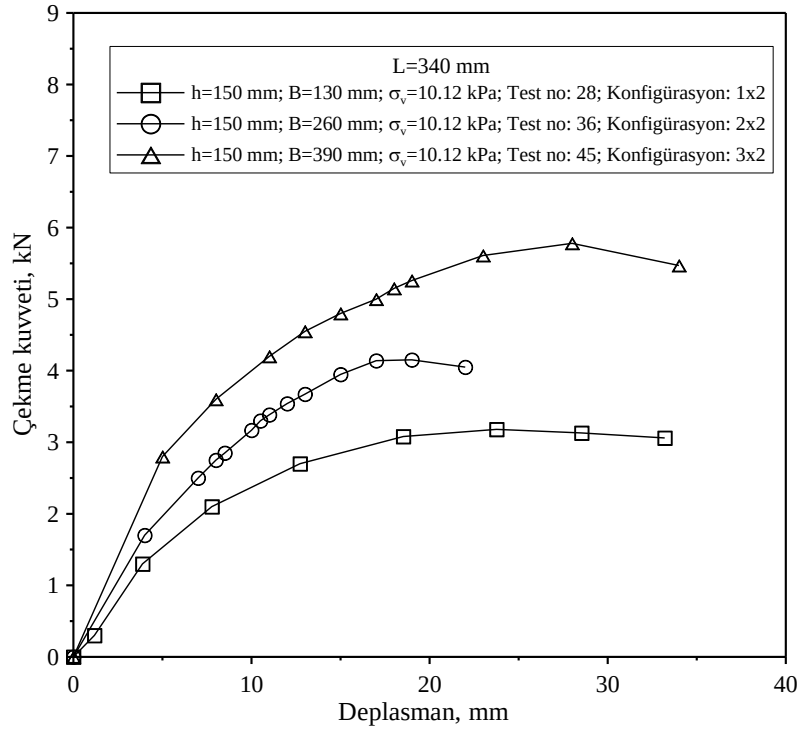
Şekil 4.26. Hüresel yapı eleman boyu 170 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hüresel yapı elemanı genişliği ile değişimi



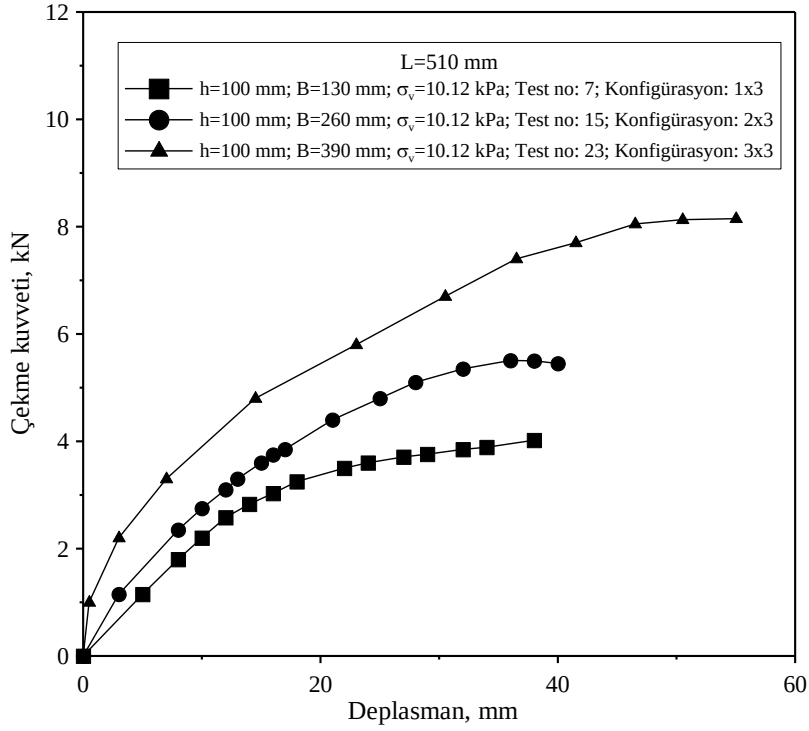
Şekil 4.27. Hüresel yapı eleman boyu 170 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hüresel yapı elemanı genişliği ile değişimi



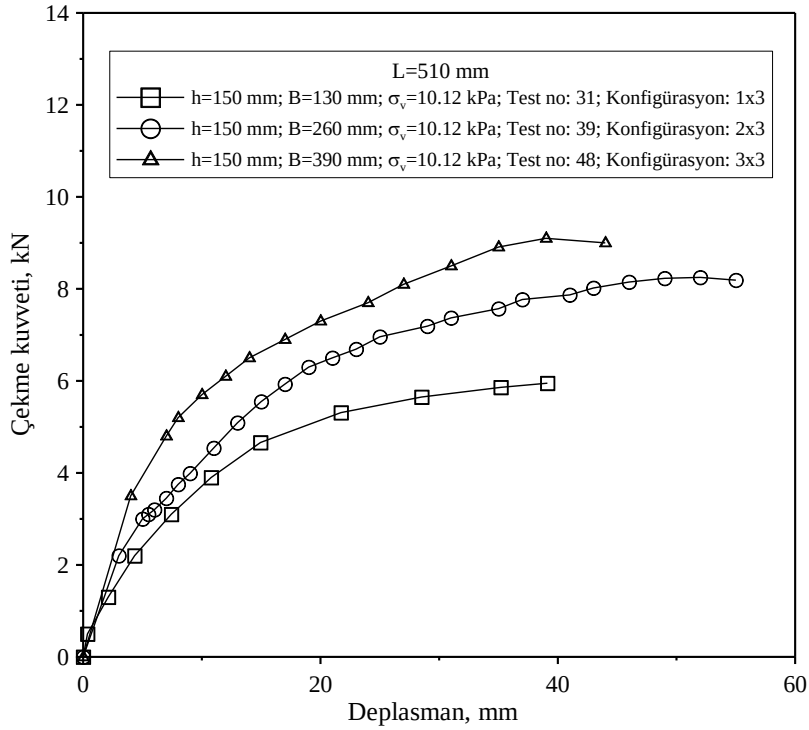
Şekil 4.28. Hücresel yapı eleman boyu 340 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı genişliği ile değişimi



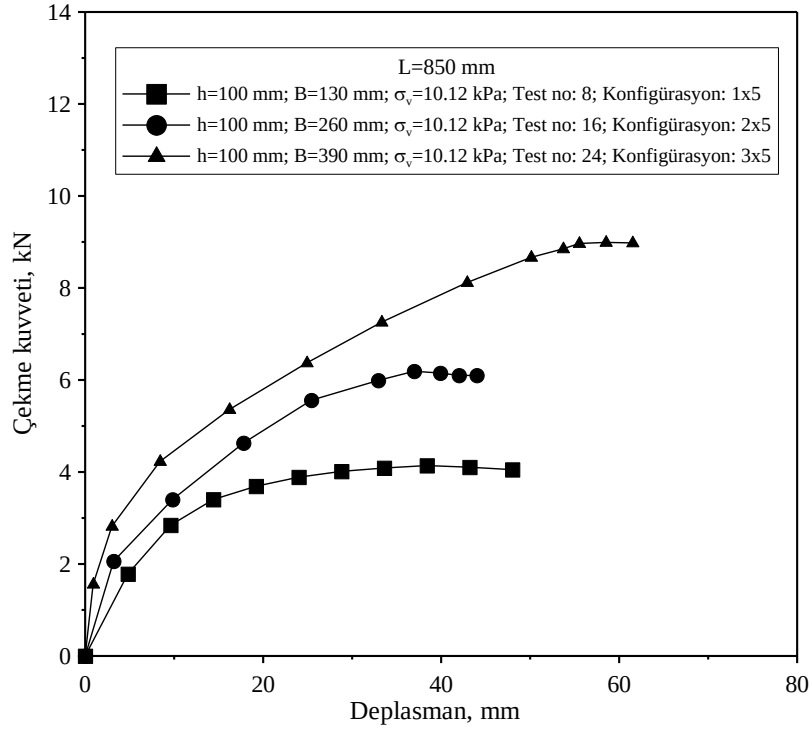
Şekil 4.29. Hücresel yapı eleman boyu 340 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hücresel yapı elemanı genişliği ile değişimi



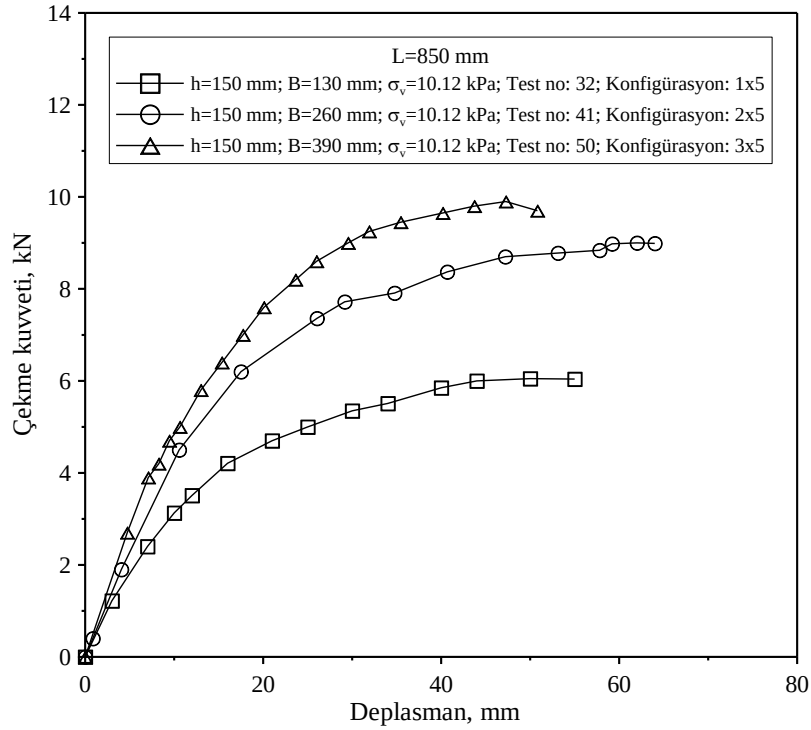
Şekil 4.30. Hüresel yapı eleman boyu 510 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hüresel yapı elemanı genişliği ile değişimi



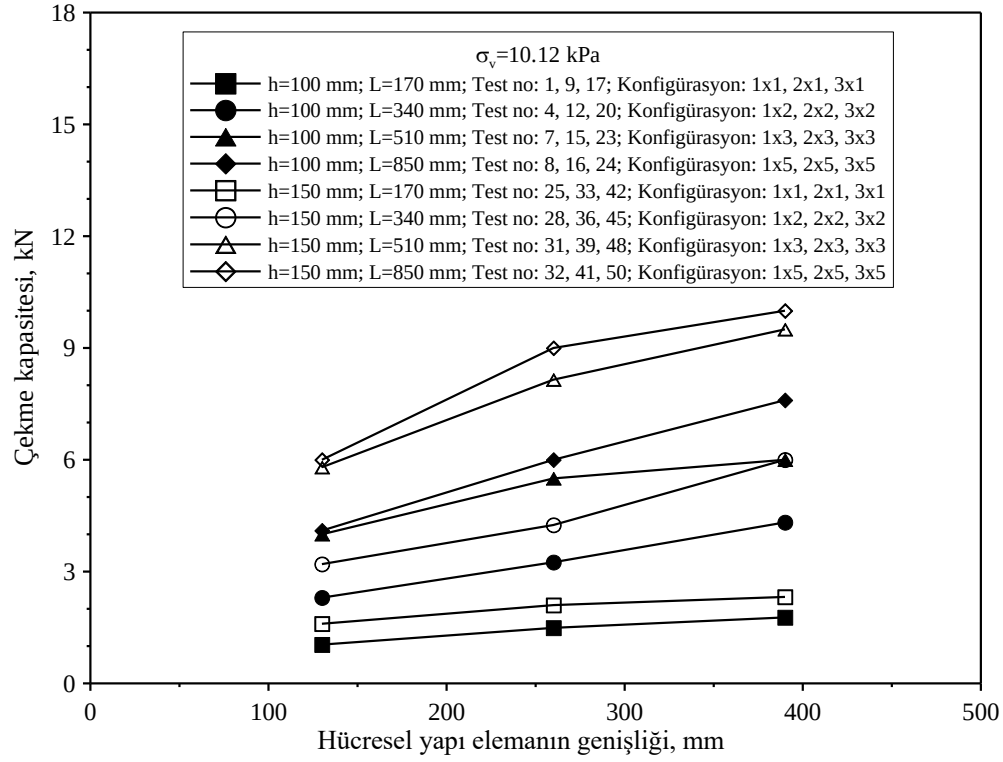
Şekil 4.31. Hüresel yapı eleman boyu 510 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hüresel yapı elemanı genişliği ile değişimi



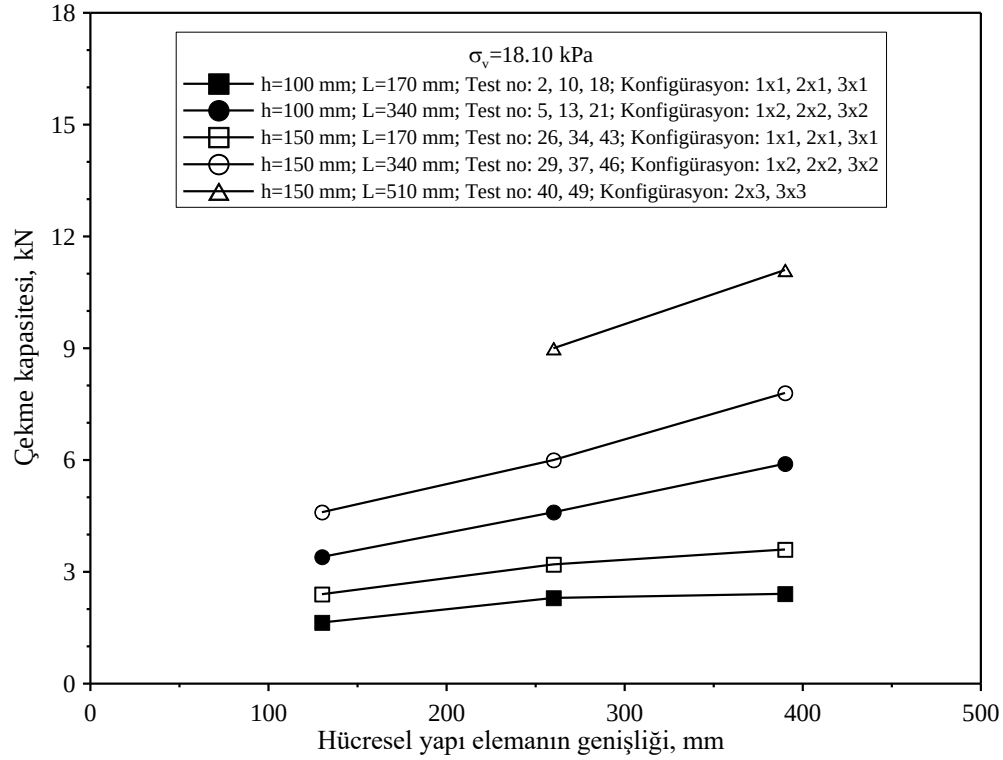
Şekil 4.32. Hüresel yapı eleman boyu 850 mm ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hüresel yapı elemanı genişliği ile değişimi



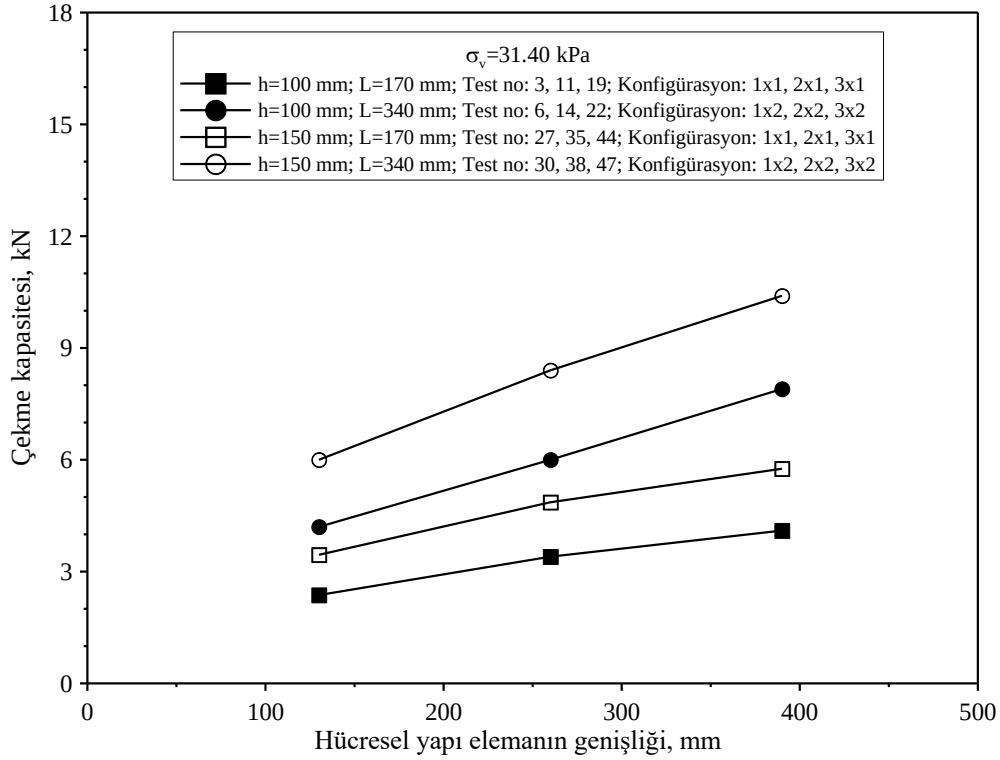
Şekil 4.33. Hüresel yapı eleman boyu 850 mm ve hücre yüksekliği 150 mm olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkilerinin hüresel yapı elemanı genişliği ile değişimi



Şekil 4.34. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında farklı boylara sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman genişliğine bağlı olarak değişimi



Şekil 4.35. $\sigma_v=18.10$ kPa düşey gerilme altında farklı genişliklere sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman boyuna bağlı olarak değişimi



Şekil 4.36. $\sigma_v=31.40$ kPa düşey gerilme altında farklı genişliklere sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin eleman boyuna bağlı olarak değişimi

4.3.3. Hücresel yapı elemanı yüksekliğinin (h) çekme kapasitesine etkisi

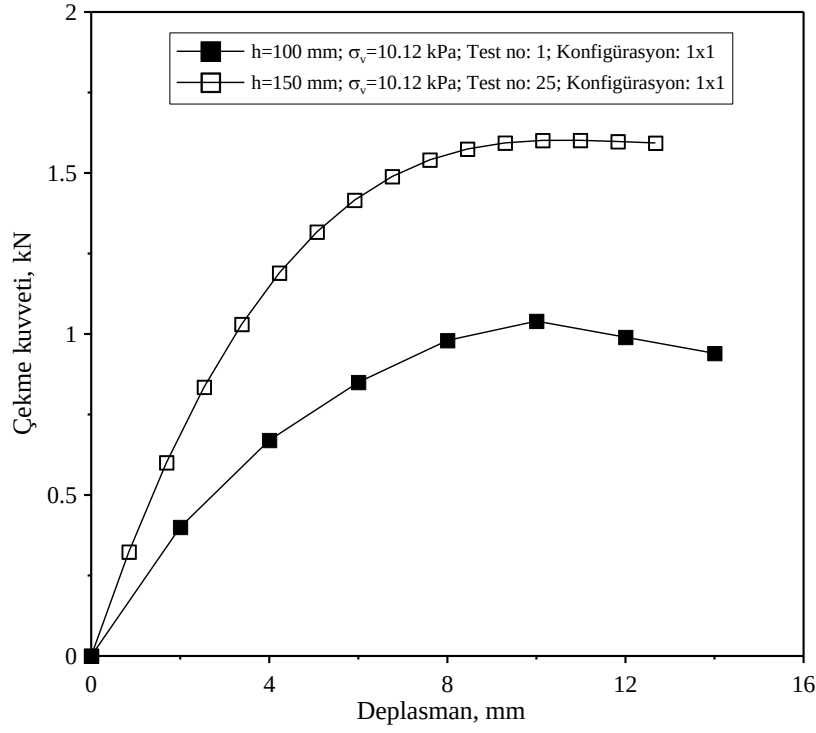
Hücresel yapı elemanı yüksekliğinin ($h=100$ mm, $h=150$ mm) çekme kuvveti-deplasman ilişkisine olan etkisi; 10.12 kPa düşey gerilme altında farklı yerleşim konfigürasyonları (1×1 , 1×2 , 1×3 , 1×5 , 2×1 , 2×2 , 2×3 , 2×5 , 3×1 , 3×2 , 3×3 ve 3×5) için incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.36-4.47’ de verilmiştir. Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, 10.12 kPa düşey gerilme altında tüm deney numunelerinde artan hücre yüksekliği ile artmaktadır (Şekil 4.37-4.48). Hücre yüksekliğinin çekme kapasitesine etkisinin incelenmesi amacıyla 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilmeler altında elde edilen çekme kuvveti-deplasman ilişkileri ise EK-1 ‘de detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Deney konfigürasyonu 1×1 olan hücresel yapı elemanlarında hücre yüksekliği 100 mm için çekme kapasitesi 1.04 kN iken hücre yüksekliği 150 mm için çekme kapasitesi 1.60 kN ‘olarak belirlenmiştir. Hücresel yapı elemanın çekme kapasitesi hücre yüksekliğinin artması ile yaklaşık olarak %60 artmaktadır. Bu durum aynı konfigürasyona sahip tüm deney numunelerinde de benzer şekilde gözlemlenmiştir. Hücresel yapı eleman yüksekliğinin, çekme kapasitesi üzerinde etkisini ortaya koymak amacıyla Çizelge 4.5 oluşturulmuştur. Aynı konfigürasyona sahip farklı düşey gerilmeler altında tüm deney numuneleri için hücre

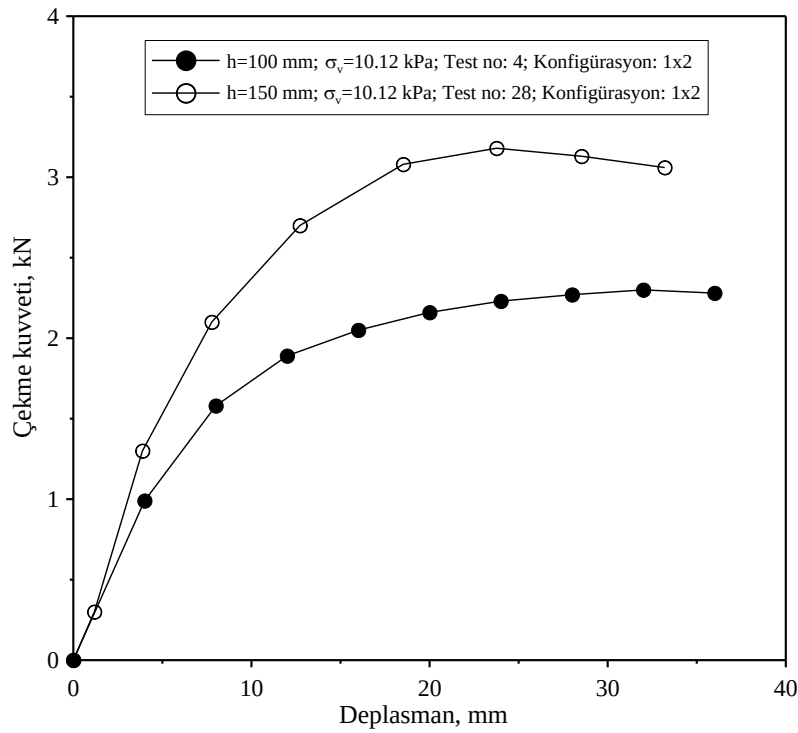
yüksekliği arttıkça çekme kapasitelerinin arttığı gözlemlenmiştir (Çizelge 4.5). Aynı konfigürasyona sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilmeler altında hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi özet halinde Şekil 4.49-4.51’ de verilmiştir. Artan hücre yüksekliği ile hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan sürtünme ve pasif direnç alanlarının artması sonucunda, çekme kapasiteleri artmaktadır. Dolayısıyla hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitesini belirleyen bir diğer faktörün de hücre yüksekliği olduğu ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.5. Hücresel yapı elemanları yüksekliklerinin çekme kapasitesi ile değişimi

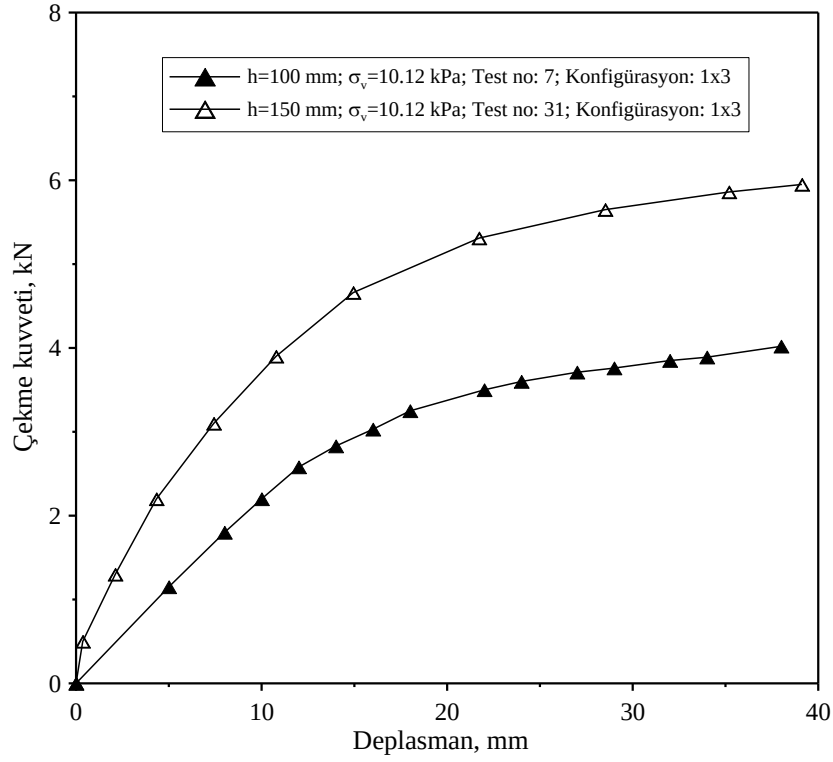
Test No	Konfigürasyon	Genişlik, B (mm)	Boy, L (mm)	Düşey gerilme, σ_v (kPa)	Çekme kapasitesi, kN	
					h=100 mm	h=150 mm
1, 25	1x1	130	170	10.12	1.04	1.60
2, 26	1x1	130	170	18.10	1.64	2.40
3, 27	1x1	130	170	31.40	2.37	3.45
4, 28	1x2	130	340	10.12	2.30	3.20
5, 29	1x2	130	340	18.10	3.40	4.60
6, 30	1x2	130	340	31.40	4.20	6.00
7, 31	1x3	130	510	10.12	4.00	5.80
8, 32	1x5	130	850	10.12	4.10	6.00
9, 33	2x1	260	170	10.12	1.49	2.10
10, 34	2x1	260	170	18.10	2.30	3.20
11, 35	2x1	260	170	31.40	3.40	4.86
12, 36	2x2	260	340	10.12	3.25	4.25
13, 37	2x2	260	340	18.10	4.60	6.00
14, 38	2x2	260	340	31.40	6.00	8.40
15, 39	2x3	260	510	10.12	5.50	8.15
16, 41	2x5	260	850	10.12	6.00	9.00
17, 42	3x1	390	170	10.12	1.77	2.32
18, 43	3x1	390	170	18.10	2.41	3.60
19, 44	3x1	390	170	31.40	4.10	5.76
20, 45	3x2	390	340	10.12	4.32	6.00
21, 46	3x2	390	340	18.10	5.90	7.80
22, 47	3x2	390	340	31.40	7.90	10.40
23, 48	3x3	390	510	10.12	6.00	9.50
24, 50	3x5	390	850	10.12	7.60	10.00



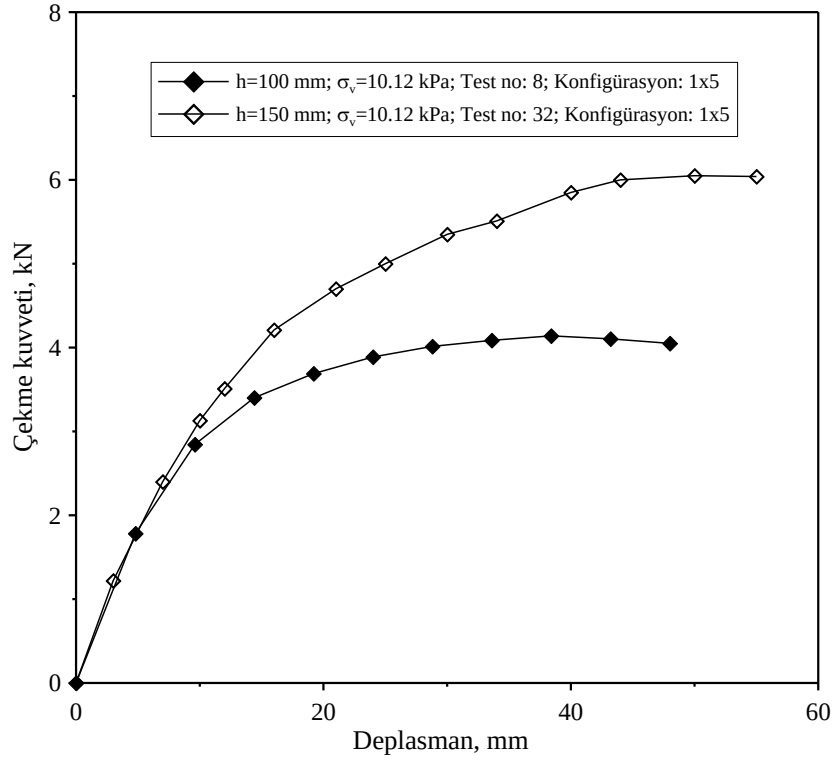
Şekil 4.37. Konfigürasyonu 1x1 olan hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



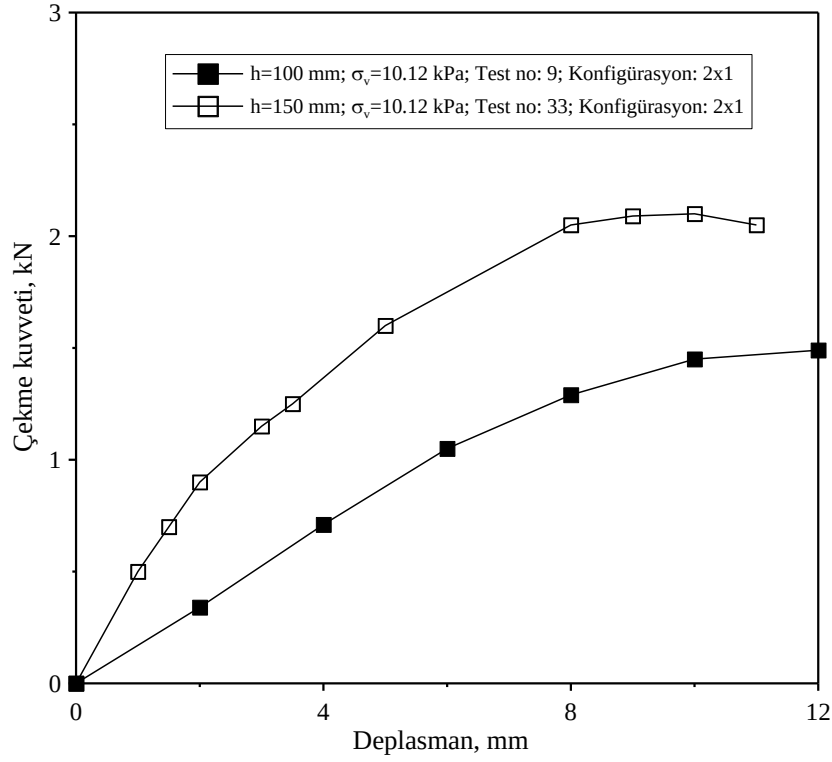
Şekil 4.38. Konfigürasyonu 1x2 olan hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



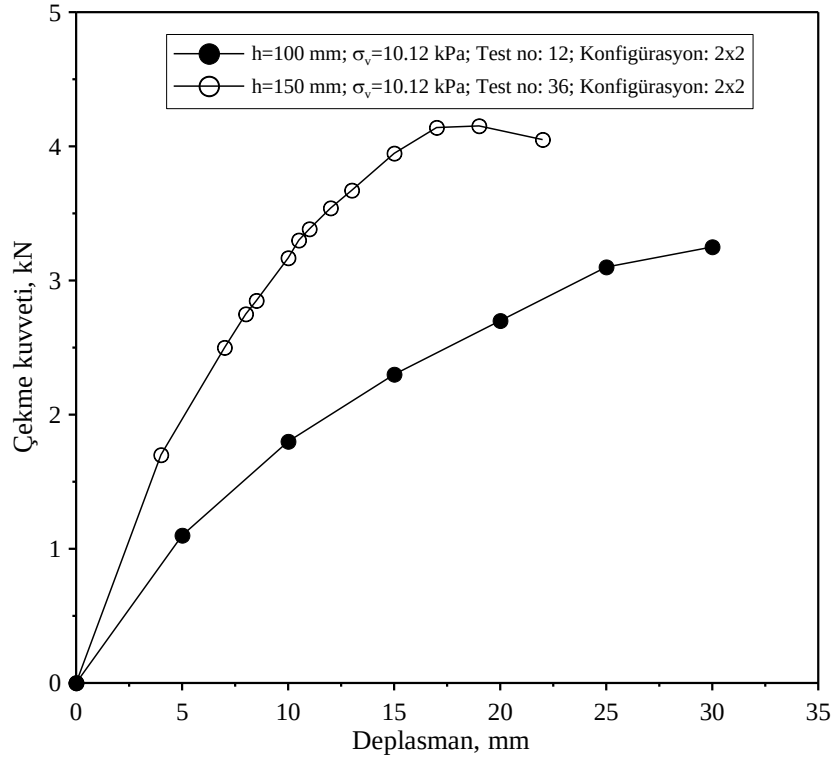
Şekil 4.39. Konfigürasyonu 1x3 olan hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



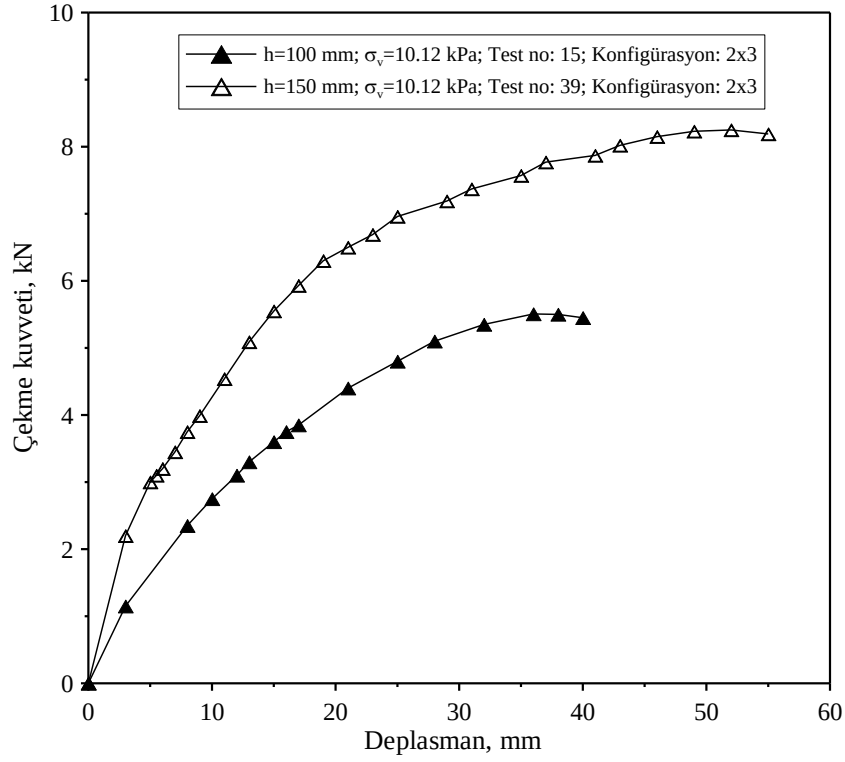
Şekil 4.40. Konfigürasyonu 1x5 olan hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



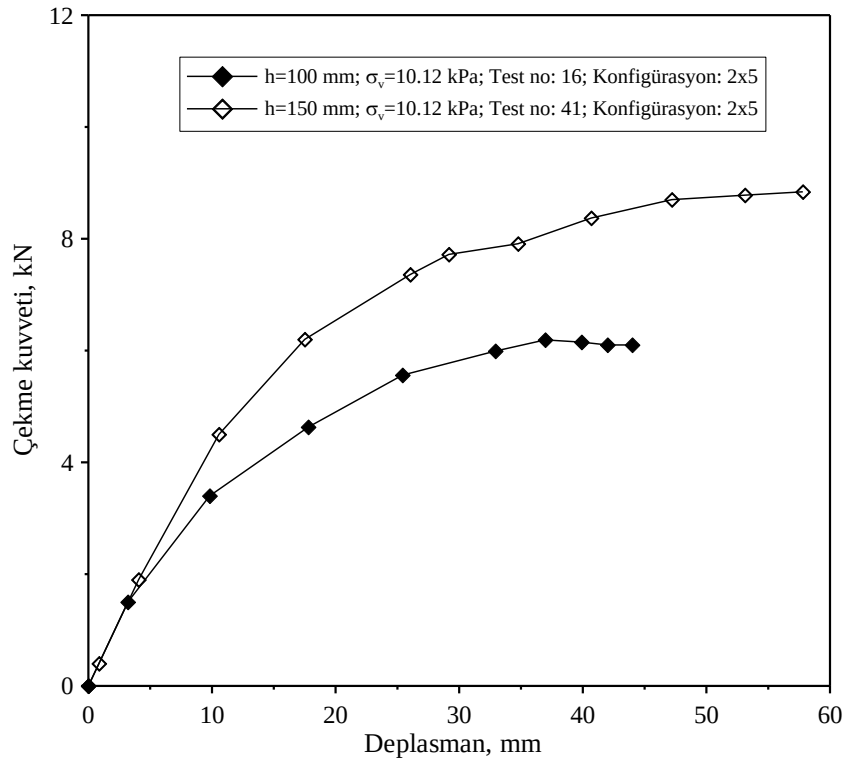
Şekil 4.41. Konfigürasyonu 2x1 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



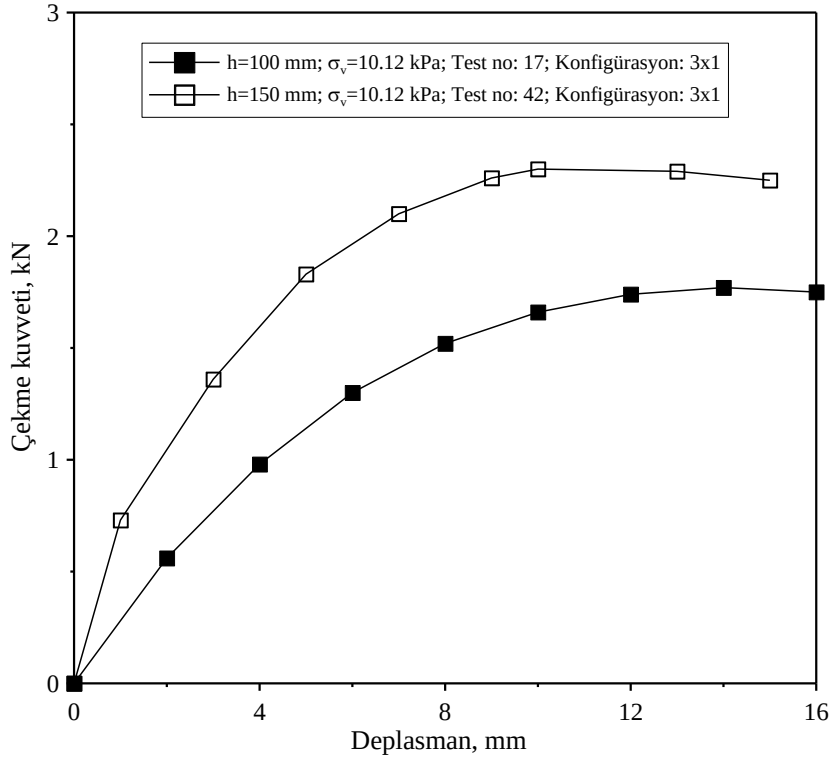
Şekil 4.42. Konfigürasyonu 2x2 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



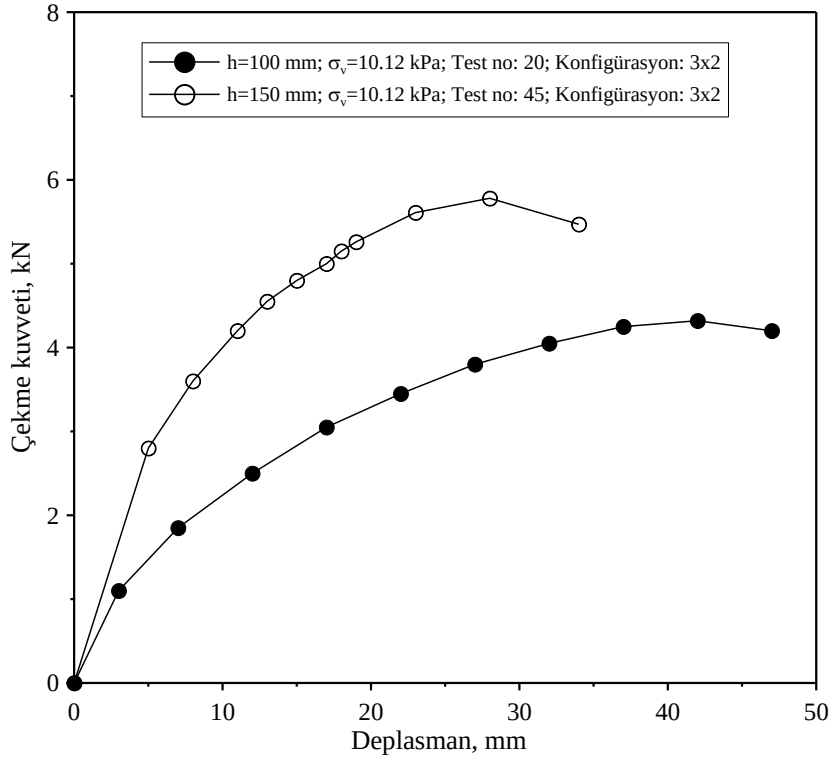
Şekil 4.43. Konfigürasyonu 2x3 olan hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



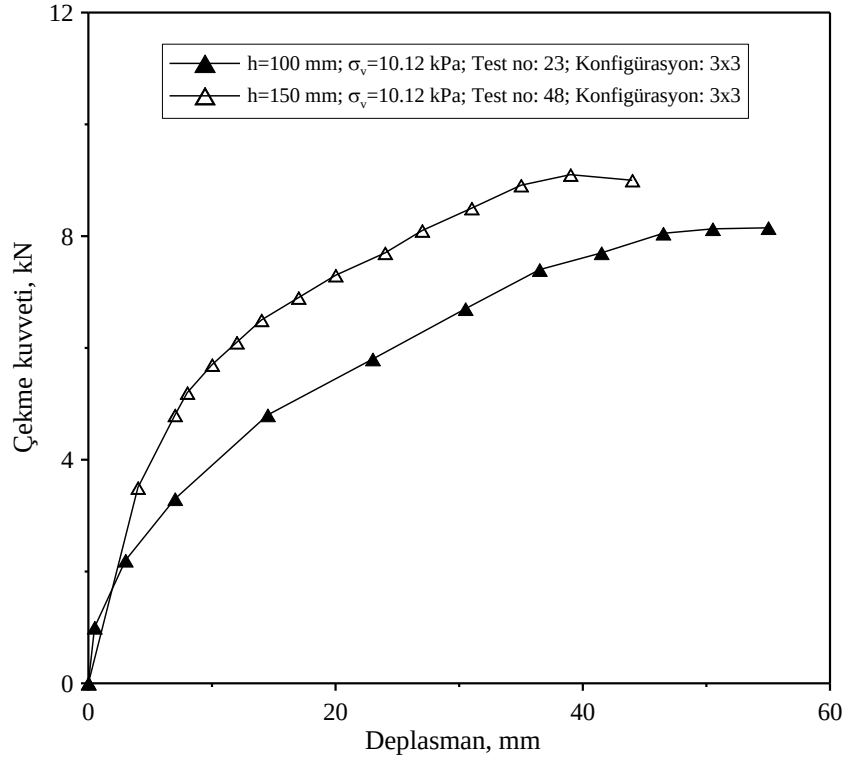
Şekil 4.44. Konfigürasyonu 2x5 olan hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



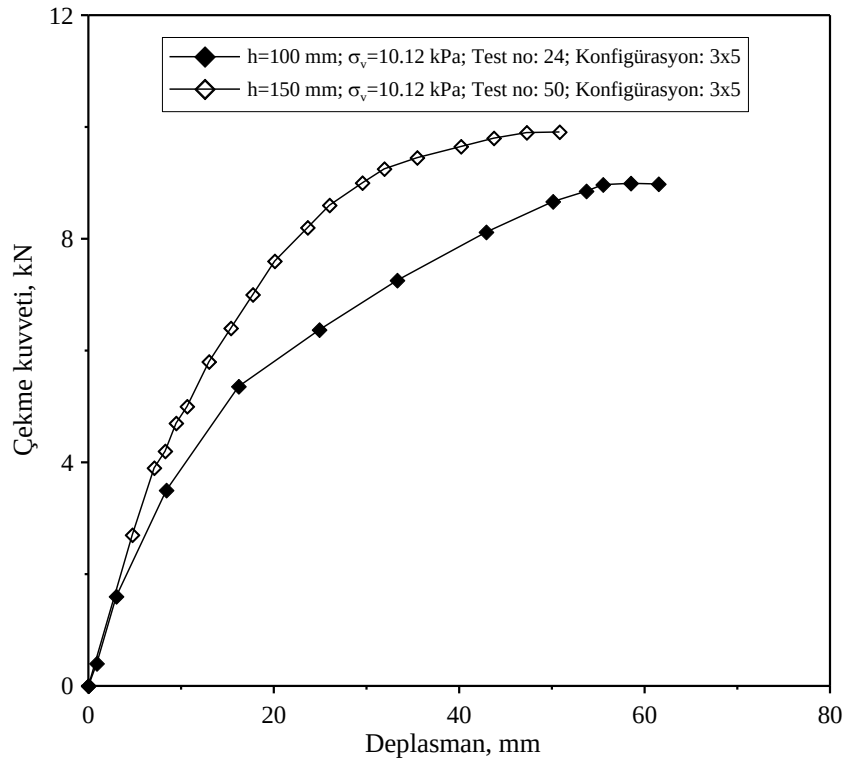
Şekil 4.45. Konfigürasyonu 3x1 olan hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



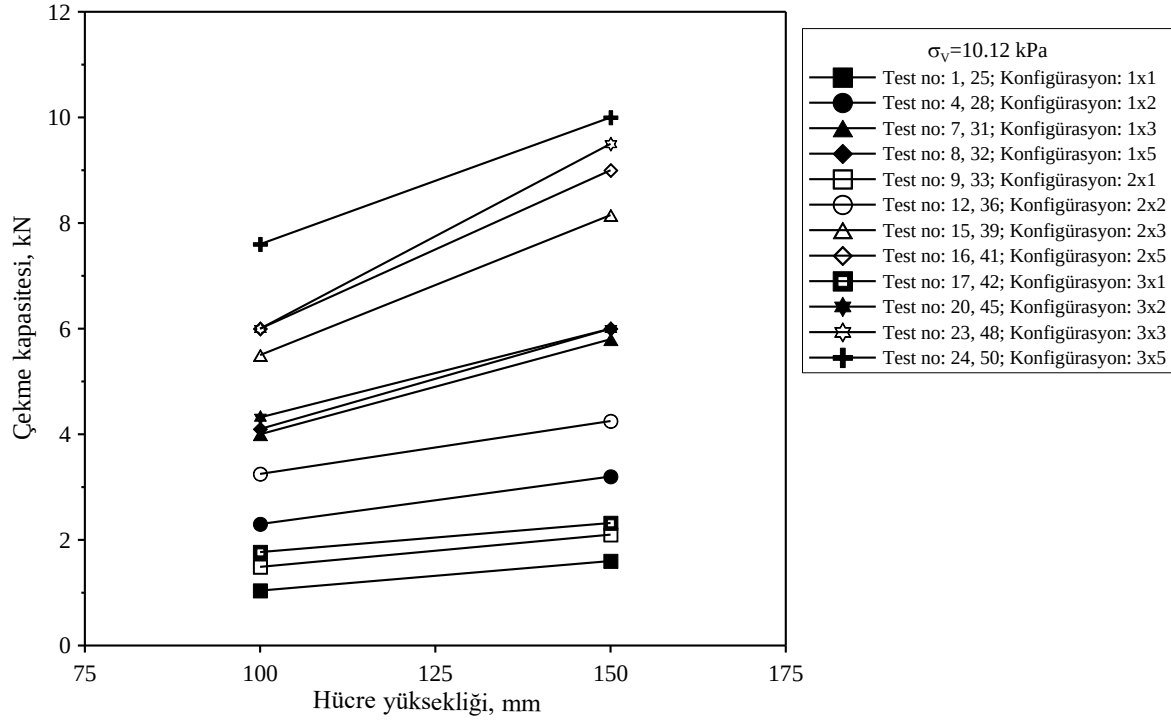
Şekil 4.46. Konfigürasyonu 3x2 olan hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



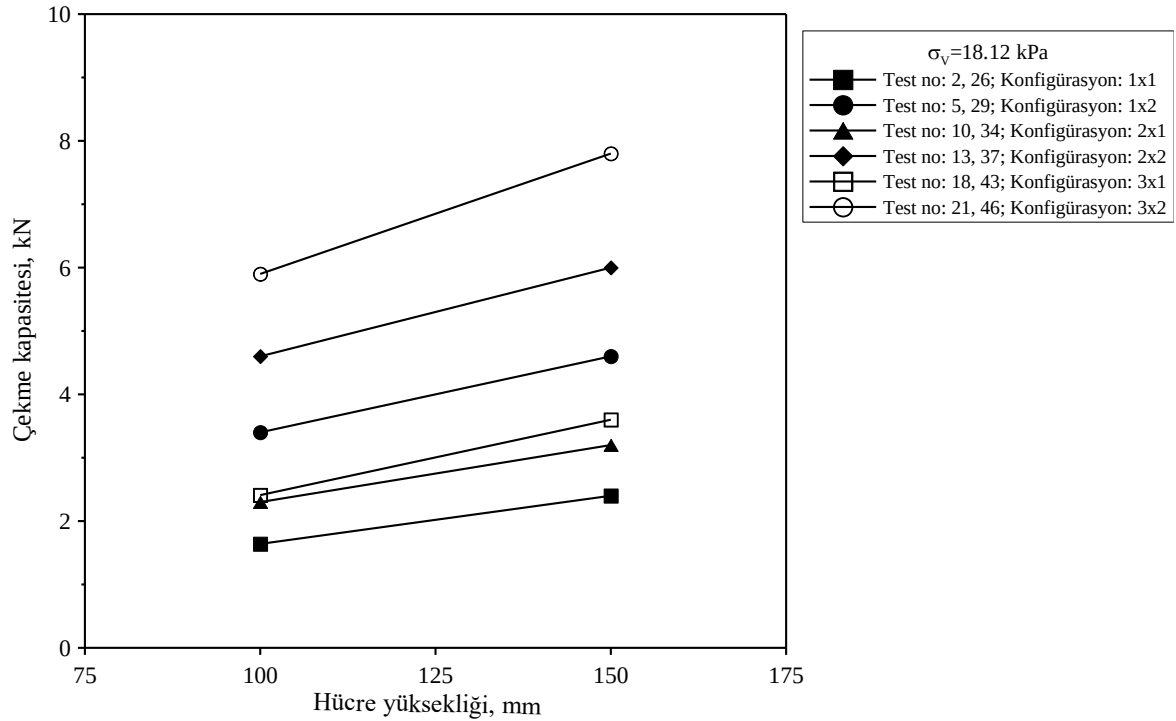
Şekil 4.47. Konfigürasyonu 3x3 olan hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



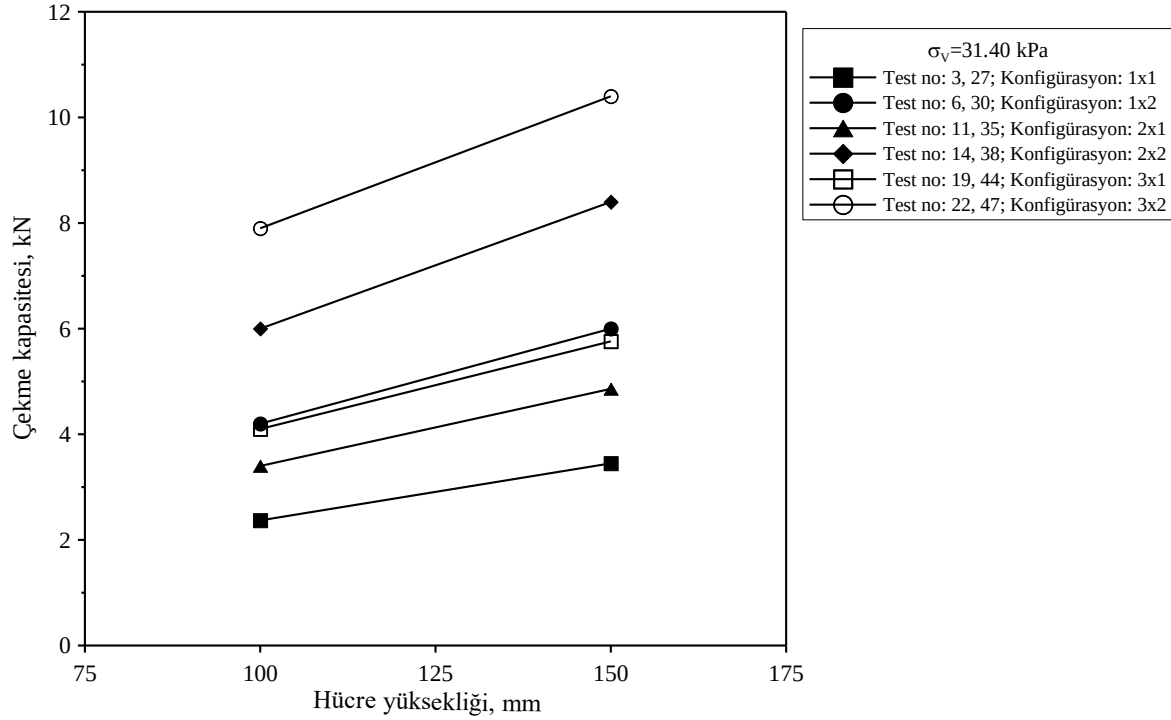
Şekil 4.48. Konfigürasyonu 3x5 olan hüresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkisinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



Şekil 4.49. Konfigürasyonları 1x1, 1x2, 1x3, 1x5, 2x1, 2x2, 2x3, 2x5, 3x1, 3x2, 3x3 ve 3x5 olan hücresel yapı elemanlarının 10.12 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitelerinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



Şekil 4.50. Konfigürasyonları 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 olan hücresel yapı elemanlarının 18.10 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitelerinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi



Şekil 4.51. Konfigürasyonları 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 olan hücresel yapı elemanlarının 31.40 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitelerinin hücre yüksekliğine bağlı olarak değişimi

4.4. Hücre Sayısının (S) Hücresel Yapı Elemanın Çekme Kapasitesine Etkisi

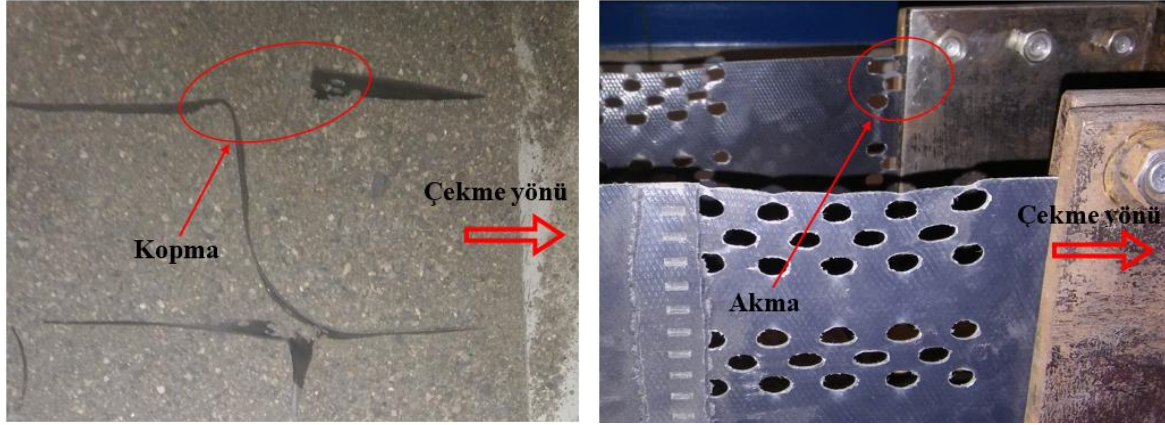
Üç boyutlu ve hücresel bir yapıya sahip hücresel yapı elemanları boyuna ve enine elamanların birbirlerine bağlanmasından oluşmaktadır. Hücresel yapı elemanlarının kohezyonsuz zeminler içerisindeki çekme kapasiteleri, hücresel yapı elemanını oluşturan boyuna ve enine donatı elemanlarının sayısına ve yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir (Bergado ve Chai, 1994; Bergado ve diğ., 1996; Palmeira, 2009; Horpibulsuk ve Niramitkornburee, 2010; Isik ve Gurbuz, 2018; Işık ve Gürbüz, 2020). Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, farklı hücre yüksekliğinde ve düşey gerilmeler altında hücresel yapı elemanın boyuna (L), genişliğine (B) ve hücre sayısına (S) bağlı olarak incelenmiştir (Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1).

Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, hücresel yapı elemanı boyuna (L), genişliğine (B) ve hücre sayısına (S) göre incelenmiş ve elde edilen ilişkiler Çizelge 4.6’ da verilmiştir. Çekme kapasiteleri ile (L/B)*S değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.52-4.54’ te grafik olarak verilmiştir. Düşük düşey gerilme ($\sigma_v=10.12$ kPa) altında, çekme yükü doğrultusunda bulunan boyuna hücre elemanı sayısı üçten fazla olduğu durumlarda hücresel yapı elemanlarının kohezyonsuz zeminler içerisindeki çekme kapasiteleri değişmemektedir

(Şekil 4.52). Yüksek düşey gerilmeler (18.10 ve 31.40 kPa) altında malzeme çekme dayanımlarına ($T_u=18$ kN/m) ulaşan hücresel yapı elemanlarının boyuna ve enine donatı elemanlarının birleştiği kaynak bölgelerinde kopmalar veya çekme doğrultusunda bulunan boyuna donatı elemanları üzerinde aşırı deformasyonlardan kaynaklı akmalar meydana gelmektedir (Resim 4.1).

Çizelge 4.6. Hücresel yapı elemanları boyutlarının ve hücre sayısının çekme kapasitesine etkisi

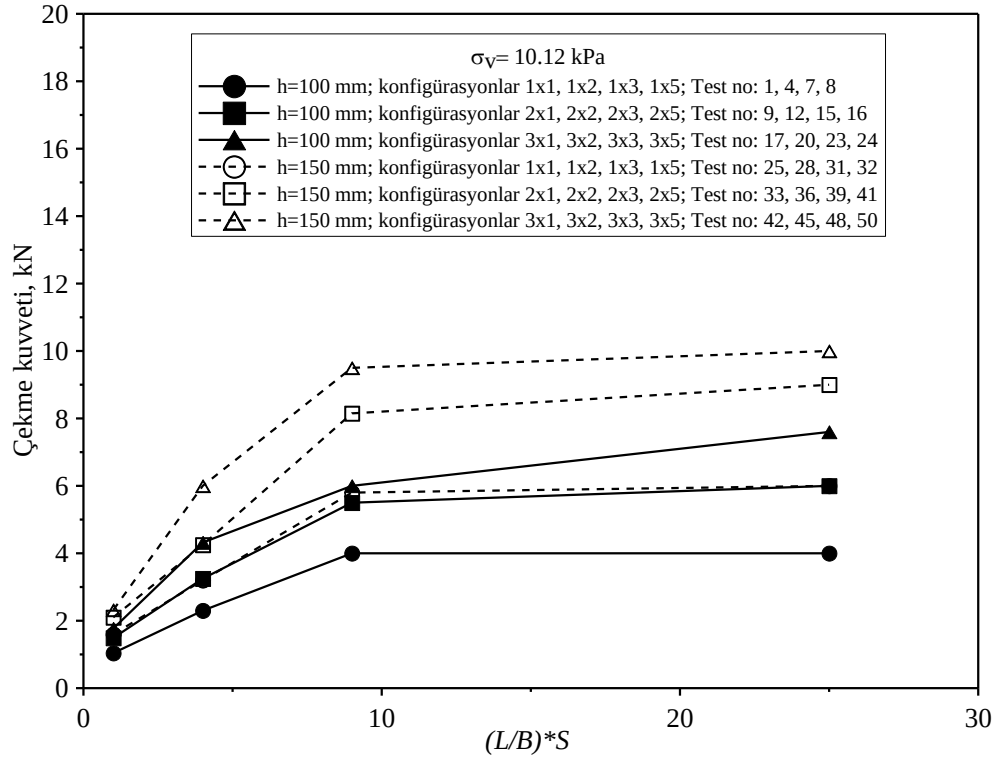
Test No	Konfigürasyon	Düşey gerilme, σ_v (kPa)	Boy, L (mm)	Genişlik, B (mm)	Hücre sayısı, S	$(L/B)*S$	Çekme kapasitesi, kN	
							h=100 mm	h=150 mm
1, 25	1x1	10.12	170	130	1	1.308	1.04	1.60
2, 26	1x1	18.10	170	130	1	1.308	1.64	2.40
3, 27	1x1	31.40	170	130	1	1.308	2.37	3.45
4, 28	1x2	10.12	340	130	2	5.231	2.30	3.20
5, 29	1x2	18.10	340	130	2	5.231	3.40	4.60
6, 30	1x2	31.40	340	130	2	5.231	4.20	6.00
7, 31	1x3	10.12	510	130	3	11.769	4.00	5.80
8, 32	1x5	10.12	850	130	5	32.692	4.10	6.00
9, 33	2x1	10.12	170	260	2	1.308	1.49	2.10
10, 34	2x1	18.10	170	260	2	1.308	2.30	3.20
11, 35	2x1	31.40	170	260	2	1.308	3.40	4.86
12, 36	2x2	10.12	340	260	4	5.231	3.25	4.25
13, 37	2x2	18.10	340	260	4	5.231	4.60	6.00
14, 38	2x2	31.40	340	260	4	5.231	6.00	8.40
15, 39	2x3	10.12	510	260	6	11.769	5.50	8.15
40	2x3	18.10	510	260	6	11.769	-	9.00
16, 41	2x5	10.12	850	260	10	32.692	6.00	9.00
17, 42	3x1	10.12	170	390	3	1.308	1.77	2.32
18, 43	3x1	18.10	170	390	3	1.308	2.41	3.60
19, 44	3x1	31.40	170	390	3	1.308	4.10	5.76
20, 45	3x2	10.12	340	390	6	5.231	4.32	6.00
21, 46	3x2	18.10	340	390	6	5.231	5.90	7.80
22, 47	3x2	31.40	340	390	6	5.231	7.90	10.40
23, 48	3x3	10.12	510	390	9	11.769	6.00	9.50
49	3x3	18.10	510	390	9	11.769	-	11.10
24, 50	3x5	10.12	850	390	15	32.692	7.60	10.00



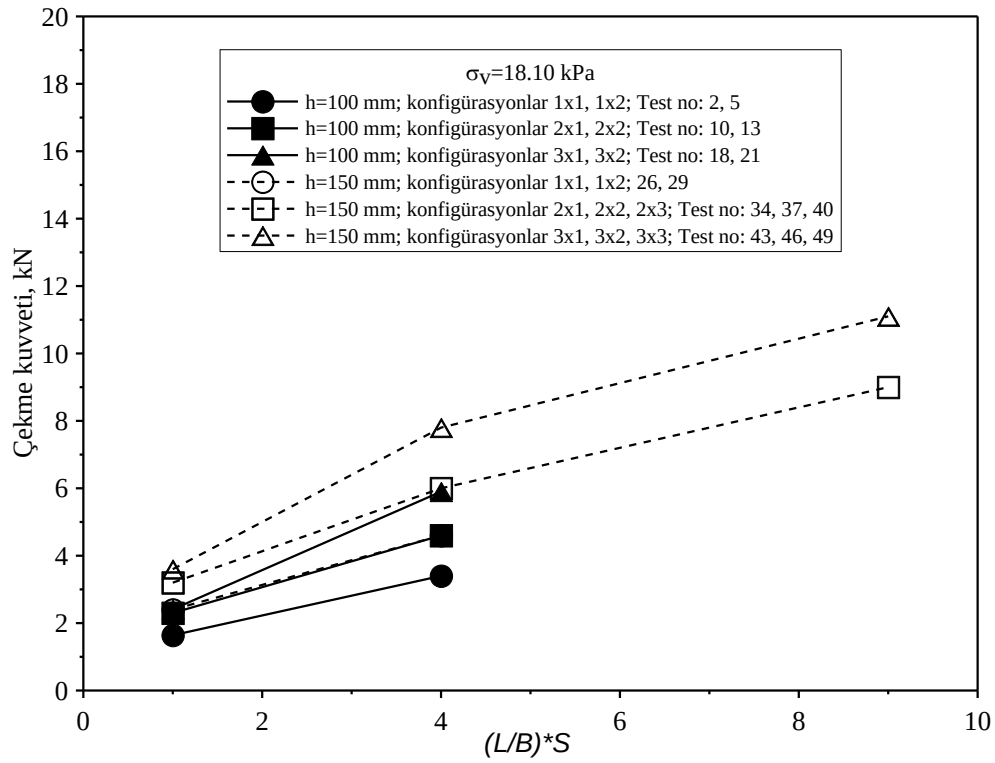
Resim 4.1. Hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan kopma ve akma yenilmeleri

16, 23, 24, 31, 32, 41 ve 50 No' lu deney numuneleri ile aynı hücre boyutlarına sahip numuneler üzerinde 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında boyuna ve enine donatı elemanlarının birleştiği bölgelerde kopma oluşması nedeniyle, çekme deneyleri gerçekleştirilememiştir (Şekil 4.53 ve 4.54). Bu bakımdan Şekil 4.53 ve 4.54' te yüksek düşey gerilmeler (18.10 ve 31.40 kPa) altında hücre yükseklikleri 100 ve 150 mm, konfigürasyonları 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 3x1 ve 3x2 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerinin hücre boyutları ve hücre sayısına bağlı değişimleri verilmiştir.

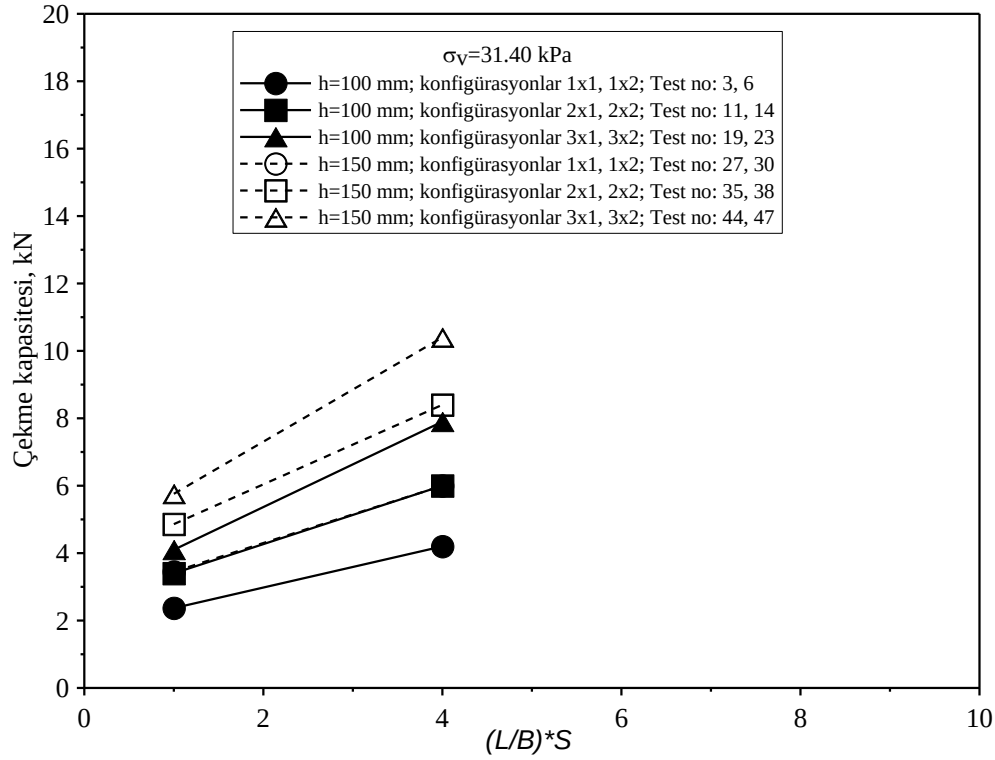
Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, artan hücre boyutları (genişlik, boy ve yükseklik) ve hücre sayısına bağlı olarak artmaktadır (Şekil 4.53 ve 4.54). Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, çekme yükünün uygulandığı ve hücresel yapı elemanın boyuna doğrultusu üzerinde bulunan hücre sayısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Hücresel yapı elemanı boyu doğrultusunda üçten fazla hücre sayısı olması durumunda çekme kapasitesi belirgin olarak değişmemektedir. Çekme kapasitesinde belirgin olmayan bu değişim, hücresel yapı elemanının malzeme çekme dayanımı ile açıklanabilmektedir. Hücresel yapı elemanı boyuna hücre sayısının üç ve beş adet olduğu durumlarda, hücresel yapı elemanı çekme dayanıma (T_u) ulaşmaktadır. Buna göre, bu çalışmada rijitliği düşük olan bir hücresel yapı elemanının çekme kapasitesi, çekme doğrultusunda bulunan hücre sayısı üç adetten fazla olması durumunda değişmemekte olup malzemenin çekme dayanımına eşit olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri büyük ölçüde hücresel yapı elemanına ait malzeme çekme dayanımına bağlı olduğu görülmüştür.



Şekil 4.52. Hücre boyutlarının ve sayısının 10.12 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitesine olan etkisi



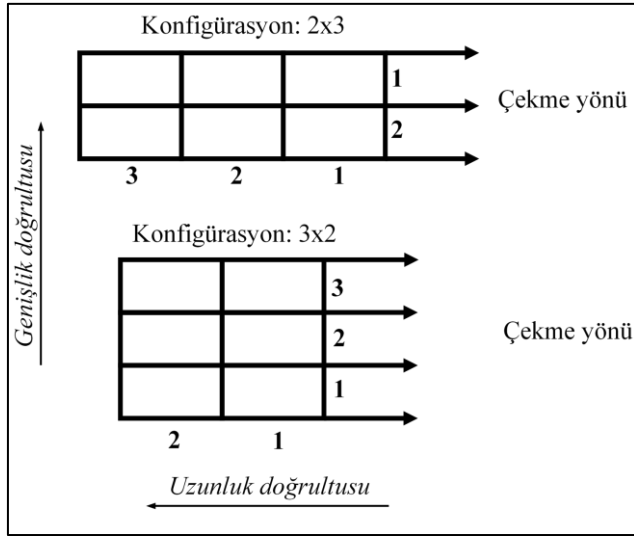
Şekil 4.53. Hücre boyutlarının ve sayısının 18.10 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitesine olan etkisi



Şekil 4.54. Hücre boyutlarının ve sayısının 31.40 kPa düşey gerilme altında çekme kapasitesine olan etkisi

4.5. Hücresel Yapı Elemanlarının Yerleşim Konfigürasyonlarının Çekme Kuvvetine Etkisi

Hücresel yapı elemanların kohezyonsuz zeminler içerisindeki çekme kapasitesini etkileyen bir diğer parametre ise hücresel yapı elemanın zemin ortamındaki yerleşim konfigürasyonudur. Hücre sayıları (S) eşit olan fakat zeminler içerisindeki yerleşim konfigürasyonları farklı olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, hücre boyutlarına ve sayısına bağlı olarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında aynı hücre sayısına sahip hücresel yapı elemanlarının deneysel çalışmaya yönelik iki farklı yerleşim konfigürasyonuna ait bir örnek Şekil 4.55’ te sunulmuştur. Hücre sayısı (S) eşit olan deney numuneleri uzunluk ve genişlik doğrultusunda farklı hücre sayılarında hazırlanmıştır. Toplam hücre sayıları (S) 2, 4, ve 6 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri farklı yerleşim konfigürasyonlarında (1x2, 2x1, 1x3, 3x1, 2x3 ve 3x2) hazırlanan deney numuneleri için belirlenmiştir. Hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının, çekme kuvveti-deplasman davranışına etkisi hücre sayıları 2, 3 ve 6 olan deney numuneleri için sırasıyla Şekil 4.56, 4.57 ve 4.58’ de verilmiştir.



Şekil 4.55. Aynı hücre sayısına fakat farklı konfigürasyonlara sahip hücresel yapı elemanlarının yerleşim planı

Hücre sayısı (S) eşit fakat eleman boyu yüksek olan deney numunelerinin çekme kapasitelerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 1x2 ve 2x1 konfigürasyonlarına sahip ve hücre yüksekliği 100 mm olan deney numunelerinde, eleman boyu 340 mm olan numunenin çekme kapasitesi 2.30 kN iken eleman boyu 170 mm olan numunenin çekme kapasitesi ise 1.49 kN olarak belirlenmiştir. Aynı hücre sayısına sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri büyük ölçüde eleman boyuna bağlı olarak değişmektedir. Şekil 4.56 'da verilen ve yukarıda ifade edilen bu durumun hücre sayısı eşit olan diğer deney numuneleri içinde geçerli olduğu Şekil 4.57 ve 4.58' de açıkça görülmektedir. Ayrıca bu çalışma kapsamında, hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kapasitelerine etkisi, aynı hücre sayısına eşit tüm deney numuneleri için Çizelge 4.7-4.9' da verilmiştir.

Hücre sayıları eşit fakat farklı yerleşim konfigürasyonlarına sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri ile hücre boyutları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Eşit hücre sayısına sahip deney numunelerinin çekme kapasiteleri, $(L/B)*S$ değerleri daha yüksek olan numunelerde yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.59-4.61). Burada numuneler aynı hücre sayısına sahip olduğu için çekme kapasitelerini belirleyen en önemli faktörün L/B oranı olduğu açıkça görülmektedir. Dolayısıyla hücre sayıları eşit fakat L/B oranları yüksek olan deney numunelerinin çekme kapasiteleri de yüksek olmaktadır. Sonuç olarak bu çalışma kapsamında eşit hücre sayısına sahip fakat farklı boy (L) genişlik (B) oranlarına sahip numunelerin çekme kapasiteleri farklılık göstermekte olup hücre sayısının çekme kapasitesine etkisinin tek başına yeterli olmadığı ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.7. Toplam hücre sayısı iki olan hücresel yapı elemanları konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi

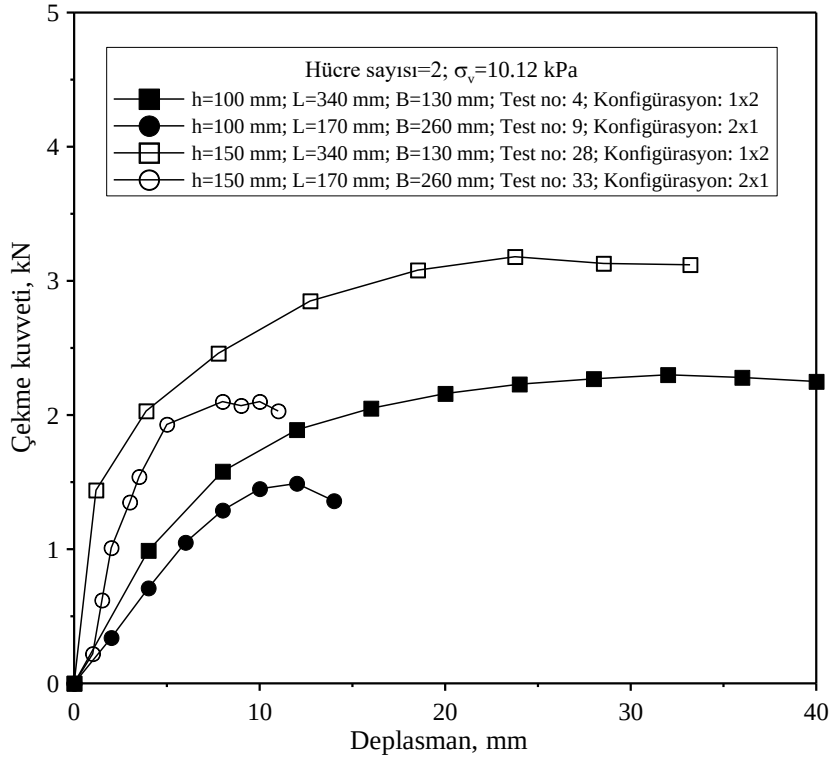
Test No	Düşey gerilme, σ_v (kPa)	Yükseklik, h (mm)	Çekme kuvveti, kN	
			Hücre sayısı (S) = 2	
			Konfigürasyon: 1x2 (L/B)*S=5.231	Konfigürasyon: 2x1 (L/B)*S=1.308
4, 9	10.12	100	2.30	1.49
5, 10	18.10	100	3.40	2.30
6, 11	31.40	100	4.21	3.40
28, 33	10.12	150	3.20	2.10
29, 34	18.10	150	4.60	3.20
30, 35	31.40	150	6.00	4.86

Çizelge 4.8. Toplam hücre sayısı üç olan hücresel yapı elemanları konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi

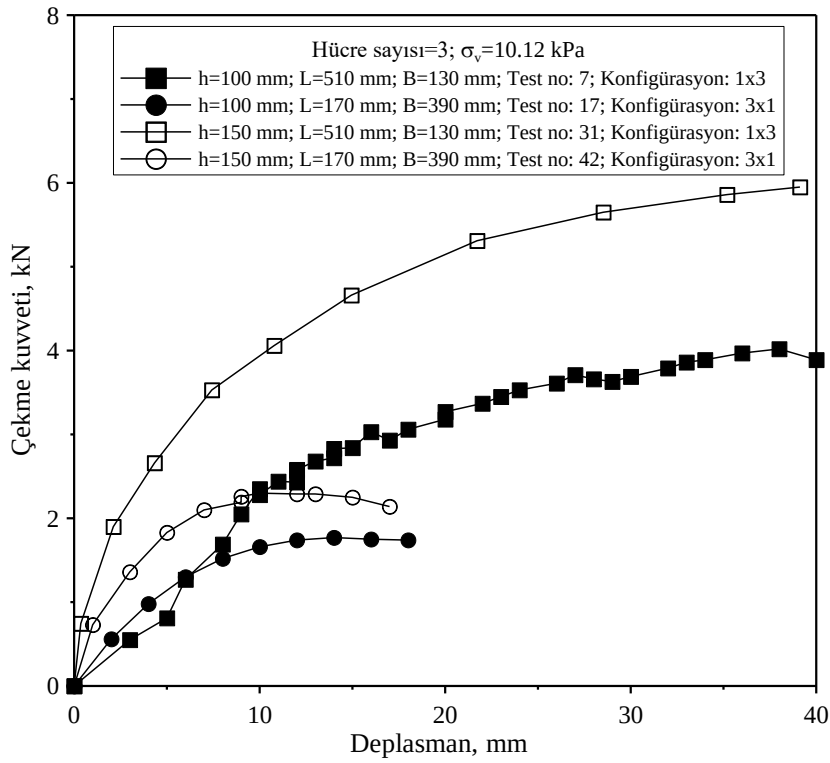
Test No	Düşey gerilme, σ_v (kPa)	Yükseklik, h (mm)	Hücre sayısı (S) = 3	
			Konfigürasyon: 1x3 (L/B)*S=11.769	Konfigürasyon: 3x1 (L/B)*S=1.308
7, 17	10.12	100	4.00	1.77
31, 42	10.12	150	5.80	2.32

Çizelge 4.9. Toplam hücre sayısı altı olan hücresel yapı elemanları konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi

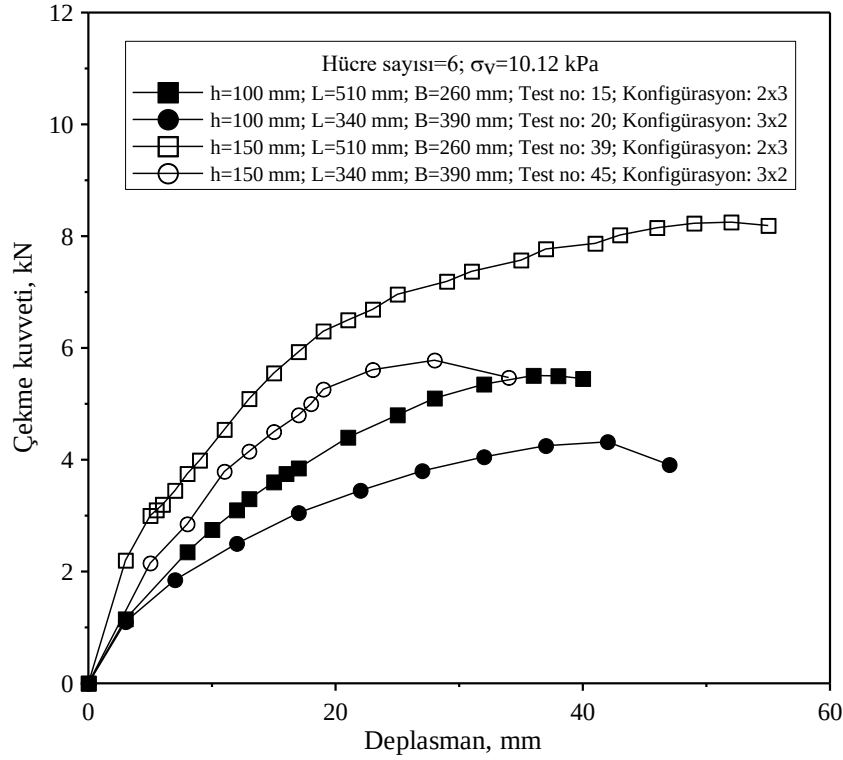
Test No	Düşey gerilme, σ_v (kPa)	Yükseklik, h (mm)	Hücre sayısı (S) = 6	
			Konfigürasyon: 2x3 (L/B)*S=11.769	Konfigürasyon: 3x2 (L/B)*S=5.231
15, 20	10.12	100	5.50	4.32
39, 45	10.12	150	8.15	6.00
40, 46	18.10	150	9.00	7.80



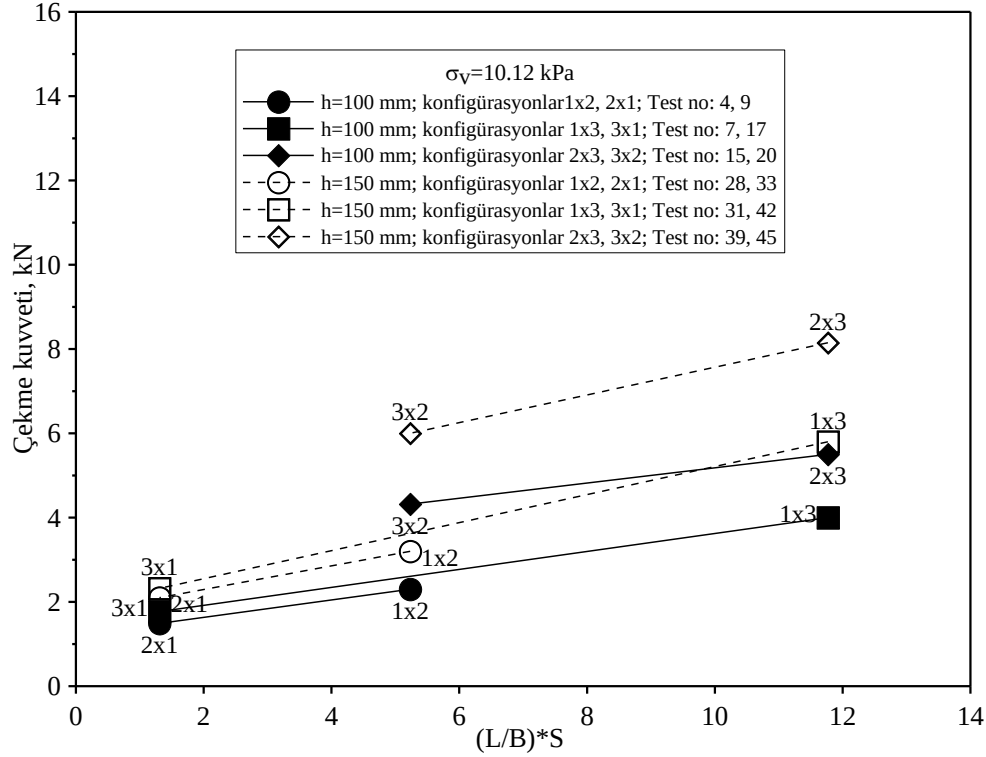
Şekil 4.56. Toplam hücre sayısı iki olan hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkilerine etkisi



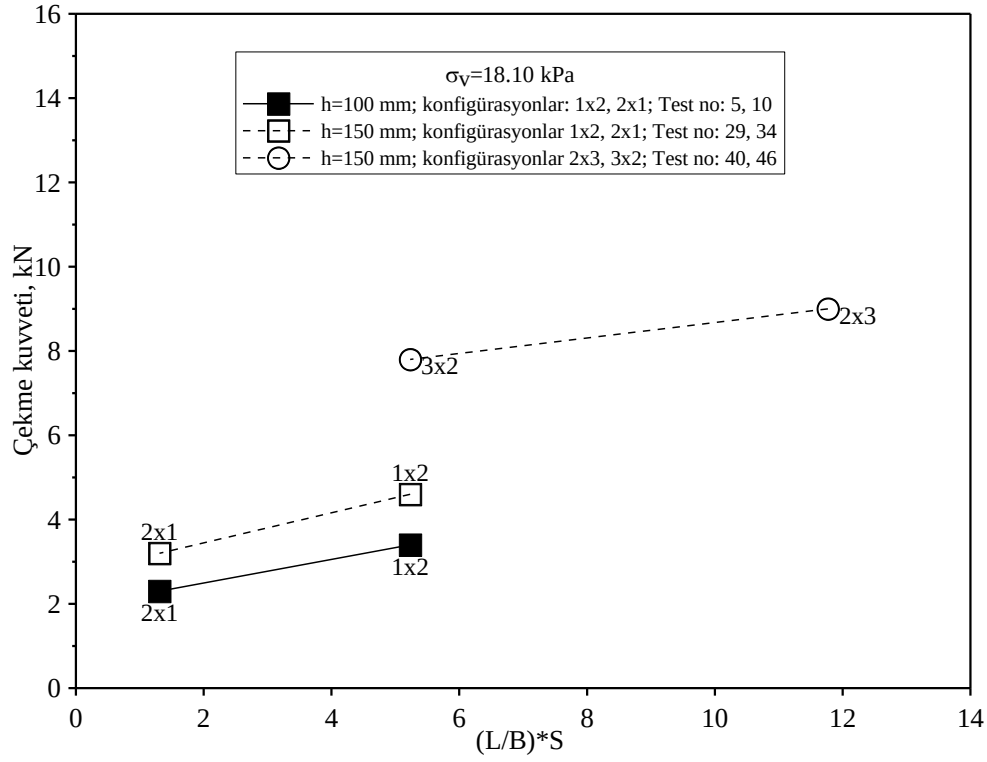
Şekil 4.57. Toplam hücre sayısı üç olan hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkilerine etkisi



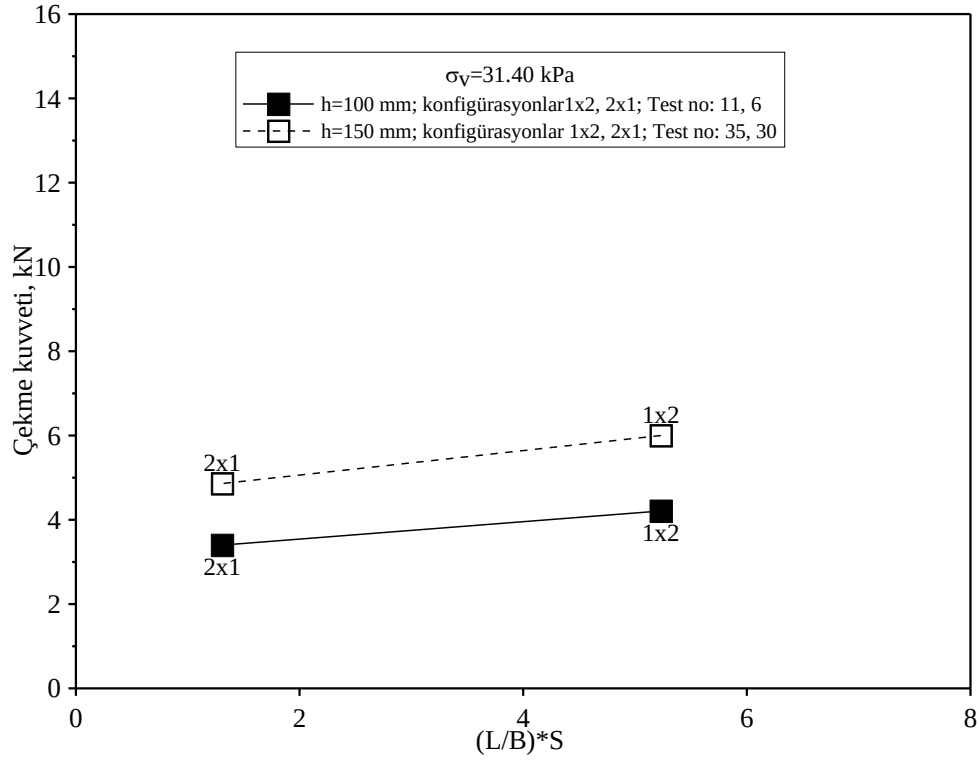
Şekil 4.58. Toplam hücre sayısı altı olan hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkilerine etkisi



Şekil 4.59. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi



Şekil 4.60. $\sigma_v=18.10 \text{ kPa}$ düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi

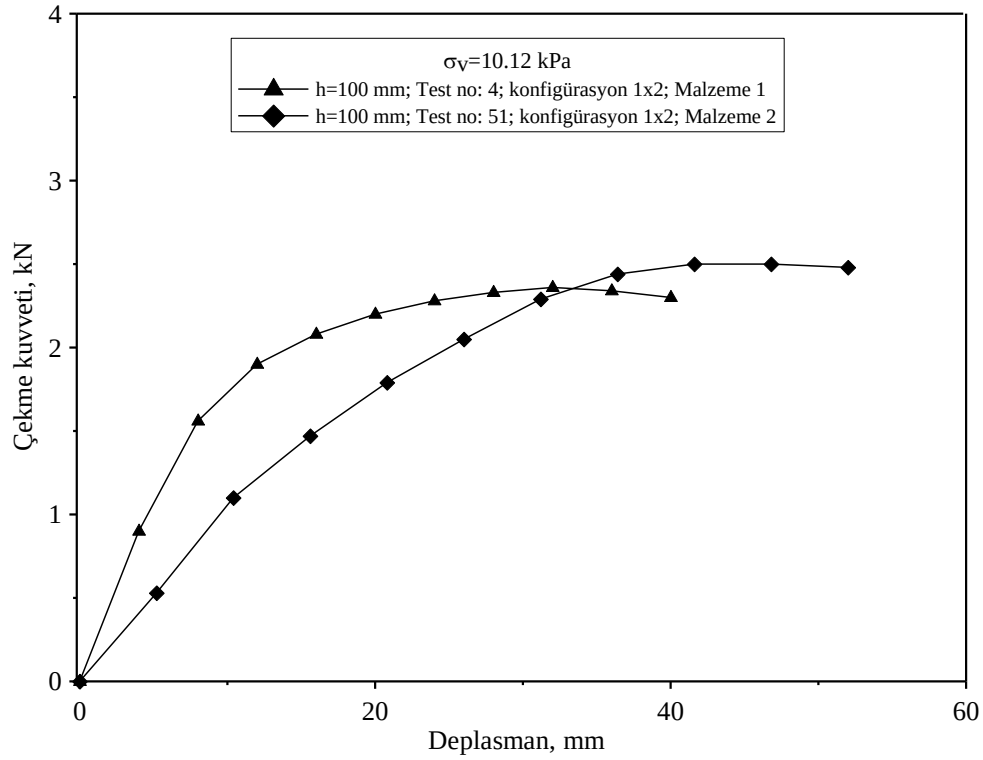


Şekil 4.61. $\sigma_v=31.40 \text{ kPa}$ düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının yerleşim konfigürasyonlarının çekme kapasitesine etkisi

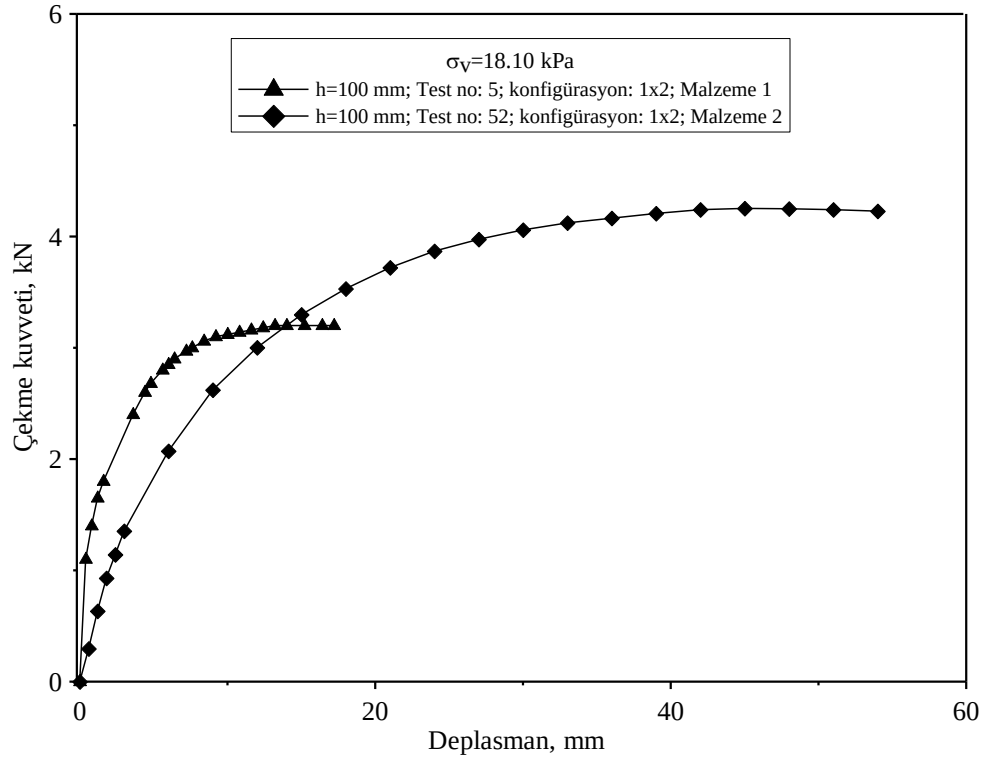
4.6. Hücresel Yapı Elemanları Rijitliğinin (E) Çekme Kapasitesine Etkisi

Bu çalışma kapsamında hücresel yapı elemanlarının rijitliğinin (E) kohezyonsuz zeminler içerisindeki ortaya koyacağı çekme kapasitesine etkisi incelenmiştir. Aynı deney koşulları altında ve aynı numune boyutlarında hazırlanan fakat iki farklı hücresel yapı elemanı malzeme rijitliğine ($E_1=2295$ kN/m, $E_2=1924$ kN/m) sahip olan deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman ilişkileri Şekil 4.62-4.66’ da verilmiştir. Malzeme 1 olarak adlandırılan ve daha rijit malzeme (elastisite modülü 2295 kN/m) olan hücresel yapı elemanları, pik çekme kuvvetlerine Malzeme 2’ye (elastisite modülü 1924 kN/m) göre daha düşük deplasman değerlerinde ulaştığı görülmektedir. Ayrıca Malzeme 1 ile hazırlanan hücresel yapı elemanının çekme kuvveti-deplasman eğrisinde maksimum çekme kuvveti Malzeme 2’ye göre daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu bakımdan daha düşük rijitliğe veya daha esnek malzeme türüne sahip hücresel yapı elemanlarının maksimum çekme kuvvetleri elemanlar üzerinde oluşan aşırı uzamalardan dolayı pik değerler göstermesi beklenmemektedir. Burada çekme kapasitelerini belirleyen en önemli faktörün hücresel yapı elemanı rijitliği veya elemanın malzeme çekme dayanımı olduğu açıkça anlaşılmaktadır.

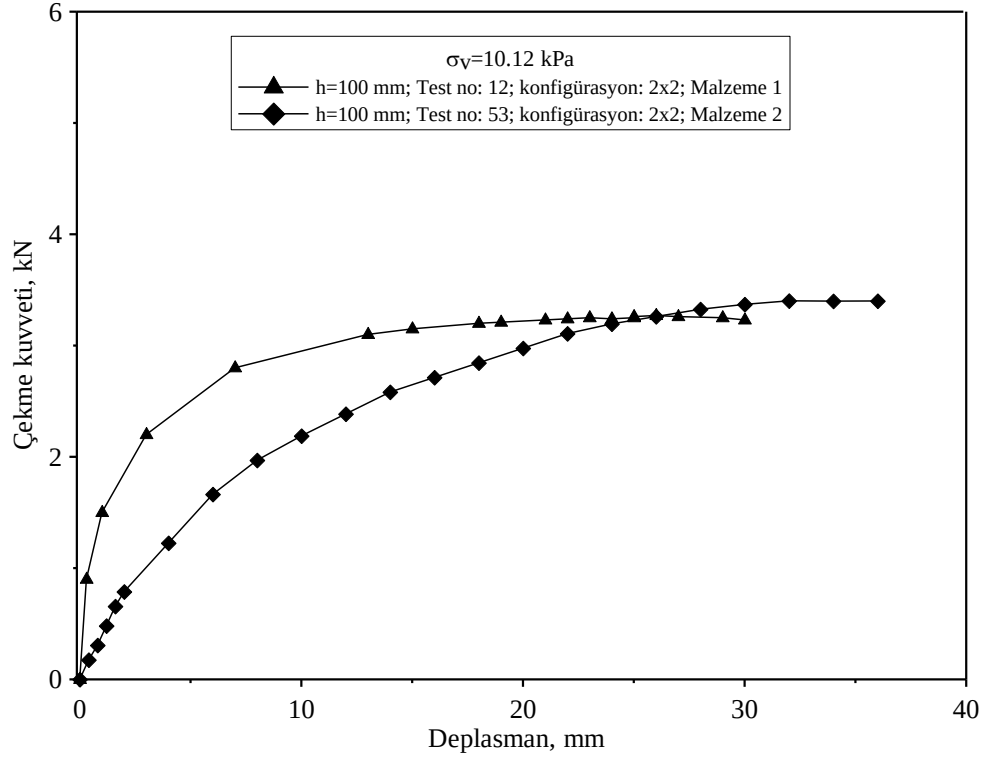
Hücresel yapı elemanı rijitliği (E) yüksek olan deney numuneleri, çekme kapasitelerine daha düşük deplasman değerlerinde ulaşmaktadır. Hücresel yapı elemanı rijitliğinin etkisini incelemek amacıyla, rijitliği yüksek olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerine ulaştıkları deplasman değerleri dikkate alınarak rijitliği düşük olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri belirlenmiştir. Buna göre, rijitliği yüksek olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerindeki deplasman değerleri ile rijitliği düşük olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri belirlenmiş ve elde edilen bulgular Şekil 4.67-68’ de verilmiştir. Aynı deplasman değerlerinde (rijitliği yüksek olan deney numunelerinin çekme kapasitelerine ulaştığı deplasman) rijitliği yüksek olan deney numunelerinin çekme kapasiteleri, rijitliği düşük olan hücresel yapı elemanlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.67).



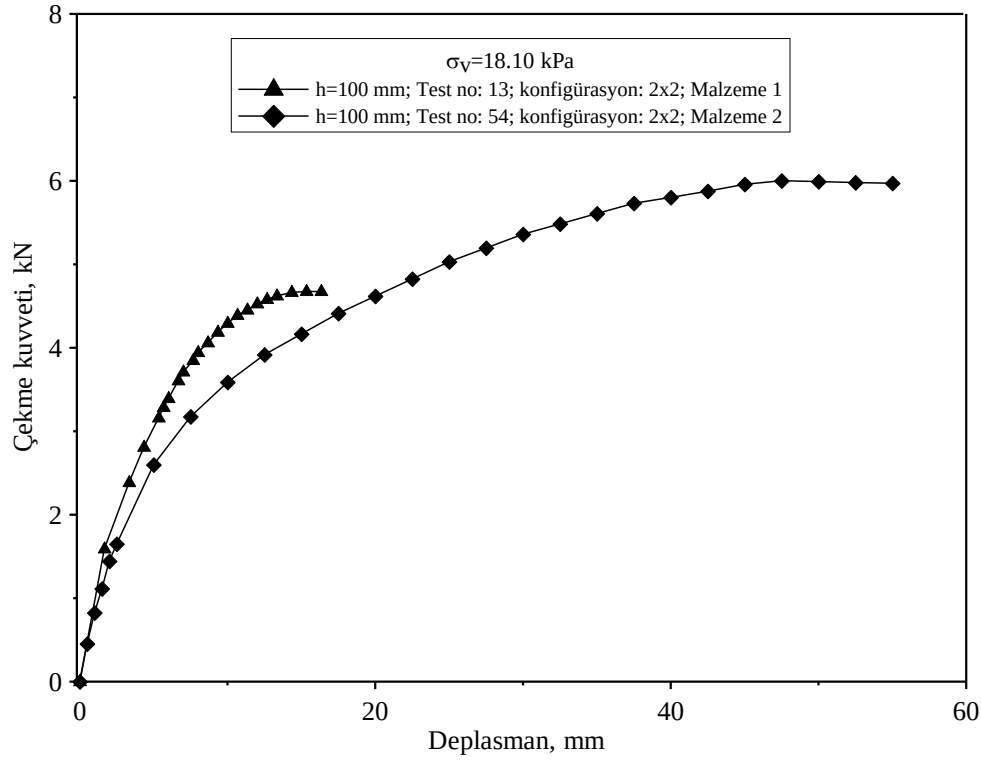
Şekil 4.62. $\sigma_v = 10.12$ kPa düşey gerilme altında konfigürasyonu 1x2 olan hücresel yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi



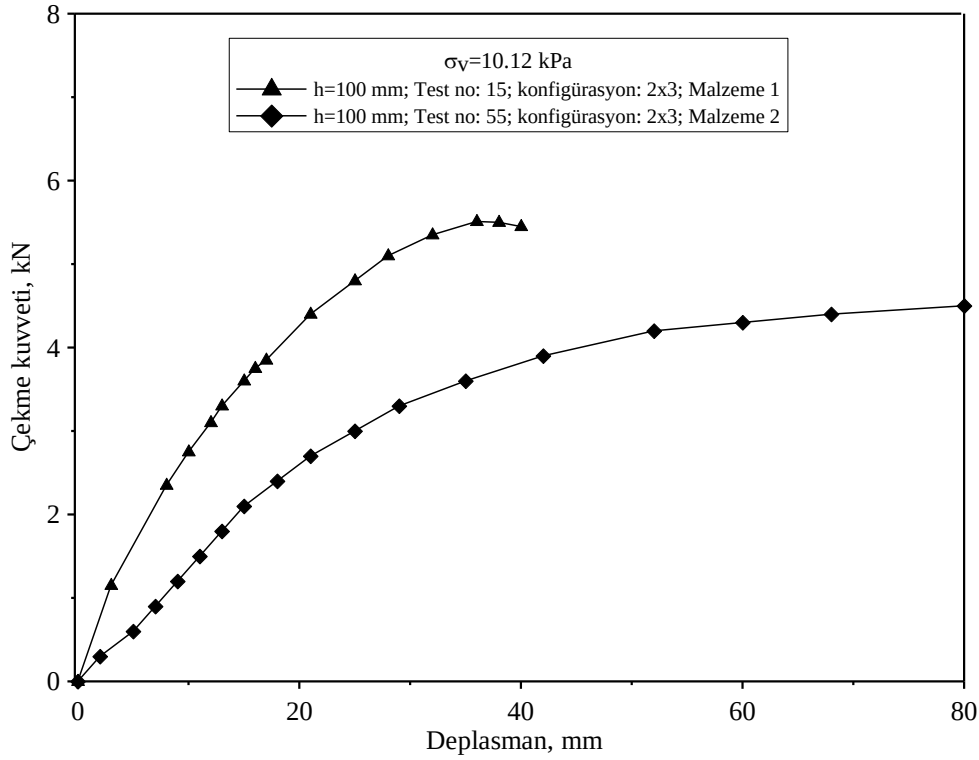
Şekil 4.63. $\sigma_v = 18.10$ kPa düşey gerilme altında konfigürasyonu 1x2 olan hücresel yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi



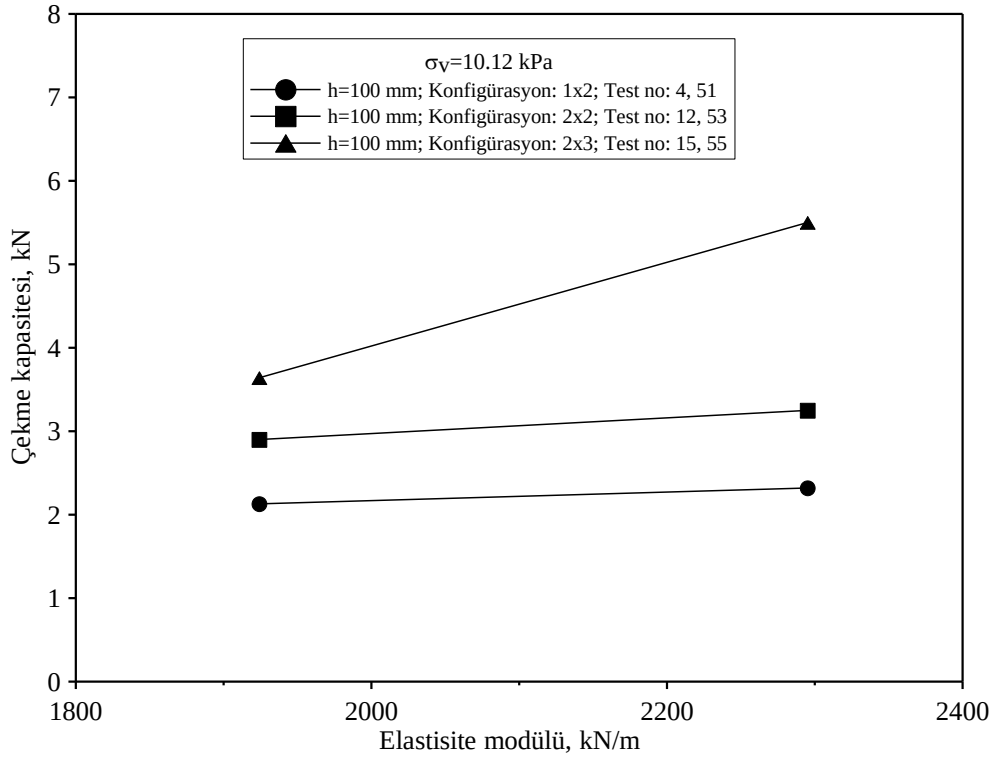
Şekil 4.64. $\sigma_v = 10.12$ kPa düşey gerilme altında konfigürasyonu 2x2 olan hücreli yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi



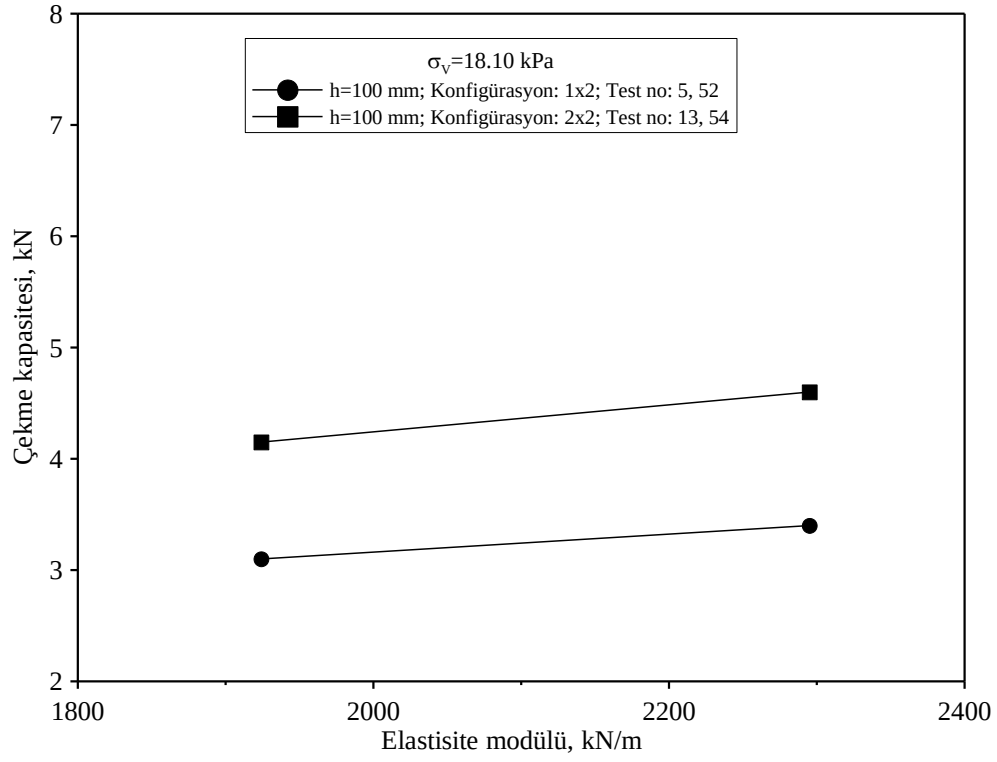
Şekil 4.65. $\sigma_v = 18.10$ kPa düşey gerilme altında konfigürasyonu 2x2 olan hücreli yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi



Şekil 4.66. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında konfigürasyonu 2x3 olan hüresel yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kuvveti-deplasman ilişkisine etkisi



Şekil 4.67. $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında hüresel yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kapasitesine ilişkisine etkisi



Şekil 4.68. $\sigma_v=18.10$ kPa düşey gerilme altında hücresel yapı elemanlarının rijitliğinin çekme kapasitesine ilişkisine etkisi

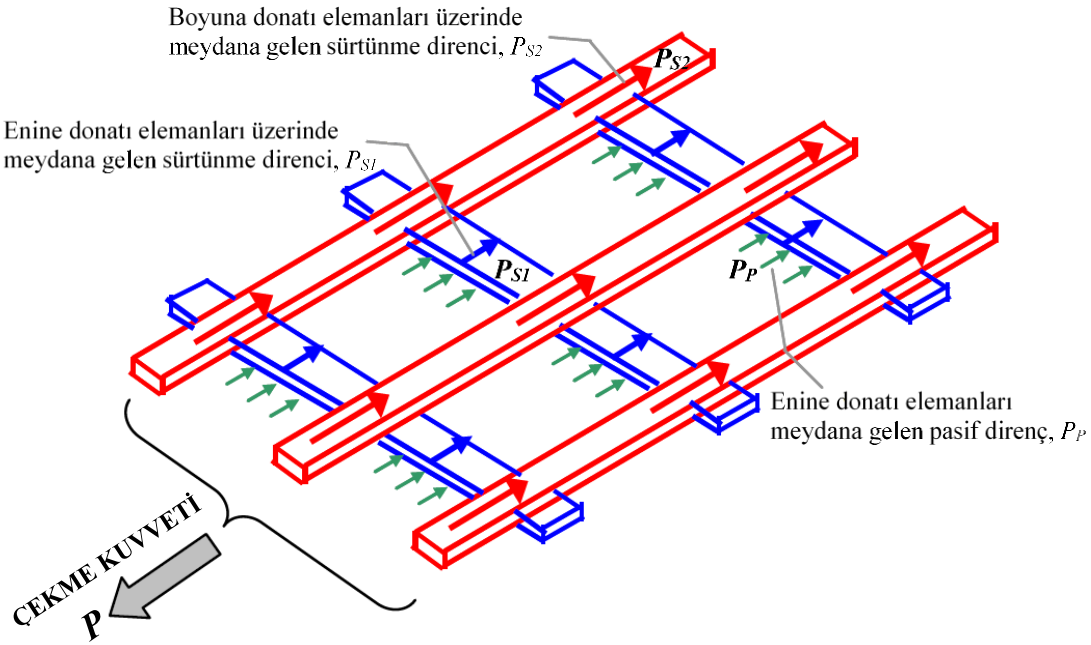
5. HÜCRESEL YAPI ELEMANLARININ (GEOCELL) ÇEKME KAPASİTELERİNİN TEORİK OLARAK BELİRLENMESİ

5.1. Giriş

Geosentetiklerin zemin güçlendirme elemanları olarak kullanımı, geoteknik mühendisliği uygulamalarında ve tasarımlarında oldukça geniş bir şekilde yer edinmektedir. Geosentetikler, geoteknik mühendisliği uygulamalarında, yapı yüklerinden dolayı çekme kuvvetlerine maruz kalan zemin yapılarının güçlendirilmesinde kullanılmaktadırlar. Geosentetik donatılı zeminlerde meydana gelen çekme yükleri, zemin ile geosentetik arasında oluşan sürtünme direnci vasıtasıyla zeminden geosentetik donatı elemanına aktarılmaktadır. Çekme yükleri, donatı elemanları ile zeminler arasında meydana gelen etkileşim mekanizmasının belirlenmesi ile ifade edilebilir. Zeminler ile geosentetikler arasında meydana gelen etkileşim veya sürtünme mekanizması, yapı yüklerinin geosentetikler ve zeminler üzerinde dağılımı açısından önemli rol oynamaktadır. Yapı yüklerinden dolayı zemin ortamında, geosentetik donatı elemanı ile zemin arasında oldukça karmaşık bir şekilde donatı elemanı üzerinde ve yanlarında dağılım gösteren kayma gerilmeleri meydana gelmektedir. Kayma gerilmelerinin geosentetik donatı elemanları üzerinde dağılımı donatı elemanının türüne ve rijitliğine bağlı olarak değişmektedir.

Geomembran ve geoşerit gibi yüzey alanı düzgün ve pürüzsüz olan geosentetikler üzerinde oluşan sürtünme mekanizması sadece zemin ile bu donatılar arasındaki ara yüzeyde meydana gelen sürtünme direncinden oluşmaktadır. Fakat polimer çubuk donatıların birbirine kaynaklanması ile imal edilen (geogirdler vb. gibi yüzeyinde açıklıklar bulunan) geosentetik donatı elemanlarının sürtünme mekanizması, boyuna donatı elemanlar üzerinde oluşan sürtünme dirençleri ve enine donatı elemanları üzerinde oluşan pasif dirençler olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır (Şekil 5.1). Boyuna elemanlar üzerinde meydana gelen sürtünme direncinin belirlenmesi için kesme kutusu deneyi ile elde edilen sürtünme parametreleri (ara yüzey sürtünme açısı ve kohezyonu) kullanılırken, enine elemanlar üzerinde meydana gelen pasif dirençlerin belirlenmesi için ise çekme deneylerine ihtiyaç duyulmaktadır (Koerner ve diğ., 1989; Bergado ve Chai, 1994; Palmeira, 2004; Işık ve Gürbüz, 2020). Jewel (1990) tarafından yapılan araştırma sonucu, çekme kuvvetleri sadece sürtünme dirençleri tarafından karşılanmamakta olup enine donatı elemanları üzerinde oluşan pasif dirençlerin de geogrid gibi donatı elemanlarının çekme kuvvetine önemli bir

şekilde katkısı olmaktadır (Şekil 5.1). Bu nedenle polimer şeritlerin birbirine kaynaklanması ile imal edilen, enine ve boyuna donatı elemanlardan oluşan hücresel yapı elemanlarının da çekme yükleri altındaki sürtünme davranışı da benzer şekilde olacaktır.



Şekil 5.1. Çekme direncinin geogrid donatı elemanı üzerindeki bileşenleri (Jewell, 1990)

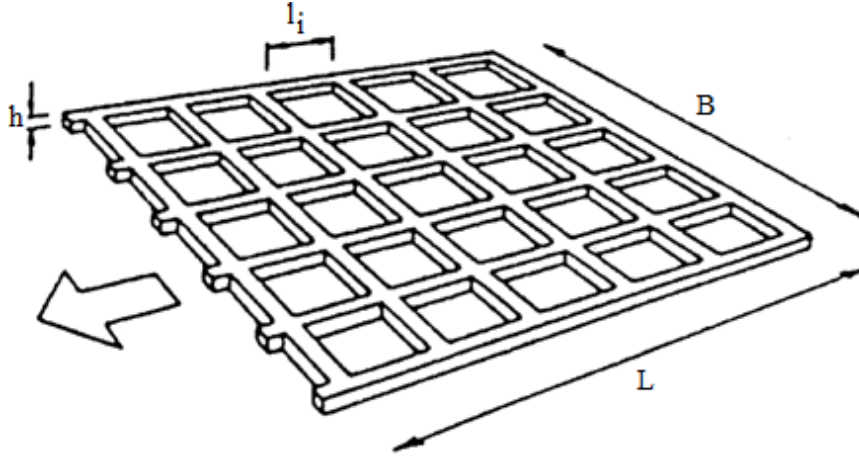
Zemin ile geogrid gibi yüzey açıklıkları bulunan veya enine ve donatı elemanlarından oluşan geosentetik donatı elemanları arasında meydana gelen çekme kapasitesi, sürtünme ve pasif dirençlerin ayrı ayrı belirlenmesi ile aşağıdaki eşitlik yardımı ile belirlenmektedir.

$$P = \sum P_{S1} + \sum P_{S2} + \sum P_P \quad (5.1)$$

Burada P toplam çekme kuvveti veya çekme kapasitesi, P_{S1} enine elemanlar üzerinde meydana gelen sürtünme direnci, P_{S2} boyuna elemanlar üzerinde meydana gelen sürtünme direnci ve P_P ise enine elemanlar üzerinde meydana gelen pasif direnci ifade etmektedir.

Geogrid donatı elemanı üzerinde meydana gelen sürtünme direnci, geosentetik donatı eleman boyu L ve eleman genişliği B (Şekil 5.2) için Eşitlik 5.2 yardımı ile aşağıdaki gibi belirlenebilmektedir.

$$P_{S2} = 2\alpha_s L \sigma_v \tan \delta \quad (5.2)$$



Şekil 5.2. Bir geogrid donatı elemanına ait genel şematik görünüş (Jewell, 1990)

Burada α_s sürtünme alan katsayısı olup boyuna elemanlar üzerinde meydana gelen sürtünme direnç alanlarının toplam boyuna eleman alanlarına oranıdır. L donatı elemanının boyu, σ_v düşey efektif gerilme ve δ ise zemin ile donatı arasındaki sürtünme açısı olup kesme kutusu deneyleri ile belirlenmektedir. Pasif direncin (P_p) belirlenmesi için ise Jewell (1990) tarafından önerilen ve genel kayma yenilmesine göre belirlenen eşitlik yardımı ile aşağıda ifade edilmiştir.

$$P_p = \left(\frac{L}{l_i}\right) \alpha_p \sigma'_p h \quad (5.3)$$

Burada α_p pasif direnç oluşturan alanların katsayısı olup enine elemanlar üzerinde oluşan pasif direnç alanlarının toplam enine eleman alanlarına oranıdır. h enine elemanın kalınlığı veya yüksekliği, l_i enine iki eleman arasındaki mesafe ve σ'_p ise enine elemanlar üzerinde meydana gelen pasif direncin gerilme cinsinden değeridir. Eşitlik 5.3' te verilen L/l_i ifadesi donatı elemanı üzerinde olan toplam enine eleman sayısını ifade etmektedir. Granüller zeminler için enine elemanlar üzerinde meydana gelen pasif direnç (σ'_p), zeminin kayma mukavemeti açısı (ϕ') ve düşey efektif gerilmeye (σ_v) bağlı olarak Eşitlik 5.4 yardımı ile aşağıdaki gibi belirlenebilmektedir.

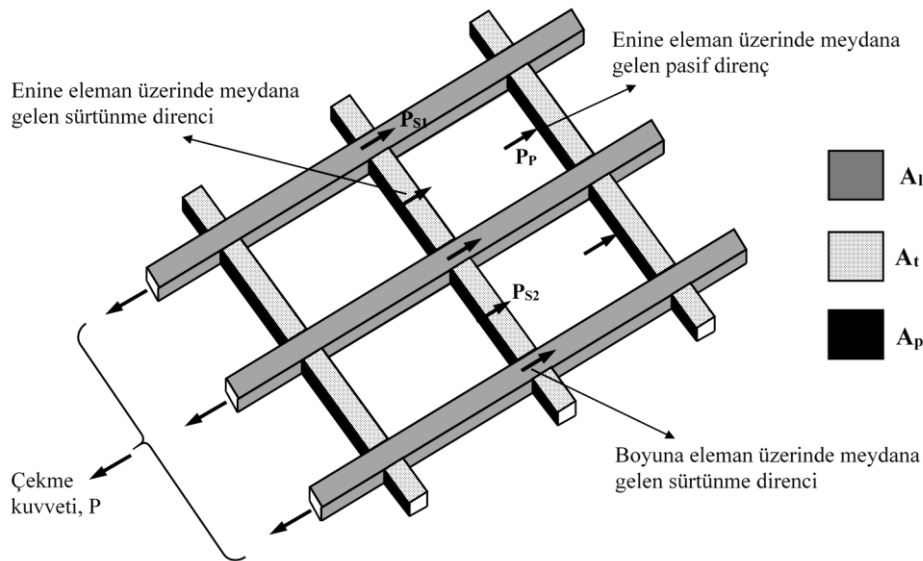
$$\sigma'_p = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \sigma_v \quad (5.4)$$

Ayrıca geogrid donatılı elemanların toplam çekme kapasitesi (P), bir diğer çalışma olan Koerner ve diğ., (1989) tarafından sürtünme direnci ve pasif direncin belirlenmesi ile de

farklı olarak belirlenmektedir (Şekil 5.3). Buna göre toplam çekme kapasitesi eşitlik yardımı ile belirlenebilmektedir.

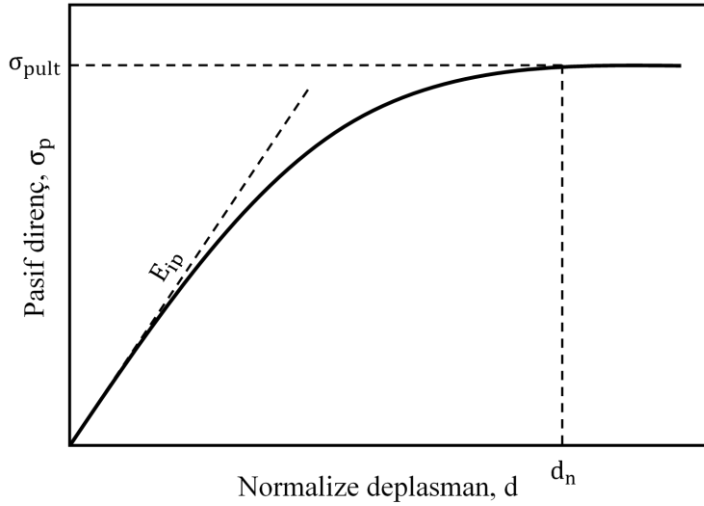
$$P = \sum P_{S1} + \sum P_{S2} + \sum P_P = 2A_l\sigma_v\tan\delta + 2A_t\sigma_v\tan\delta + A_p\sigma_vN_q \quad (5.5)$$

Burada toplam çekme kapasitesi, boyuna eleman üzerinde meydana gelen sürtünme direnci (P_{S1}), enine eleman üzerinde meydana gelen sürtünme direnci (P_{S2}) ve enine eleman üzerinde meydana gelen pasif dirençlerin (P_P) toplamına eşittir. Boyuna (A_l) ve enine (A_t) elemanların sürtünme alanları üzerinde meydana gelen sürtünme direnci, donatı elemanı ile zemin arasındaki oluşan ara yüzey sürtünme açısına (δ) bağlı olarak belirlenebilmektedir. Enine elemanların pasif direnç oluşturan alanları (A_p) üzerinde meydana gelen pasif direnç ise, zeminin kayma mukavemeti açısına (ϕ) bağlı olarak elde edilen taşıma gücü katsayısı (N_q) ve düşey gerilmeye (σ_v) bağlı olarak belirlenmektedir.



Şekil 5.3. Geogrid donatı elemanına üzerinde meydana gelen sürtünme ve pasif direnç alanları (Koerner ve diğ., 1989)

Pasif direncin belirlenmesi için önerilen bir diğer yaklaşım ise Bergado ve diğ. (1996) tarafından önerilen hiperbolik fonksiyon yaklaşımıdır (Şekil 5.4). Burada tek bir enine eleman üzerinde yapılan çekme deneyleri ile elde edilen gerilme cinsinden pasif direnç ile normalize deplasman ilişki eğrisi birer hiperbolik fonksiyon olup pasif direnç bu eğrinin denklemi yardımı ile Eşitlik 5.6' te ifade edilmiştir.



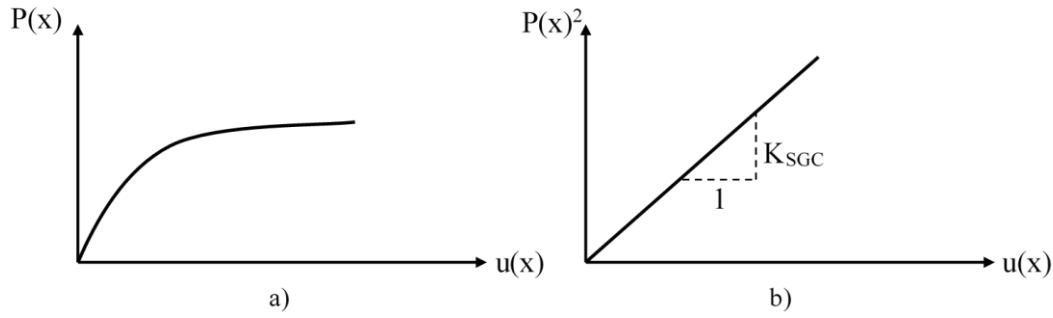
Şekil 5.4. Pasif direnç ile normalize deplasman arasındaki ilişki (Bergado ve diğ., 1996)

$$\sigma_p = \frac{d_n}{\left(\frac{1}{E_{ip}} + \frac{d_n}{\sigma_{pult}} \right)} \quad (5.6)$$

Burada d_n maksimum pasif dirençteki deplasmana göre normalize edilmiş deplasman, E_{ip} pasif direnç normalize deplasman eğrisinin başlangıç elastisite modülü, σ_{pult} nihai pasif direnç ve σ_p ise herhangi bir deplasman (d_n) değerindeki pasif direnci ifade etmektedir. Dolayısıyla herhangi bir donatı elemanı üzerinde meydana gelen toplam pasif direnç (P_p), Eşitlik 5.6 yardımı ile belirlenen gerilme cinsinden pasif direnç değerinin enine elemanların oluşturduğu toplam pasif direnç alanları ile çarpımından elde edilmektedir. Buna göre pasif dirençlerin kuvvet cinsinden değeri ise Eşitlik 5.7 yardımı ile aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$P_p = \sigma_p A_p \quad (5.7)$$

Zornberg ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada, çekme deneylerine maruz bırakılan geosentetik donatı elemanları üzerinde meydana gelen birim çekme kuvveti analitik olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, zemin ile geosentetik arasındaki sürtünme davranışı analitik olarak belirlenen zemin-geosentetik kompozit (SGC) malzeme rijitlik (K_{SGC}) parametresinin elde edilmesi ile belirlenmiştir. Zornberg ve diğ. (2017) tarafından zemin-geosentetik kompozit malzeme rijitliği (K_{SGC}), geosentetik donatı elemanı üzerinde yapılan çekme deneyleri sonucunda parabolik olarak elde edilen çekme kuvveti-deplasman eğrilerinin lineer forma dönüştürülmesi yardımı ile belirlenmiştir (Şekil 5.5).



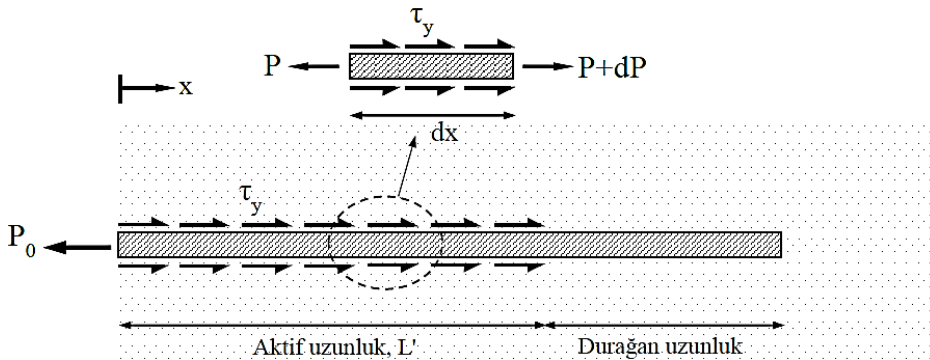
Şekil 5.5. Birim çekme kuvveti (P) ile deplasman (u) arasındaki ilişkiler: a) P ile u arasındaki parabolik ilişki b) $P(x)^2$ ile u arasındaki lineer ilişki (Zornberg ve diğ., 2017)

Buna göre Şekil 5.5b yardımı ile zemin-geosentetik kompozit malzeme rijitlik parametresi, birim çekme kuvvetinin karesi ($P(x)^2$) ve deplasman (u) bağlı olarak Eşitlik 5.8' de verilmiştir. Ayrıca zemin-geosentetik kompozit malzeme rijitliği birim çekme kuvvetinin karesi ($P(x)^2$) ile deplasman (u) arasındaki ilişkinin eğimi olarak Eşitlik 5.9 yardımı ile belirlenebilmektedir.

$$P(x)^2 = K_{SGC} \cdot u(x) \quad (5.8)$$

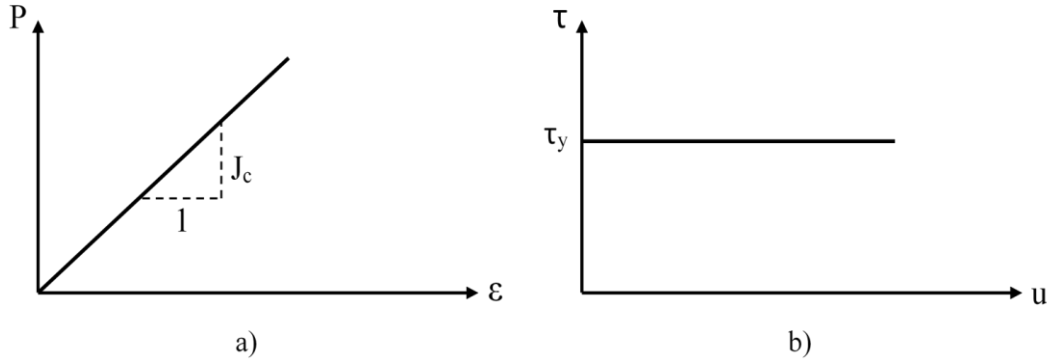
$$K_{SGC} = 4\tau_y J_c \quad (5.9)$$

Burada τ_y çekme yüklerine maruz kalan geosentetik donatı elemanı ile zemin arasında meydana gelen kayma gerilmesi (Şekil 5.6) ve J_c ise birim çekme kuvveti (P)-birim uzama (ϵ) eğrisinin (Şekil 5.7a) eğimidir. Şekil 5.6' da P_0 geosentetik donatı elemanının zemin içindeki toplam çekme kuvveti, x donatı elemanı boyu üzerindeki herhangi bir noktanın kutu ön yüzüne olan mesafesi, L' aktif donatı elemanı uzunluğu, dx birim donatı elemanı uzunluğu ve dP ise birim eleman üzerinde meydana gelen çekme kuvvetidir.



Şekil 5.6. Zemin-geosentetik kompozit malzeme modeli için kullanılan sınır koşulları (Zornberg ve diğ., 2017)

Geosentetik donatı elemanı ile zemin arasında meydana gelen kayma gerilmesi, donatı elemanı boyunca üniform dağılmakta olup deplasman değerine bağlı olarak değişmemektedir (Şekil 5.7b).

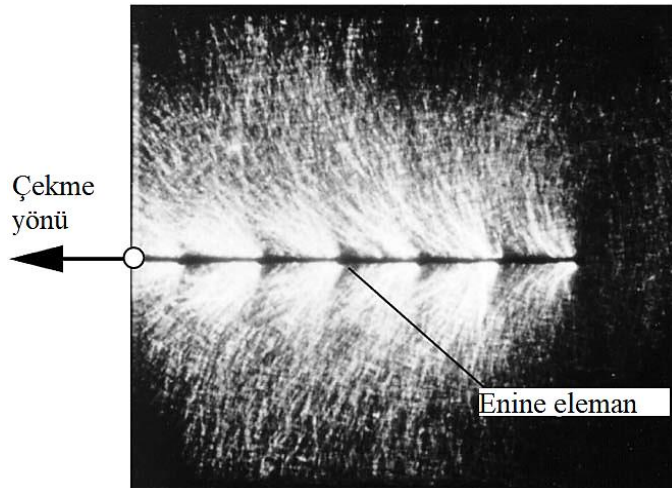


Şekil 5.7. Zemin-geosentetik kompozit malzeme modeli a) birim çekme kuvveti (P)-birim uzama ilişkisi (ϵ) b) zemin-geosentetik ara yüzey kayma gerilmesi (τ)-deplasman (u) ilişkisi (Zornberg ve diğ., 2017)

Yüzey açıklıkları bulunan veya enine ve boyuna donatı elemanlarından oluşan geosentetiklerin (geogrid ve geocell) çekme kapasiteleri, boyuna elemanlar üzerinde oluşan sürtünme dirençleri ile enine elemanlar üzerinde oluşan pasif dirençlerin toplamlarına eşit olmaktadır. Bu doğrultuda sürtünme ve pasif dirençlerin ayrı ayrı olarak belirlenmesi önem teşkil etmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan çekme deneyleri ile zemin ortamında hücresel yapı elemanının toplam çekme kapasitesi, boyuna eleman yüzeylerinde oluşan sürtünme direnci ile enine elemanlar üzerinde oluşan pasif direncin toplanması ile belirlenmektedir (Jewell, 1990). Enine elemanlar üzerinde oluşan pasif dirençler kullanılan zeminin kayma mukavemeti açısına, uygulanan düşey gerilmeye, enine donatı elemanının boyutlarına ve rijitliğine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Boyuna elemanlar üzerinde oluşan sürtünme direnci ise donatı elemanının yüzey pürüzlülüğüne ve donatı elemanı ile zemin arasındaki sürtünme açısına bağlıdır (Ingold, 1982; O'Rourke ve diğ., 1990; Jewell, 1996; Milligan ve Tei, 1998). Bu çalışma kapsamında kullanılan hücresel yapı elemanları ile zeminler arasındaki çekme direncinin teorik olarak belirlenmesi hücresel yapı elemanının üç boyutlu yapısından dolayı yeterli düzeyde olmayıp son zamanlarda sadece birkaç araştırmacı tarafından çalışma konusu olarak ele alınmıştır (Kiyota ve diğ., 2009; Mohidin ve Alfaro, 2011; Han ve diğ., 2013; Manju ve Latha, 2013; Han, 2014; Haussner ve diğ., 2016; Isik ve Gurbuz, 2018; Işık ve Gürbüz, 2020; Mehrjardi ve Motarjemi, 2018).

5.2. Çekme Kuvvetinin Donatı Elemanı Üzerinde Mobilizasyonu

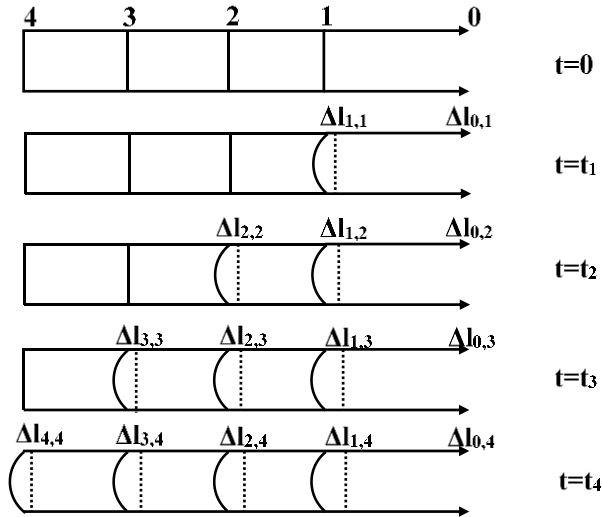
Enine ve boyuna elemanlardan oluşan geosentetik donatı elemanlarının çekme kapasitesi, sürtünme ve pasif dirençlerin ayrı ayrı belirlenmesi ile hesaplanmaktadır. Fakat yapılan çalışmalarda ara yüzey sürtünme davranışını etkileyen diğer bir önemli faktörün de enine donatı elemanları arasındaki mesafe olduğu belirlenmiştir (Dyer, 1985; Palmeira ve Milligan, 1989; Palmeira, 2004). Enine elemanlar üzerinde oluşan pasif direnç alanlarının birbirleri ile kesişmesi veya etkileşimi sonucu, pasif dirençler donatı boyunca enine elemanlar üzerinde eşit olarak dağılmamaktadırlar. Bu nedenle, donatı boyunca enine elemanlar üzerinde oluşan pasif dirençlerin büyüklükleri eşit olmamaktadır. Dyer (1985) tarafından çekme deneyleri süresince yapılan görüntüleme çalışmasında enine elemanlar üzerinde oluşan pasif direnç alanlarının birbirleri ile etkileşimi açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.8).



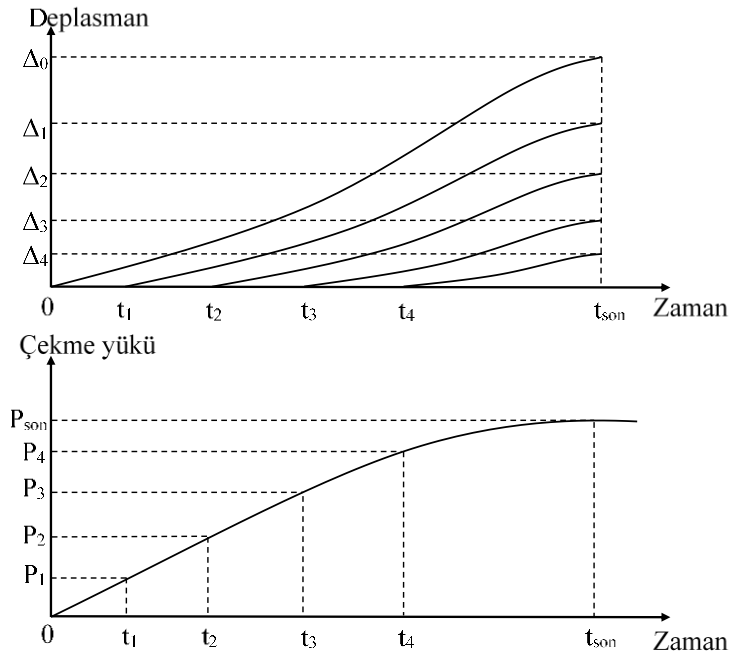
Şekil 5.8. Çekme deney süresince görüntülenen pasif direnç alanlarının kesişimi (Dyer, 1985)

Bu çalışma kapsamında hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan pasif dirençlerin eleman boyunca değişimi, enine elemanlar üzerinde meydana gelen deplasmanlara bağlı olarak şematik gösterimi Şekil 5.9’ da verilmiştir. Hücresel yapı elemanı, çekme işlemine maruz kaldığı anda ilk olarak ilk hücre elemanı üzerinde deplasmanlar meydana gelmekte ve ilk hücre elemanı mobilize olmaktadır. Çekme kuvvetleri altındaki hücresel yapı elemanı, maksimum çekme kapasitesine ulaşması için uzunluk doğrultusundaki diğer hücrelerin de zamana bağlı olarak sırası ile mobilize olması gerekmektedir (Şekil 5.9). Hücresel yapı elemanı maksimum çekme kapasitesine ulaşıncaya mobilizasyon işlemleri tamamlanmış olacak ve çekme yükünde herhangi bir değişim gözlenmeyecektir (“Hücresel Yapı

Elemanlarının Çekme Kuvvetleri Altındaki Davranışı” bölümünde Şekil 4.22’ ye bakınız). Dolayısıyla çekme kapasitesi, hücresel yapı elemanları boyunca meydana gelen mobilizasyon işlemlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bakımdan çekme kapasitesi, pasif dirençlerin eleman boyunca mobilizasyonlarına bağlı olarak ayrı ayrı hesaplanarak belirlenmektedir.



a)



b)

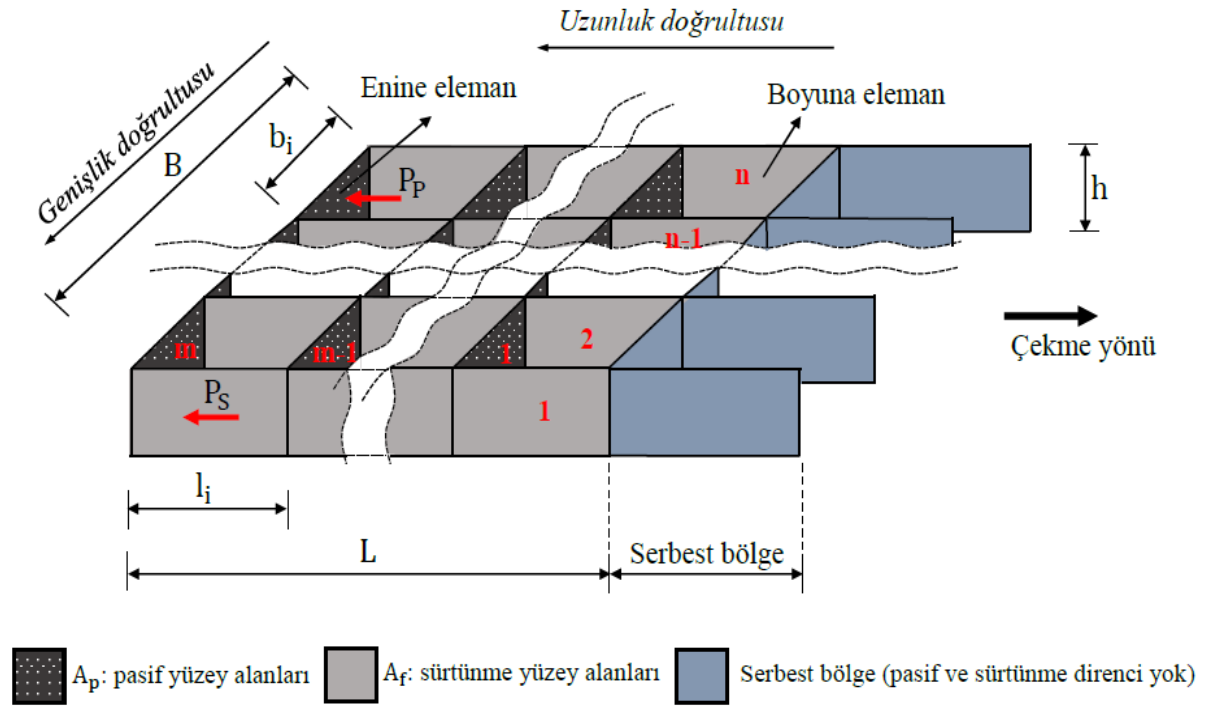
Şekil 5.9. Çekme yükü altındaki hücresel yapı elemanlarının mobilizasyonları a) hücreler üzerinde oluşan deplasmanların zamanla değişimi b) çekme yükünün zamanla değişimi

5.3. Hücresel Yapı Elemanlarının Çekme Kapasitesinin Teorik Olarak Belirlenmesi

Zemin ortamında bulunan hücresel yapı elemanının çekme kapasiteleri, hücre elemanları içerisinde enine elemanlar üzerinde meydana gelen pasif dirençlerin ve boyuna elemanların yan yüzeylerinde meydana gelen sürtünme dirençlerin toplamından oluşmaktadır (Şekil 5.10). Hücresel yapı elemanlarının kohezyonsuz zeminler içerisindeki çekme kapasitesi Eşitlik 5.10 yardımı ile bu çalışmada belirleneceği ortaya koyulmuştur.

$$P = \Sigma P_S + \Sigma P_P \leq n T_u \quad (5.10)$$

Burada P toplam çekme kuvveti, P_S herhangi bir boyuna donatı elemanı yan yüzeyi ile zemin arasında oluşan sürtünme direnci, P_P herhangi bir enine eleman üzerinde meydana gelen pasif direnç, n çekme yönündeki boyuna donatı elemanı sayısı ve T_u ise hücresel yapı elemanına ait malzeme çekme dayanımını ifade etmektedir. Bu çalışmada hücresel yapı elemanı yüksekliği h , toplam uzunluğu L , toplam genişliği B , boyuna donatı elemanın uzunluğu l_i , enine donatı elemanın boyu b_i , boyuna donatı elemanı sayısı n ve birim hücre genişliğinde enine donatı elemanının sayısı ise m ile ifade edilmektedir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan pasif ve sürtünme direnç alanları

5.3.1. Pasif direncin belirlenmesi

Polimer malzemeden üretilmiş düşük rijitliğe sahip enine elemanlar üzerinde çekme doğrultusunda eğilmeler ve elemanlar içerisinde uzamalar meydana gelmektedir (Bergado ve Chai, 1994). Enine donatı elemanlar üzerinde meydana gelen eğilmeler ve uzamalar, donatı elemanı boyunca farklılık göstermektedir (Wilson-Fahmy ve Koerner, 1993). Bu nedenle, hücresel yapı elemanı içerisinde enine elemanlar üzerinde oluşan pasif dirençlerin belirlenmesi için enine elemanlar üzerinde meydana gelen eğilme ve uzama miktarlarının belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında hücresel yapı elemanlarını oluşturan enine elemanları üzerinde meydana gelen pasif dirençler, enine elemanlar üzerinde oluşan eğilme ve uzama miktarlarına bağlı olarak incelenmiştir. Buna göre hücresel yapı elemanlarının enine elemanları üzerinde meydana gelen pasif dirençler Eşitlik 5.11 yardımı ile ifade edilmiştir.

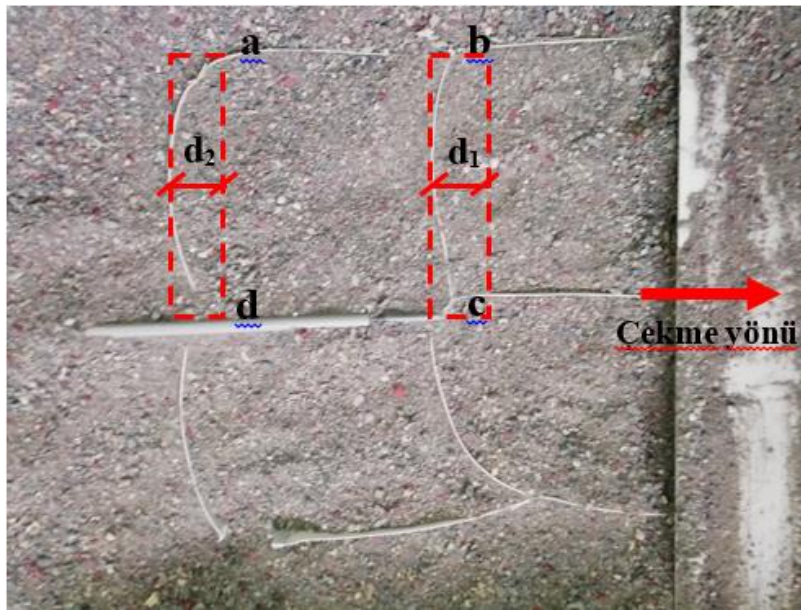
$$P_p = \sigma'_p A_p \left(\sum_{i=1}^m (n-1) \alpha_{pi} m_{pi} \right) \quad (5.11)$$

Burada σ'_p enine eleman üzerinde meydana gelen pasif toprak basıncı, A_p enine eleman üzerinde oluşan pasif direnç alanı, α_{pi} pasif direnç alanı değişim faktörü ve m_{pi} ise pasif direnç mobilizasyon faktörüdür. Bu bölümde pasif dirençlerin belirlenmesi için pasif direnç alanı değişim faktörü (α_{pi}) ve pasif direnç mobilizasyon faktörü (m_{pi}) sırasıyla incelenmiştir.

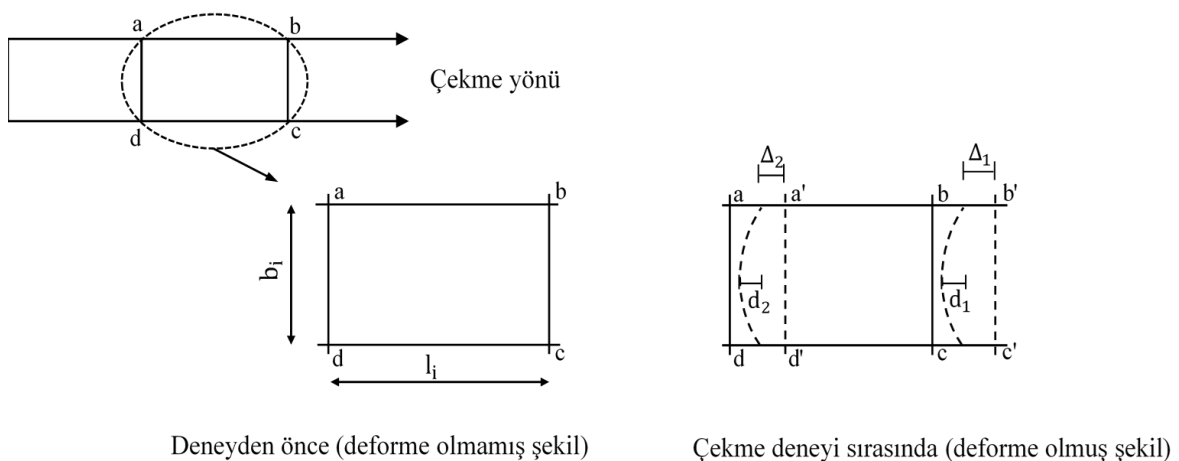
Pasif direnç alanı değişim faktörünün (α_{pi}) belirlenmesi

Hücresel yapı elemanın malzeme özelliğine bağlı olarak enine elemanlar üzerinde oluşan eğilme deplasmanları (d) ve boyuna elemanlar üzerinde şekil değiştirme sonucu oluşan uzama miktarları (Δl) hücresel yapı elemanı boyunca farklılık göstermektedir (Şekil 5.11 ve 5.12). Bir deney numunesine ait enine elemanlar üzerinde oluşan eğilme deplasmanları Şekil 5.11' de gösterilmiştir. Ayrıca enine elemanlar üzerinde çekme deneyi sonrasında meydana gelen eğilme deplasmanları ve boyuna elemanlar üzerinde meydana gelen uzamalar Şekil 5.12' de şematik olarak verilmiştir. Böylece enine eleman üzerinde oluşan eğilme durumu ve farklılaşan pasif direnç alanı Şekil 5.13' te gösterildiği gibi şematik olarak verilmiştir. Dolayısıyla çekme deneyi sırasında enine elemanlar üzerinde oluşan pasif direnç alanlarının

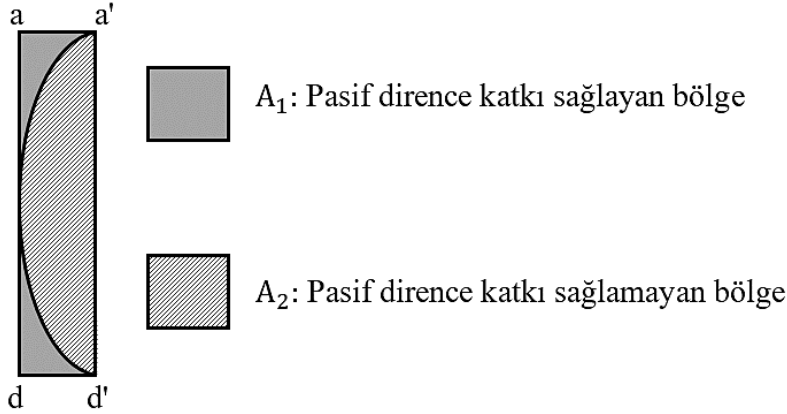
değişimi ifade etmek için pasif alan değişim faktörü (α_{pi}) toplam pasif direncin belirlenmesi için geliştirilmiştir. Pasif alan değişim faktörü (α_{pi}), deney sonunda, enine eleman üzerinde eğilme sonrası oluşan durumda (Şekil 5.13) pasif dirence katkı sağlayan bölgenin alanının pasif dirence katkı sağlamayan bölgenin alanına oranı ile belirlenmektedir. Tüm deney numuneleri için enine eleman üzerinde meydana gelen eğilme durumu benzer şekilde olup tüm deney numuneleri için pasif alan değişim faktörü (α_{pi}) 0.33 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.11. Hücresel yapı elemanının çekme deney sonrası görünüşü



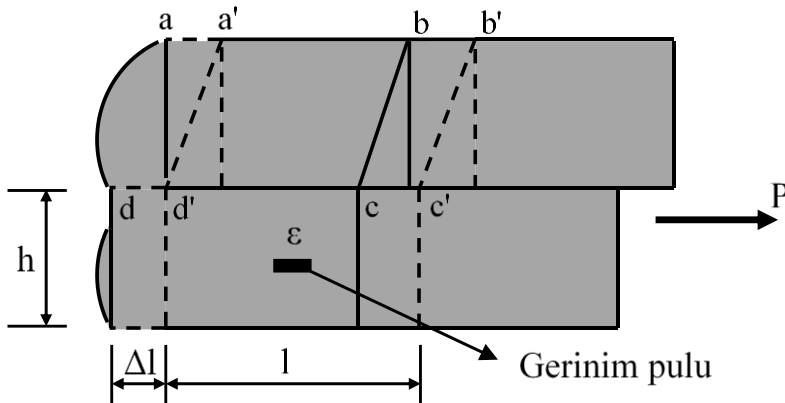
Şekil 5.12. Hücresel yapı elemanının çekme deney öncesi ve sonrası plan görünüşü



Şekil 5.13. Enine eleman üzerinde pasif direnç alanının değişimini ifade eden α_p 'nin belirlenmesi

Pasif direnç mobilizasyon faktörünün (m_{pi}) belirlenmesi

Bir istinat yapısı üzerine etki eden pasif toprak basıncı katsayısı (k_p), duvar hareketinin (ΔH) duvar yüksekliğine (H) oranı ile belirlenmektedir. Pasif toprak basıncının tam olarak mobilize olması durumunda bu oran gevşek zeminler için 0.01 olarak alınmaktadır (Şekil 5.14 ve Çizelge 5.1). Bu durum hücresel yapı elemanı için uyarlanacak olursa çekme anında hücre elemanın yapacağı uzama miktarı (Δl), burada duvar hareketi olarak da adlandırılabilir ve elemanlar üzerine yerleştirilen gerinim pulları kullanılarak belirlenen birim uzama miktarları ile hesaplanabilmektedir (Şekil 5.14).



Şekil 5.14. Hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan şekil değiştirmenin şematik gösterimi

Hücresel yapı elemanları boyunca oluşan birim uzamalarda azalma olması durumunda, uzama miktarlarının (Δl) da azalacak olması nedeniyle hücresel yapı elemanı eleman boyunca meydana gelen pasif dirençler de azalma eğilimi gösterecektir. Enine bir eleman üzerinde oluşan mobilize pasif direnç $\Delta l/h$ oranına bağlı olarak çekme doğrultusunda kutu

ön yüzeyinden uzaklaştıkça azalma gösterecektir. Burada Δl , birim uzama (ε) ölçümlerine bağlı olarak boyuna eleman kenarı yüzeyinde oluşan uzama miktarı ve h ise hücre elemanının yüksekliğini ifade etmektedir. Hücresel yapı elemanları boyunca meydana gelen birim uzama ölçümleri ve birim uzamalardan hesaplanan uzama (Δl) miktarları Çizelge 5.2 'de verilmiştir. Hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan uzama miktarları ölçülen birim uzamalara bağlı olarak Eşitlik 5.12 yardımı ile belirlenmiştir.

$$\Delta l = \varepsilon * l \quad (5.12)$$

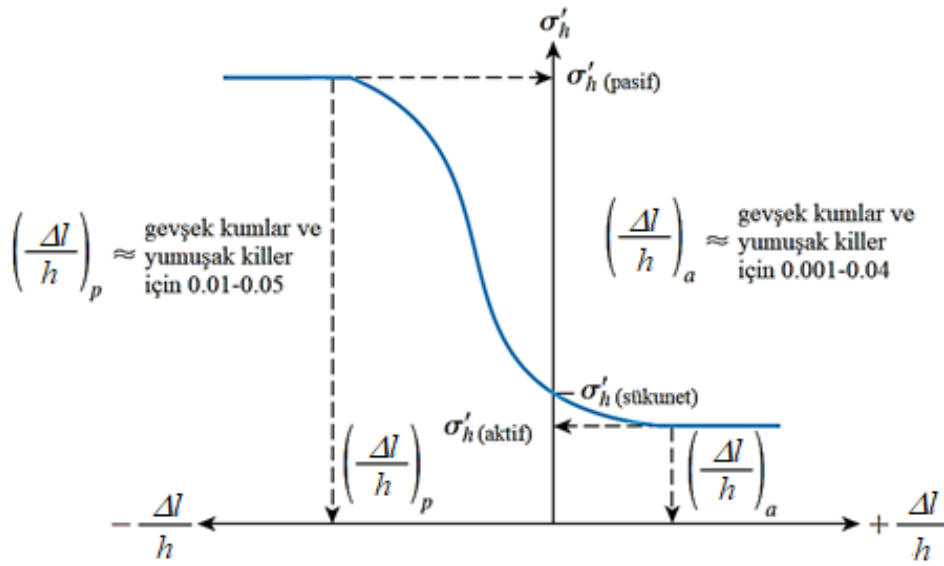
Pasif toprak basınç katsayıları (k_p), hücresel yapı elemanları üzerinde belirlenen uzama miktarlarının (Δl) hücre yüksekliğine (h) oranlanması ile belirlenmiştir. Hücresel yapı elemanlarına uyarlanarak belirlenen pasif toprak basınç katsayıları (k_p), Çizelge 5.1 ve Şekil 5.15' te verilen bilgiler doğrultusunda gevşek kumlu zeminler için tavsiye edilen 0.01 değerine bölünerek pasif mobilizasyon faktörleri (m_p) belirlenmiştir (Eşitlik 5.13).

$$m_p = \left(\frac{\Delta l}{h} \right) / 0.01 \leq 1 \quad (5.13)$$

Tüm hücresel yapı elemanları için belirlenen pasif toprak basınç katsayıları (k_p) ve pasif direnç mobilizasyon faktörleri (m_p) Çizelge 5.3 'te verilmiştir. İlk hücre elemanı üzerinde elde edilen mobilizasyon faktörleri genel olarak 1.00 değerinde olduğu belirlenmiştir (Çizelge 5.3). Hücresel yapı eleman boyunca hücre elemanları üzerinde meydana gelen mobilizasyon faktörlerinin azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu bakımdan hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan pasif dirençlerin dağılımı eleman boyunca azalma eğiliminde olduğundan her enine eleman üzerinde oluşan pasif dirençlerin aynı olmayacağı açıkça görülmektedir. Dolayısıyla mobilizasyon faktörü (m_{pi}), hücresel yapı elemanı boyunca enine eleman üzerinde oluşan pasif dirençlerin belirlenmesi için oldukça önemli olduğu ortaya koyulmuştur.

Çizelge 5.1. Zemin türüne göre tipik toprak basınç değerleri (Das, 2007)

Zemin türü	Aktif durum	Pasif durum
Gevşek kumlar	0.001-0.002	0.01
Sıkı kumlar	0.0005-0.001	0.005
Yumuşak killer	0.02	0.04
Sert killer	0.01	0.02



Şekil 5.15. Aktif ve pasif yanal basınçların oluşumu için hareket kriterleri (Das, 2007)

Çekme deneyleri sonucunda belirlenen birim uzama miktarlarına bağlı olarak Eşitlik 5.13 yardımı ile belirlenen mobilizasyon faktörleri, çekme doğrultusundaki elemanlar boyunca yüksek düşey gerilmeler altında (18.12 ve 31.40 kPa) ilk hücre için genelde 1.000 olarak belirlenmiştir. İkinci ve üçüncü hücre için ise 0.374-1.000 değerleri arasında olduğu belirlenmiştir. Hücresel yapı elemanının boyuna (L), uygulanan düşey gerilmeye (σ_v) ve deney numunesinin yerleşim konfigürasyonlarına göre mobilizasyon faktörlerinin, hücresel yapı elemanı serbest bölgesine olan mesafeye göre değişimi Şekil 5.16-5.19’ da verilmiştir.

Hücresel yapı elemanı üzerine uygulanan düşey gerilme arttıkça mobilizasyon faktörlerinin değeri 1.000 ‘e yaklaşmaktadır. Özellikle düşey gerilme değeri 10.12 kPa’ dan sonra uygulanan gerilmelerde (18.10 ve 31.40 kPa) ilk hücre ve ikinci hücre elemanları için genellikle 1.000 değerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca hücresel yapı elemanının artan boyu ile de mobilizasyon faktörleri artmakta olup 1.000 değerine ulaşmaktadır. Genel olarak ilk iki hücre elemanında mobilizasyon faktörü 1.000 değerinde olup artan hücre elemanı boyu için birim uzama değerlerine bağlı olarak azalma eğilimindedir. Hücresel yapı elemanı boyu 510 ve 850 mm için mobilizasyon faktörlerinin üçüncü hücre elemanları için gözle görülür bir şekilde azaldığı belirlenmiştir (Şekil 5.18 ve 5.19).

Çizelge 5.2. Hücresel yapı elemanlarına ait birim uzamalar ve uzama miktarları

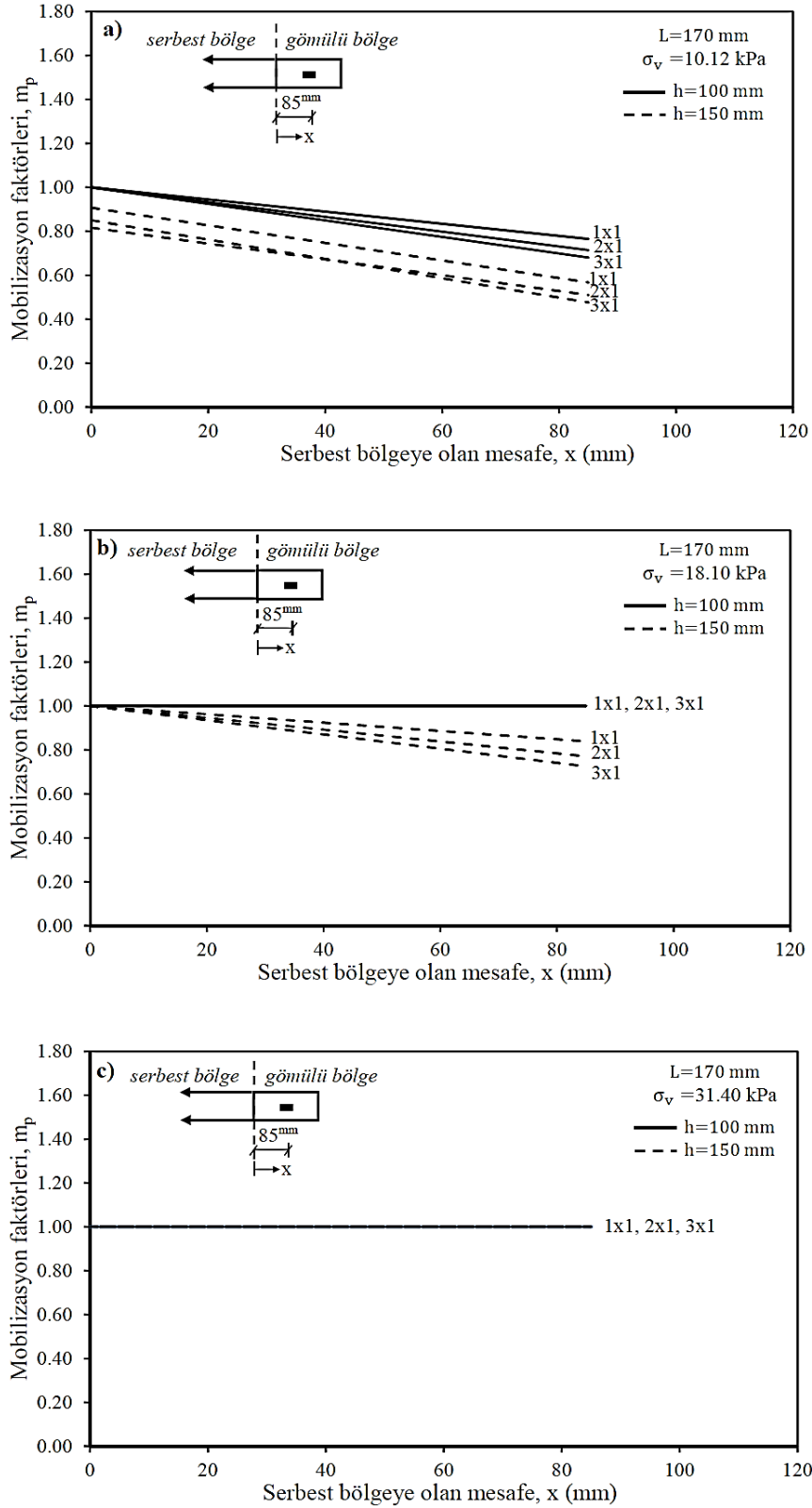
Test No	Konfigürasyon	Birim uzamalar					Uzama miktarları (mm)				
		ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	Δl_1	Δl_2	Δl_3	Δl_4	Δl_5
1	1x1	0.0045					0.765				
2	1x1	0.0070					1.190				
3	1x1	0.0110					1.870				
4	1x2	0.0120	0.0042				2.040	0.714			
5	1x2	0.0210	0.0070				3.570	1.190			
6	1x2	0.0270	0.0060				4.590	1.020			
7	1x3	0.0140	0.0058	0.003			2.380	0.986	0.510		
8	1x5	0.0360	0.0160	0.006	0.0015		6.120	2.720	1.020	0.255	
9	2x1	0.0042					0.714				
10	2x1	0.0070					1.190				
11	2x1	0.0110					1.870				
12	2x2	0.0085	0.0030				1.445	0.510			
13	2x2	0.0150	0.0050				2.550	0.850			
14	2x2	0.0240	0.0065				4.080	1.105			
15	2x3	0.0140	0.0060	0.003			2.380	1.020	0.510		
16	2x5	0.0320	0.0160	0.007	0.001		5.440	2.720	1.190	0.170	
17	3x1	0.0040					0.680				
18	3x1	0.0062					1.054				
19	3x1	0.0100					1.700				
20	3x2	0.0084	0.0028				1.428	0.476			
21	3x2	0.0135	0.0039				2.295	0.663			
22	3x2	0.0230	0.0058				3.910	0.986			
23	3x3	0.0140	0.0064	0.0022			2.380	1.088	0.374		
24	3x5	0.0300	0.0140	0.006	0.0005		5.100	2.380	1.020	0.085	
25	1x1	0.0050					0.850				
26	1x1	0.0074					1.258				
27	1x1	0.0110					1.870				
28	1x2	0.0130	0.0042				2.210	0.714			
29	1x2	0.0220	0.0070				3.740	1.190			
30	1x2	0.0290	0.0065				4.930	1.105			
31	1x3	0.0280	0.0130	0.005			4.760	2.210	0.850		
32	1x5	0.0410	0.0180	0.008	0.002		6.970	3.060	1.360	0.340	
33	2x1	0.0045					0.765				
34	2x1	0.0068					1.156				
35	2x1	0.0106					1.802				
36	2x2	0.0090	0.0035				1.530	0.595			
37	2x2	0.0160	0.0050				2.720	0.850			
38	2x2	0.0260	0.0070				4.420	1.190			
39	2x3	0.0270	0.0120	0.0052			4.590	2.040	0.884		
40	2x3	0.0420	0.0180	0.009			7.140	3.060	1.530		
41	2x5	0.0350	0.0150	0.006			5.950	2.550	1.020		
42	3x1	0.0042					0.714				
43	3x1	0.0064					1.088				
44	3x1	0.0100					1.700				
45	3x2	0.0085	0.0033				1.445	0.561			
46	3x2	0.0140	0.0042				2.380	0.714			
47	3x2	0.0240	0.0072				4.080	1.224			
48	3x3	0.0280	0.0110	0.0048			4.760	1.870	0.816		
49	3x3	0.0410	0.0190	0.0095			6.970	3.230	1.615		
50	3x5	0.0390	0.0160	0.007			6.630	2.720	1.190		
51*	1x2	0.0260	0.0150				4.420	2.550			
52*	1x2	0.0520	0.0350				8.840	5.950			
53*	2x2	0.02	0.0075				3.400	1.275			
54*	2x2	0.048	0.015				8.160	2.550			
55*	2x3	0.035	0.011	0.005			5.950	1.870	0.850		

*Malzeme 2

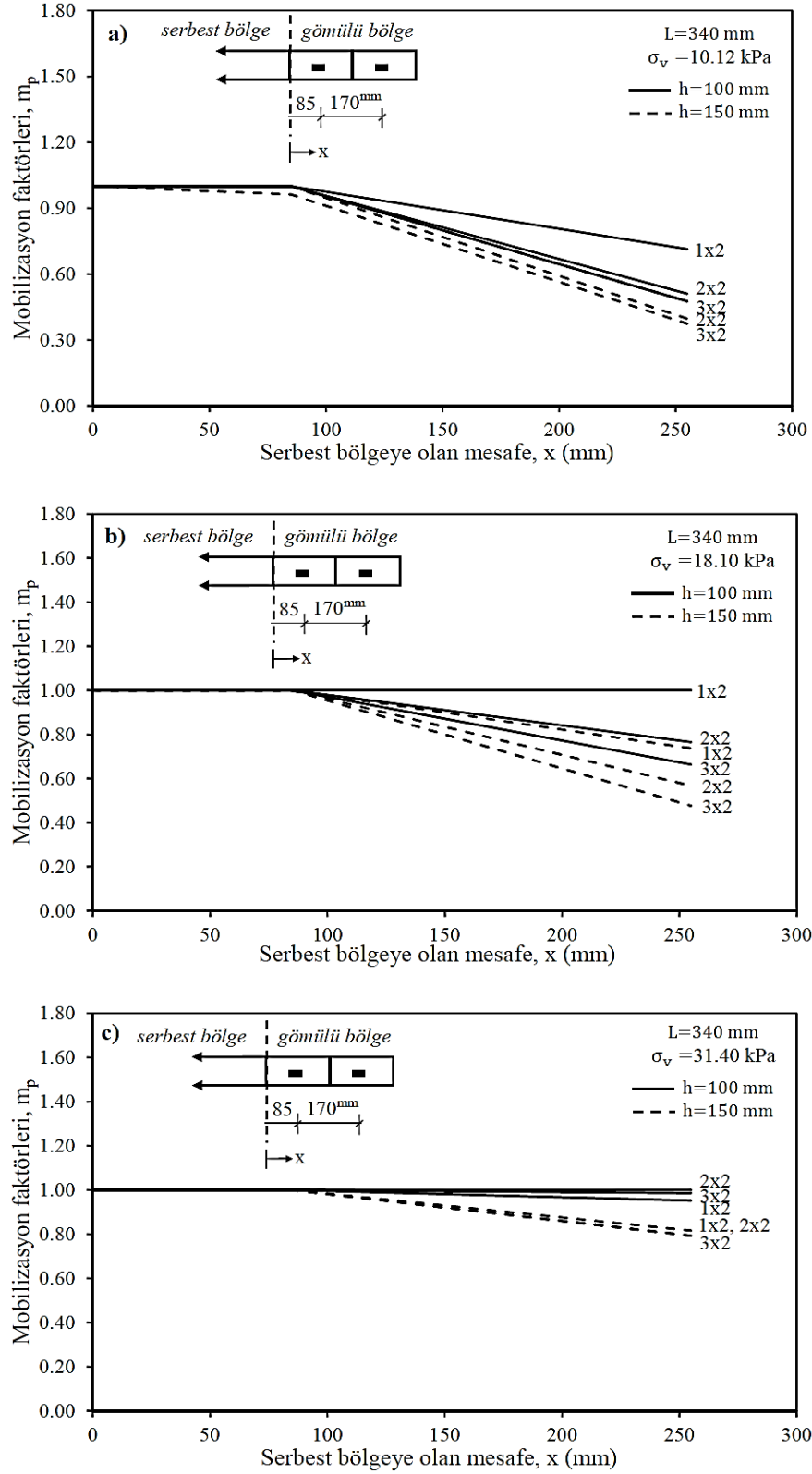
Çizelge 5.3. Deney numuneerine ait pasif toprak basınç katsayıları ve mobilizasyon faktörleri

Test No	Konfigürasyon	Pasif toprak basınç katsayıları					Pasif mobilizasyon faktörleri				
		$\Delta l_1/h$	$\Delta l_2/h$	$\Delta l_3/h$	$\Delta l_4/h$	$\Delta l_5/h$	m_{p1}	m_{p2}	m_{p3}	m_{p4}	m_{p5}
1	1x1	0.0077					0.765				
2	1x1	0.0119					1.000				
3	1x1	0.0187					1.000				
4	1x2	0.0204	0.0071				1.000	0.714			
5	1x2	0.0357	0.0119				1.000	1.000			
6	1x2	0.0459	0.0102				1.000	1.000			
7	1x3	0.0238	0.0099	0.0051			1.000	0.986	0.510		
8	1x5	0.0612	0.0272	0.0102	0.0026		1.000	1.000	1.000	0.255	
9	2x1	0.0071					0.714				
10	2x1	0.0119					1.000				
11	2x1	0.0187					1.000				
12	2x2	0.0145	0.0051				1.000	0.510			
13	2x2	0.0255	0.0085				1.000	0.850			
14	2x2	0.0408	0.0111				1.000	1.000			
15	2x3	0.0238	0.0102	0.0051			1.000	1.000	0.510		
16	2x5	0.0544	0.0272	0.0119	0.0017		1.000	1.000	1.000	0.170	
17	3x1	0.0068					0.680				
18	3x1	0.0105					1.000				
19	3x1	0.0170					1.000				
20	3x2	0.0143	0.0048				1.000	0.476			
21	3x2	0.0230	0.0066				1.000	0.663			
22	3x2	0.0391	0.0099				1.000	0.986			
23	3x3	0.0238	0.0109	0.0037			1.000	1.000	0.374		
24	3x5	0.0510	0.0238	0.0102	0.0009		1.000	1.000	1.000	0.085	
25	1x1	0.0057					0.567				
26	1x1	0.0084					0.839				
27	1x1	0.0125					1.000				
28	1x2	0.0147	0.0048				1.000	0.476			
29	1x2	0.0249	0.0079				1.000	0.793			
30	1x2	0.0329	0.0074				1.000	0.737			
31	1x3	0.0317	0.0147	0.0057			1.000	1.000	0.567		
32	1x5	0.0465	0.0204	0.0091	0.0023		1.000	1.000	0.907	0.227	
33	2x1	0.0051					0.510				
34	2x1	0.0077					0.771				
35	2x1	0.0120					1.000				
36	2x2	0.0102	0.0040				1.000	0.397			
37	2x2	0.0181	0.0057				1.000	0.567			
38	2x2	0.0295	0.0079				1.000	0.793			
39	2x3	0.0306	0.0136	0.0059			1.000	1.000	0.589		
40	2x3	0.0476	0.0204	0.0102			1.000	1.000	1.000		
41	2x5	0.0397	0.0170	0.0068			1.000	1.000	0.680		
42	3x1	0.0048					0.476				
43	3x1	0.0073					0.725				
44	3x1	0.0113					1.000				
45	3x2	0.0096	0.0037				0.963	0.374			
46	3x2	0.0159	0.0048				1.000	0.476			
47	3x2	0.0272	0.0082				1.000	0.816			
48	3x3	0.0317	0.0125	0.0054			1.000	1.000	0.544		
49	3x3	0.0465	0.0215	0.0108			1.000	1.000	1.000		
50	3x5	0.0442	0.0181	0.0079			1.000	1.000	0.793		
51*	1x2	0.0442	0.0255				1.000	1.000			
52*	1x2	0.0884	0.0595				1.000	1.000			
53*	2x2	0.0340	0.0128				1.000	1.000			
54*	2x2	0.0816	0.0255				1.000	1.000			
55*	2x3	0.0595	0.0187	0.0085			1.000	1.000	0.850		

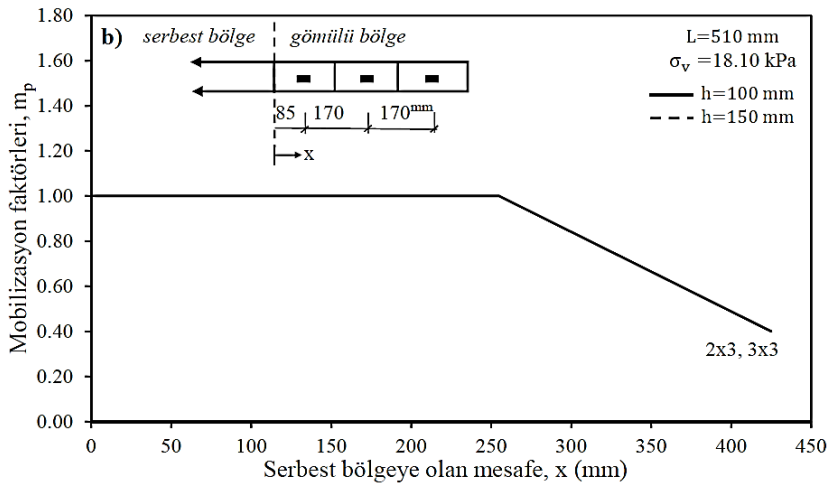
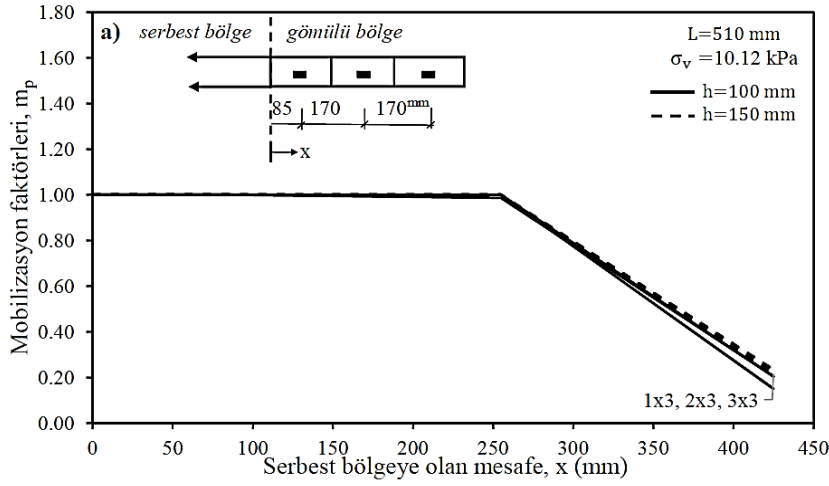
*Malzeme 2



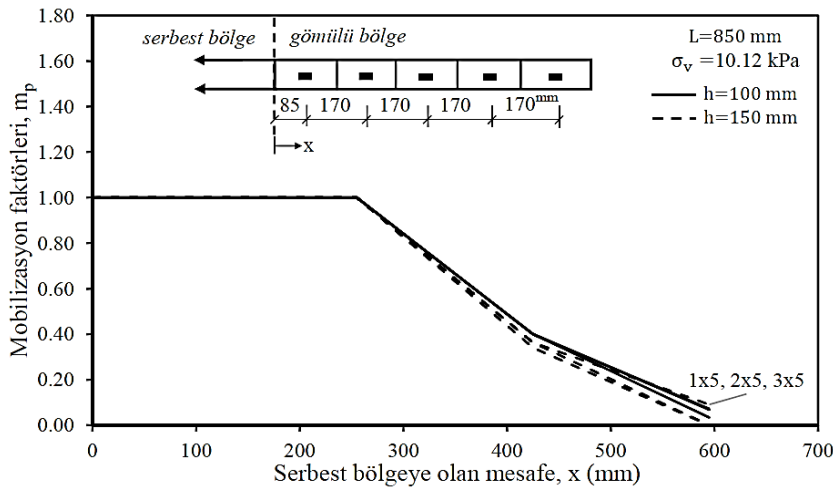
Şekil 5.16. Farklı düşey gerilmeler altında pasif mobilizasyon faktörlerinin kutu ön yüzüne olan mesafeye göre ilişkisi a) $L=170$ mm, $\sigma_v = 10.12$ kPa, konfigürasyonlar: 1x1, 2x1, 3x1 b) $L=170$ mm, $\sigma_v = 18.10$ kPa, konfigürasyonlar: 1x1, 2x1, 3x1 c) $L=170$ mm, $\sigma_v = 31.40$ kPa, konfigürasyonlar: 1x1, 2x1, 3x1



Şekil 5.17. Farklı düşey gerilmeler altında pasif mobilizasyon faktörlerinin kutu ön yüzüne olan mesafeye göre ilişkisi a) $L=340$ mm, $\sigma_v = 10.12$ kPa, konfigürasyonlar: 1x2, 2x2, 3x2 b) $L=340$ mm, $\sigma_v = 18.10$ kPa, konfigürasyonlar: 1x2, 2x2, 3x2 c) $L=340$ mm, $\sigma_v = 31.40$ kPa, konfigürasyonlar: 1x2, 2x2, 3x2



Şekil 5.18. Farklı düşey gerilmeler altında pasif mobilizasyon faktörlerinin kutu ön yüzüne olan mesafeye göre ilişkisi a) $L=510 \text{ mm}$, $\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}$, konfigürasyonlar: 1x3, 2x3, 3x3 b) $L=510 \text{ mm}$, $\sigma_v = 18.10 \text{ kPa}$, konfigürasyonlar: 2x3, 3x3



Şekil 5.19. Pasif mobilizasyon faktörlerinin kutu ön yüzüne olan mesafeye göre ilişkisi: $L=850 \text{ mm}$, $\sigma_v = 10.12 \text{ kPa}$, konfigürasyonlar: 1x5, 2x5, 3x5

Hücresel yapı elemanları üzerinde belirlenen mobilizasyon faktörleri (m_p) ile enine eleman üzerinde meydana gelen pasif dirençlerin hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla herhangi enine bir eleman üzerine gelen pasif dirençler aşağıda sırasıyla Eşitlik 5.14, 5.15 ve 5.16 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\sigma'_p = (\gamma h + q)K_p \quad (5.14)$$

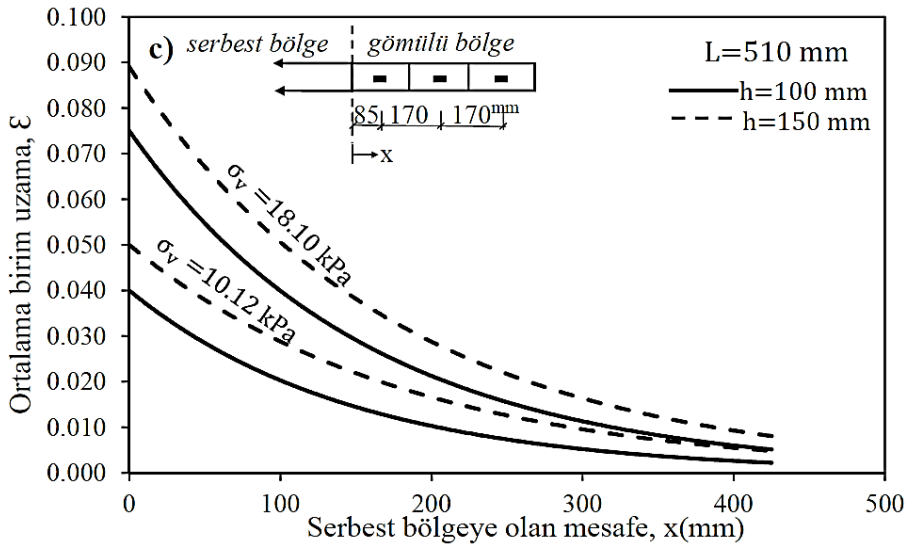
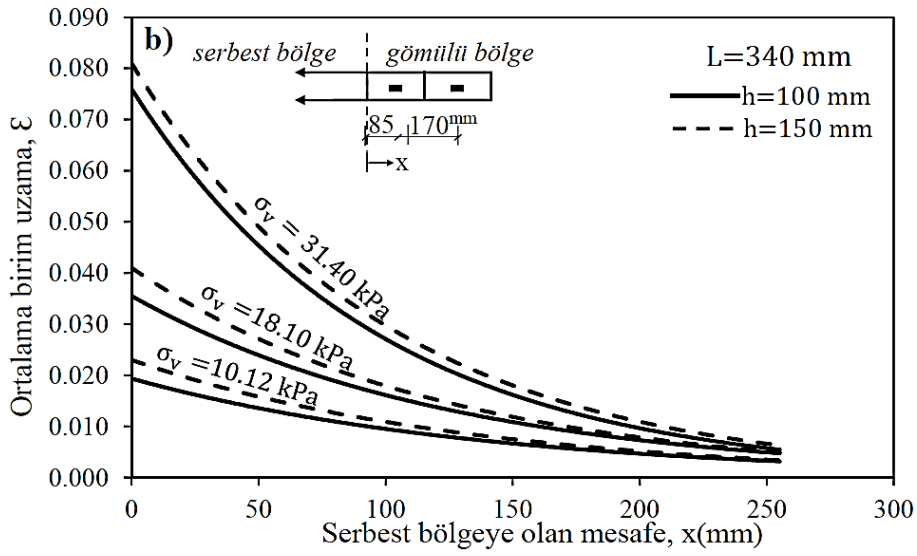
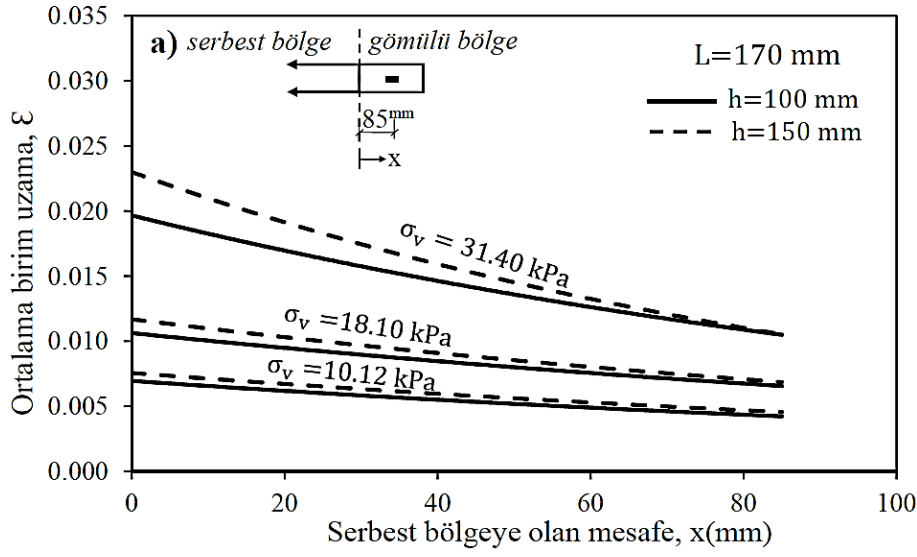
$$k_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (5.15)$$

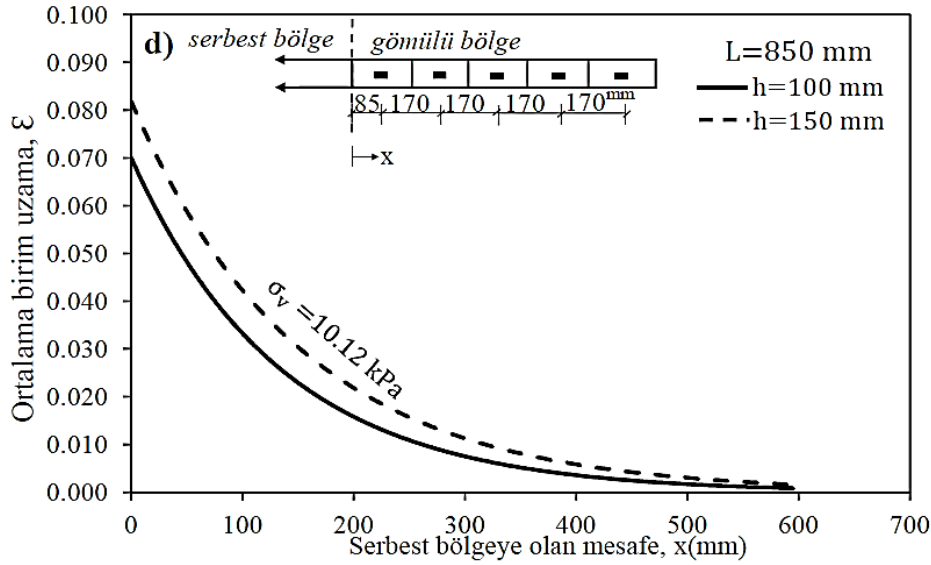
$$P_{pi} = \sigma'_p \cdot A_p \cdot \alpha_{pi} \cdot m_{pi} \quad (5.16)$$

Burada σ'_p enine eleman üzerinde oluşan pasif toprak basıncı, γ sıkıştırılmış zeminin birim hacim ağırlığı, q hücresel yapı elemanı üzerine uygulanan sürşarj gerilmesi, k_p zeminin efektif içsel sürtünme açısına(ϕ) bağlı olarak belirlenen yanal pasif toprak basıncı, P_{pi} enine eleman üzerinde oluşan pasif kuvvet ve A_p ise pasif direnç oluşturan alandır (Şekil 5.10).

5.3.2. Sürtünme direncin belirlenmesi

Hücresel yapı elemanlarının deney süresince çekme kuvveti doğrultusundaki birim uzama değerleri hücre elemanlarının yan yüzeylerine yerleştirilen gerinim pulları vasıtasıyla belirlenmiştir. Tüm deney elemanları üzerinde çekme doğrultusunda hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan birim uzama dağılımlarının ortalama değerleri Şekil 5.20' de verilmiştir. Hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan birim uzamalar, sürtünme ve pasif direnç oluşturan boyuna ve enine donatı elemanlarına bağlı olarak, hücresel yapı elemanı boyunun artması ile artmaktadır. 10.12 kPa düşey gerilme altında, kutu ön yüzünde oluşan birim uzama $L=170$ mm için %0.6, $L=340$ mm için %2, $L=510$ mm için %4 iken ve $L=850$ mm için %7 civarlarında olduğu gözükmemektedir. Bu durum artan hücresel yapı elemanı boyunun eleman üzerinde oluşturacağı birim uzama değerinin de artacağını açıkça göstermektedir (Şekil 5.20). Hücresel yapı elemanlar üzerinde oluşan sürtünme dirençleri ile hücresel yapı elemanı boyu arasında yakın bir ilişkinin olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca deney elemanı üzerindeki birim uzama değerlerinin artan düşey gerilme ile arttığı belirlenmiştir.



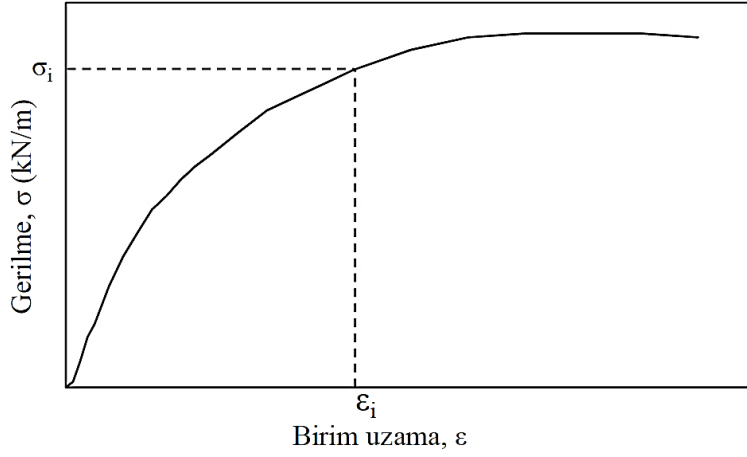


Şekil 5.20. Hücresel yapı elemanı boyunca oluşan birim uzamaların dağılımları a) L=170 mm, b) L=340 mm, c) L=510 mm ve d) L=850 mm

Hücresel yapı elemanı boyunca ve çekme doğrultusunda oluşan sürtünme dirençleri, boyuna elemanlar ortasına yerleştirilen gerinim pulları yardımı ile ölçülen birim uzamalar (ϵ) kullanılarak belirlenmiştir. Herhangi bir boyuna eleman üzerinde meydana gelen sürtünme direnci (F_{si}), hesaplanan birim uzama değerinin hücresel yapı elemanına ait gerilme-birim uzama grafiğinde yerine konularak elde edilmiştir (Şekil 5.21).

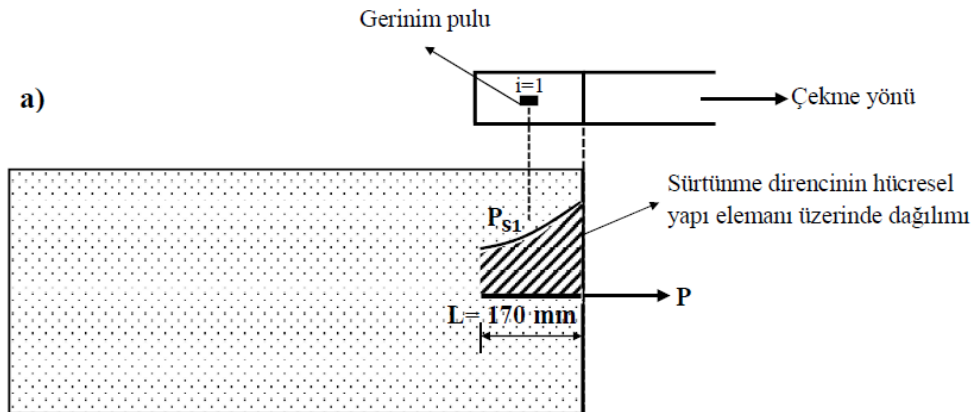
Birim uzamaların hücresel yapı elemanına ait gerilme-birim uzama grafiğinde yerine konularak elde edilen boyuna eleman üzerinde oluşan gerilme (σ_i) değeri eleman yüksekliği ile çarpılarak kuvvet cinsinden değeri elde edilmektedir (Eşitlik 5.17). Buna göre hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan toplam sürtünme direnci (P_s) aşağıda Eşitlik 5.17 yardımı ile hesaplanmaktadır.

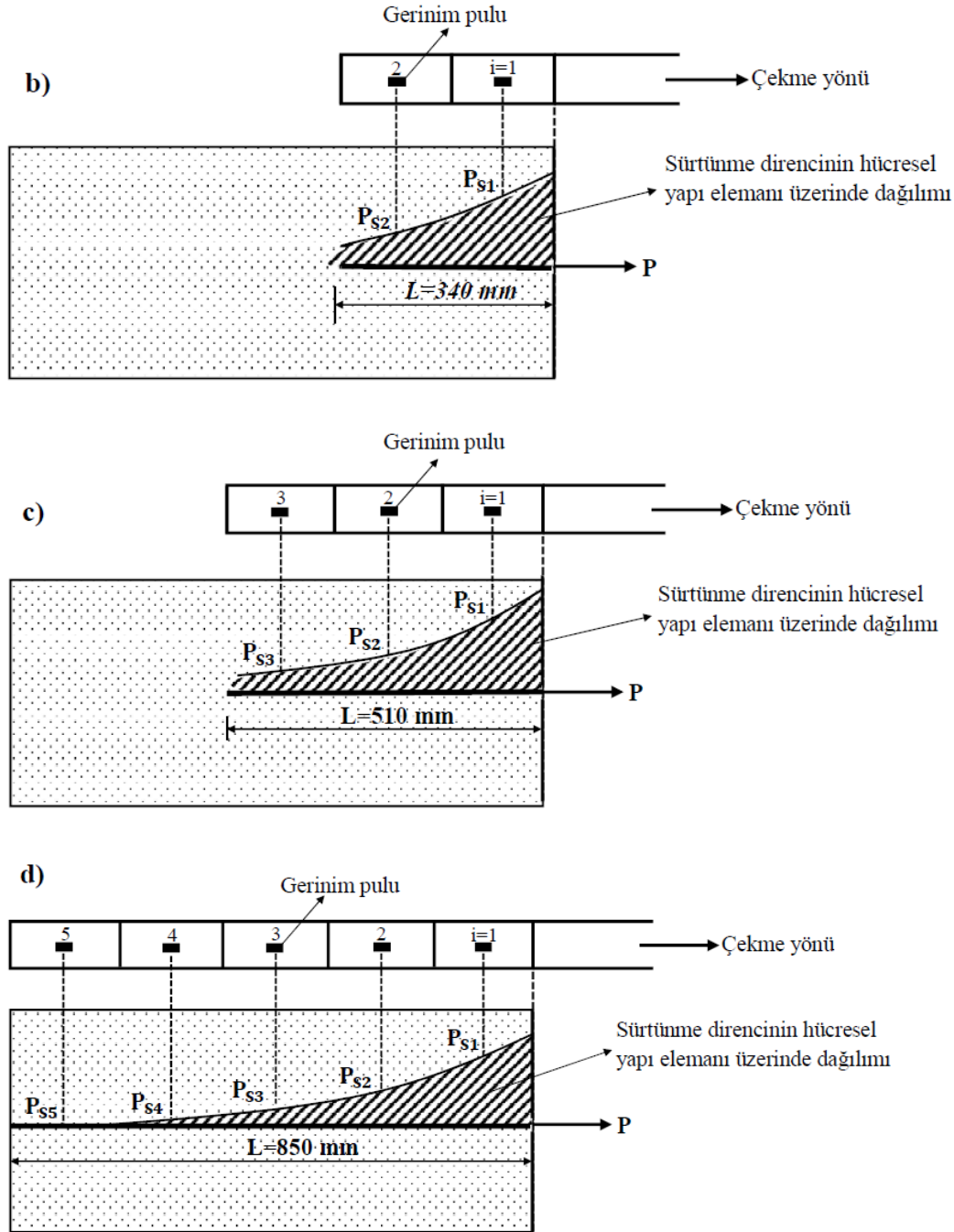
$$P_s = m \sum_{i=1}^n F_{si} = \sigma_i \cdot h \quad (5.17)$$



Şekil 5.21. Herhangi bir boyuna elaman üzerinde sürtünmeden dolayı meydana gelen gerilmenin hücresel yapı elemanına ait gerilme-birim uzama eğrisinden belirlenmesi

Hücresel yapı elemanları üzerine yerleştirilen gerinim pulları (birim uzama ölçer) kullanılarak belirlenen sürtünme dirençlerinin (Eşitlik 5.17) eleman boyunca değişiklik göstermektedir. Eleman boyuna ve uygulanan düşey gerilmeye bağlı olarak değişiklik gösteren sürtünme direncinin hücresel yapı elemanı üzerinde dağılımı eleman boylarına (170, 340, 510 ve 850 mm) göre Şekil 5.22 'de şematik olarak verilmiştir. Sürtünme direncinin hücresel yapı elemanı üzerindeki dağılımı, eleman boyunca azalma eğiliminde olup üçüncü hücreden sonra minimize olmaktadır (Şekil 5.22d). Bu çalışma kapsamında hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen sürtünme direnci üçüncü hücreden sonra minimize olmakta olup hücresel elemanlar ile tasarlanacak yapı tasarımında bu durumun dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.





Şekil 5.22. Hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen sürtünme direncinin eleman boylarına göre değişimi a) $L=170 \text{ mm}$, b) $L=340 \text{ mm}$, c) $L=510 \text{ mm}$ ve d) $L=850 \text{ mm}$

5.3.3. Çekme kapasitesinin belirlenmesi

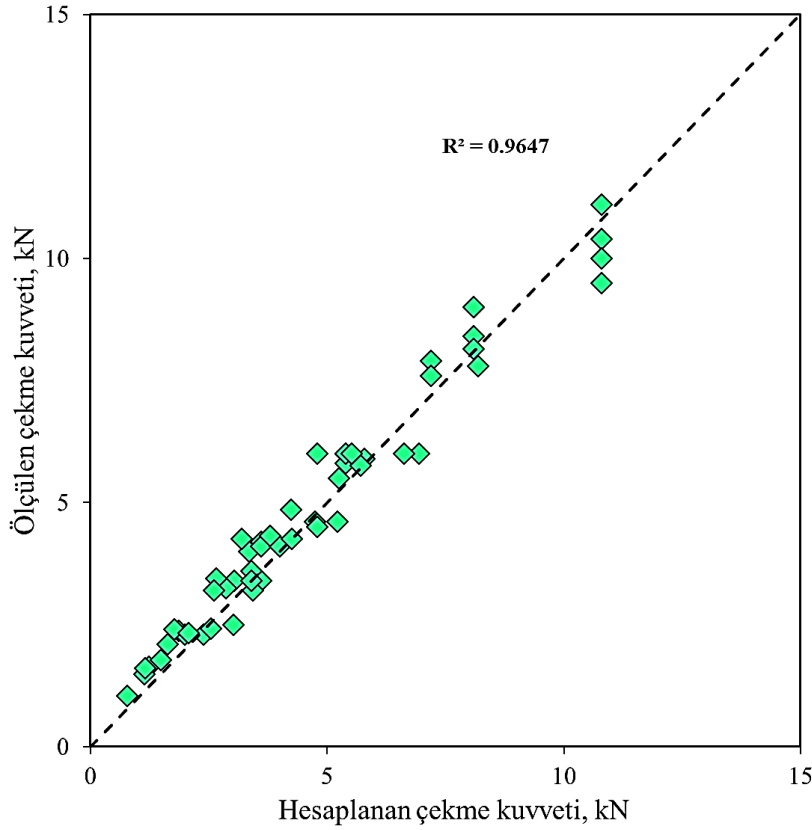
Bu çalışma kapsamında hücresel yapı elemanlarının zeminler içerisindeki çekme kapasitesi teorik olarak, enine elemanlar üzerinde meydana gelen pasif dirençler (Eşitlik 5.11) ile boyuna eleman üzerinde meydana gelen sürtünme dirençlerinin (Eşitlik 5.17) toplamına eşit olmaktadır. Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, toplam 55 adet deney numunesi için teorik olarak belirlenmiş ve deneysel olarak ölçülen çekme kapasiteleri ile

karşılaştırılmıştır. Bir örnek olması açısından $\sigma_v=10.12$ kPa düşey gerilme altında konfigürasyonu 2x3, yüksekliği 100 mm, boyu 510 mm ve genişliği 260 mm olan Test no: 15' e ait deney numunesinin çekme kapasitesi teorik olarak Eşitlik 5.10, 5.11 ve 5.17 yardımı ile hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilen çekme kapasitesi ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde 15 No' lu deney numunesinin çekme kapasitesi, geliştirilen teorik denklemler yardımı ile EK-3' te sunulduğu gibi belirlenmiştir.

Toplam 55 adet deney numunelerine ait çekme kapasiteleri teorik olarak, yukarıda bahsedilen Test no:15 (EK-3) deney numunesine benzer olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan çekme kapasiteleri deneysel olarak ölçülen çekme kapasiteleri ile karşılaştırılmış ve Çizelge 5.4 ve Şekil 5.24' te verilmiştir. Deneysel ve teorik çekme kapasiteleri arasında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmektedir (Şekil 5.24). Dolayısıyla hücrel yapı elemanları ile yapılacak donatılı yapı tasarımlarında pratik amaçlar doğrultusunda, çekme yüklerine maruz kalan hücrel yapı elemanları üzerinde oluşan çekme kuvvetlerinin teorik olarak belirlenmesi için önerilen teorik yaklaşımın oldukça faydalı olacağı düşünülmektedir.

Çizelge 5.4. Deneysel ve teorik olarak hesaplanan çekme kuvvetlerinin karşılaştırılması

Test No	Ölçülen, kN	Hesaplanan, kN	Test No	Ölçülen, kN	Hesaplanan, kN	Test No	Ölçülen, kN	Hesaplanan, kN
1	1.04	0.73	21	5.90	5.67	41	9.00	12.95
2	1.64	1.17	22	7.90	8.63	42	2.32	1.95
3	2.37	1.93	23	6.00	6.86	43	3.60	3.07
4	2.30	2.36	24	7.60	12.09	44	5.76	5.07
5	3.40	3.66	25	1.60	1.10	45	6.00	5.19
6	4.20	4.18	26	2.40	1.64	46	7.80	7.98
7	4.00	3.30	27	3.45	2.48	47	10.40	13.09
8	4.10	6.99	28	3.20	3.37	48	9.50	14.86
9	1.49	1.06	29	4.60	5.21	49	11.10	21.76
10	2.30	1.84	30	6.00	6.17	50	10.00	12.37
11	3.40	3.16	31	5.80	7.47	51	9.00	12.95
12	3.25	2.74	32	6.00	10.03	52	2.32	1.95
13	4.60	4.61	33	2.10	1.54	53	3.60	3.07
14	6.00	6.54	34	3.20	2.38	54	5.76	5.07
15	5.50	5.26	35	4.86	3.87	55	6.00	5.19
16	6.00	9.65	36	4.25	4.04			
17	1.77	1.38	37	6.00	6.57			
18	2.41	2.27	38	8.40	9.68			
19	4.10	4.04	39	8.15	11.23			
20	4.32	3.62	40	9.00	15.88			



Şekil 5.24. Ölçülen ve hesaplanan çekme kuvvetlerinin karşılaştırılması

5.4. Sonuçlar ve Bulgular

Bu bölümde laboratuvarında tasarlanan çekme deney düzeneği kullanılarak hücresel yapı elemanları üzerinde yapılan çekme deneyi ile hücresel yapı elemanı ile zemin arasındaki davranış incelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda bu çalışma kapsamında geliştirilen teorik denklem yardımı ile belirlenen çekme kapasitesi deneysel olarak ölçülen çekme kapasitesi ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular aşağıda tartışılmıştır.

1. Laboratuvarında geliştirilen çekme deney düzeneği, uygun ölçüm cihazlarının (gerinim pulları, yük hücreleri, deplasman ölçerler vb.) kullanımı ile hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen sürtünme ve pasif direncin belirlenmesine olanak sağlamaktadır.
2. Çekme deney düzeneği, hücresel yapı elemanları üzerine boyunca yerleştirilen gerinim pulları vasıtasıyla eleman üzerinde oluşan sürtünme ve pasif dirençlerin dağılımının belirlenmesinde de çözüm sunmaktadır.

3. Elde edilen çekme kapasiteleri hücresel yapı elemanına ait malzeme dayanımına bağlı olduğu belirlenmiştir. Eşitlik 10' da malzemenin çekme dayanımı dikkate alınarak belirlenen çekme kapasiteleri teorik olarak malzeme dayanımını aşamayacak şekilde sınırlandırılmıştır.
4. Elde edilen bulgular neticesinde hücresel yapı elemanının boyutlarının çekme direncine önemli ölçüde etkisinin olduğu belirlenmiştir. Eleman boyutları artıkça hücresel yapı elemanının çekme kapasitesi de artmaktadır. Bu durum artan hücre boyutlarının ilave sürtünme ve pasif direnç alanları oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Fakat eleman boyunca artan hücre sayısı belli bir değerden sonra çekme kapasitesine etki etmediği görülmüştür.
5. Hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan sürtünme direnci genel olarak kutu ön yüzüne yakın bölgelerde yüksek değerlere ulaşmakta olup eleman boyunca göreceli olarak azalmaktadır. Ayrıca artan düşey gerilme ile eleman üzerinde oluşan sürtünme ve pasif dirençleri artmaktadır.
6. Sonuç olarak geliştirilen teorik denklem ile belirlenen çekme dirençleri ile deneysel olarak ölçülen çekme kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Geliştirilen teorik denklemlerin uyumlu sonuç verdiği Şekil 5.24' te açıkça verilmiştir. Dolayısıyla hücresel yapı elemanları için geliştirilen teorik denklemin donatılı istinat duvarları için kullanımı faydalı olacağı düşünülmektedir.

6. HÜCRESEL YAPI ELEMANLARININ ÇEKME GERİLMESİ- DEPLASMAN DAVRANIŞI MODELİ

6.1. Giriş

Geosentetikler, zeminlerin taşıma gücünün artırılmasında, şev stabilizasyonunda, istinat yapılarında ve birçok geoteknik mühendisliği uygulama alanlarında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Geosentetikler, düşük esneklikte olan metalik donatı elemanlarından yüksek esnekliğe sahip polimerik donatı elemanlarına kadar çok farklı çeşitlerde donatı elemanları olarak kullanılmaktadır. Özellikle son zamanlarda farklı boyutlarda ve şekillerde olmak üzere polimerik malzemeden imal edilmiş geosentetik malzemeler; maliyet, zaman ve kullanılabilirlik açısından oldukça etkili çözümler sunmaktadır.

İstinat yapıları ve şevlerde kullanılan geosentetik malzemeler düşey yükler altında çekme kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Bu nedenle geosentetik malzemelerin zeminler içerisinde çekme kapasitelerinin belirlenmesi güvenli yapılar oluşturmak için önem arz etmektedir. Bu bakımdan geosentetiklerin çekme kuvvetleri altındaki davranışları birçok araştırmacı tarafından (Chang ve diğ., 1977; Palmeira ve Milligan, 1989; Farrag ve diğ., 1993; Bergado ve Chai, 1994; Alfaro ve diğ., 1995a; Lopes ve Ladeira, 1996; Tatlısöz ve diğ., 1998; Bergado ve Teerawattanasuk, 2001; Moraci ve Gioffre, 2006; Zornberg ve diğ., 2009, Işık ve Gürbüz, 2020) hem laboratuvarda hem de arazide çekme deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Geosentetikler ile zeminler arasındaki sürtünme davranışını ifade eden çekme gerilmesi- deplasman davranışının ortaya konması amacıyla yapılan çekme deneylerinde, çekme deney düzenekleri kullanılan donatı elemanının türüne ve boyutlarına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Zemin ortamı ve geosentetikler arasındaki sürtünme davranışının, genellikle geogrid kullanılarak laboratuvarda yapılan çekme deneyleri veya sonlu elemanlar modelleri ile belirlendiği çalışmalara literatürde rastlanmıştır (Sugimoto ve Alagiyawanna, 2003; Abdi ve Zandieh, 2014; Wang ve diğ., 2016). Çekme yüklerini geogridler yapıları gereği boyuna ve enine donatı elemanları üzerine aktarmaktadır. Boyuna elemanlar sürtünme kuvvetlerini karşılarken enine elemanlar ise pasif kuvvetleri karşılamaktadır (Jewell ve diğ., 1985). Çekme yüklerinin donatı elemanı üzerindeki dağılımları donatı elemanının rijitliğine bağlı olmaktadır. Geosentetik malzemeler üzerindeki üniform olmayan gerilme dağılımlarının belirlenmesi oldukça önemli olmaktadır.

Zemin ortamı ile geosentetik ara yüzey sürtünme davranışının belirlenmesinde genellikle geogrid, geoşerit ve geomembran gibi yüzeysel donatı elemanları kullanılmaktadır. Fakat üç boyutlu ve hücreli yapıya sahip hücreli yapı elemanı ile zemin arasındaki sürtünme davranışını ortaya koyan çalışmalar yüzeysel donatı elemanları için yapılan çalışmalar kadar yeterli düzeyde değildir. Hücreli yapı elemanları ile zemin ortamı arasındaki sürtünme davranışının belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmaların son derece sınırlı sayıda araştırmacı tarafından yapıldığı görülmüştür (Mehrijardi ve Motarjemi, 2018; Işık ve Gürbüz, 2018; Işık ve Gürbüz, 2020; Işık et al., 2020). Literatürde ara yüzey sürtünme davranışının belirlenmesi için yapılan çalışmalar incelendiğinde, geosentetiklerin zemin ortamı ile ara yüzey çekme gerilmesi- deplasman davranışlarının belirlenmesi için yapılan araştırmalara rastlanmış olmasına rağmen, özellikle hücreli yapı elemanları ile ilgili çalışmaların diğer geosentetik türlerine göre çok daha az sayıda olduğu ve genelleştirilmiş bir ara yüzey sürtünme davranışı modelinin olmadığı görülmüştür. (Zhang ve diğ., 2008; Khedkar ve Mandal, 2009; Lin ve diğ., 2014; Mosallanezhad ve diğ., 2016; Işık ve Gürbüz, 2018; Işık ve Gürbüz, 2020; Işık ve diğ., 2020). Bu nedenle, zemin ortamına gömülü hücreli yapı elemanları ile zemin arasındaki çekme gerilmesi-deplasman davranış modelinin oluşturulması için kapsamlı bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Zemin ortamında bulunan geosentetik donatı elemanları ile zemin arasındaki ara yüzey davranışını ifade eden çekme gerilmesi-deplasman davranış modelleri, geosentetik donatılı yapı tasarımlarında önemli rol oynamaktadır. Söz konusu çekme gerilmesi-deplasman modellerinin gerçekçi ve deneysel sonuçlar ile doğrulanmış olarak oluşturulması, tasarım aşamasında analizlerde kullanılabilecek genelleştirilmiş davranış modelinin elde edilmesi, bu tür geosentetik güçlendirme elemanlarının kullanıldığı yapıların analizleri ve tasarımlarının gerçekçi olarak yapılabilmesi için son derece önemlidir.

Çekme deneylerinde hücreli yapı elemanlarının üç boyutlu yapısı nedeniyle özel deney aparatlarına ve düzeneğine ihtiyaç duyulmaktadır. Işık ve Gürbüz (2018, 2020) tarafından yapılan çekme deneylerinde, hücreli yapı elemanları ile zemin ortamı arasındaki ara yüzey davranışının belirlenmesi amacıyla, tasarımları yazarlar tarafından geliştirilen özel büyük ölçekli bir çekme deney düzeneği ve hücreli yapı elemanlarının boyutlarına bağlı olarak farklı ölçülerde tutma aparatları kullanarak çok sayıda deney gerçekleştirmişlerdir. Işık ve Gürbüz (2018, 2020) tarafından gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda elde edilen bulgular “Kohezyonsuz Zeminler İçerisindeki Hücreli Yapı Elemanlarının (Geocell)

Çekme Kapasitelerinin Belirlenmesine Yönelik Laboratuvar Deney Düzeneği” adlı bölümde detaylı bir şekilde verilmiştir.

Bu bölümde toplam 55 adet çekme deney sonuçları (“Hücresel Yapı Elemanlarının Çekme Kuvvetleri Altındaki Davranışı” adlı bölüm Çizelge 4.1’ e ve EK-1’ e bakınız) kullanılarak, üç boyutlu olan hücresel yapı elemanları türündeki geosentetikler ve zemin ortamı arasındaki çekme gerilmesi-deplasman davranışının genelleştirilmesi ve bir ara yüzey davranış modeli önerisinin oluşturulması amaçlanmıştır. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri ve hücresel yapı elemanlı geosentetikler üzerinden alınan birim uzama ölçümü dağılımları kullanılarak zemin ile hücresel yapı elemanları arasındaki sürtünme davranışı modeli geliştirilmiştir. Sürtünme davranışını modelinde, maksimum çekme gerilmesi değerlerinin hesaplanmasında kullanılabilecek genel bir denklem ve ara yüzey için bir çekme gerilmesi-deplasman davranış modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen sürtünme davranış modelinin tasarımlar ile sonlu eleman analizlerinde kullanılabilecek bir model olduğu ve faydalı olacağı düşünülmektedir.

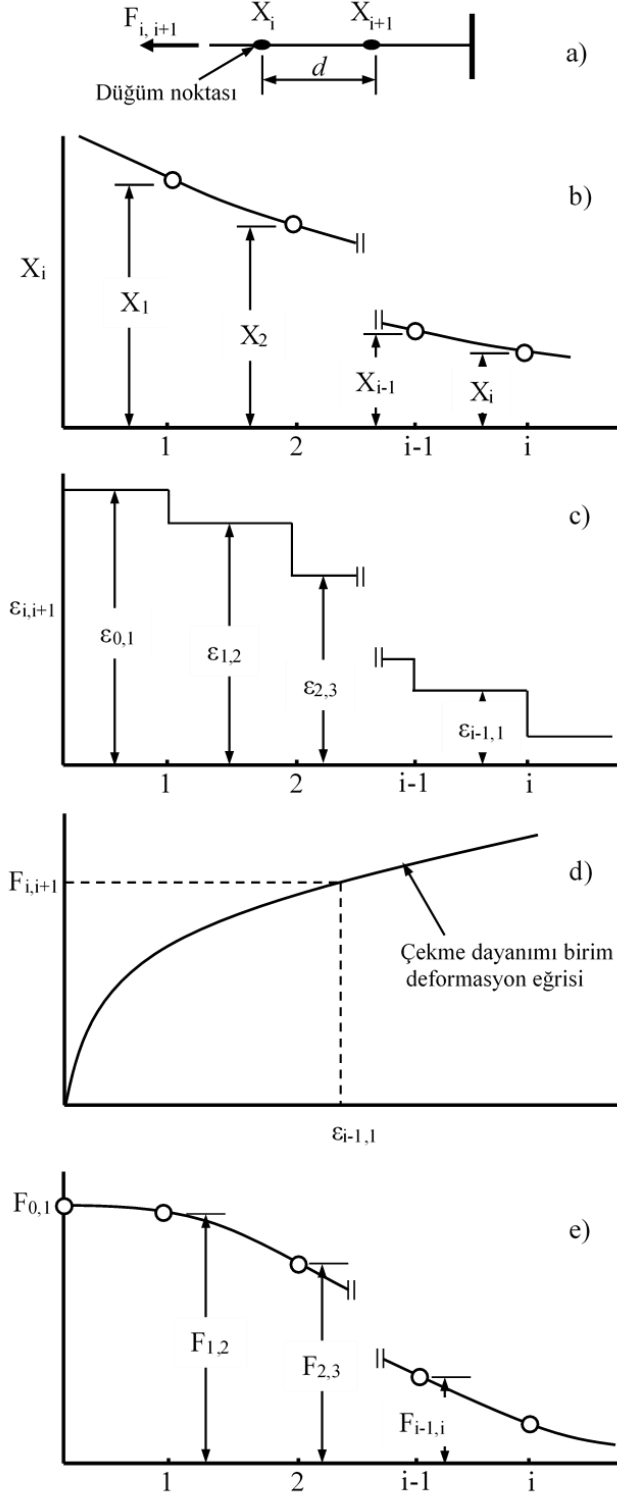
6.2. Çekme Gerilmeleri

Yapı yüklerinden dolayı çekme kuvvetlerine maruz kalan geosentetiklerin çekme kuvvetleri altındaki sürtünme davranışı laboratuvarda yapılan çekme deneyleri ile belirlenmektedir. Çekme kuvveti, geosentetik donatı elemanı üzerinde mobilize olarak eleman boyunca dağılım göstermektedir. Çekme kuvvetlerinin geosentetik donatı elemanı üzerindeki mobilizasyonu çekme deneyi ile belirlenmektedir (Ochiai ve diğ., 1996). Ochiai ve diğ., (1996) tarafından yapılan çekme deneyleri sonucunda çekme kuvvetlerini geogrid donatı elemanı üzerinde ölçülen deplasmanlara göre belirlenmiştir. Çekme kuvvetlerinin belirlenmesi için yapılan basit bir yaklaşım, işlem aşamasına göre Şekil 6.1 ’de verilmiştir. Yapılan çekme deneylerinde, X_i geogrid donatı elemanları üzerinde herhangi bir i . düğüm noktasındaki deplasman (Şekil 6.1b), $\varepsilon_{i,i+1}$ ise iki düğüm noktası arasındaki birim uzama (i . ve $i+1$.) olup Eşitlik 6.1 yardımı ile belirlenmektedir (Şekil 6.1c).

$$\varepsilon_{i,i+1} = (X_i - X_{i+1})/d \quad (6.1)$$

Burada “d” herhangi iki düğüm noktasındaki mesafedir (Şekil 6.1). Eşitlik 6.1 yardımı ile elde edilen birim uzamalar, geogrid donatı elemanına ait çekme dayanımı-birim uzama

eğrisinde (Şekil 6.1d) yerine konularak geogrid donatı elemanı üzerinde herhangi iki düğüm noktası arasındaki çekme kuvveti ($F_{i,i+1}$) belirlenmektedir (Şekil 6.1e).



Şekil 6.1. Çekme gerilmelerinin belirlenmesi için önerilen işlem aşamaları (Ochiai ve diğ., 1996).

6.2.1. Hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen birim uzamalar

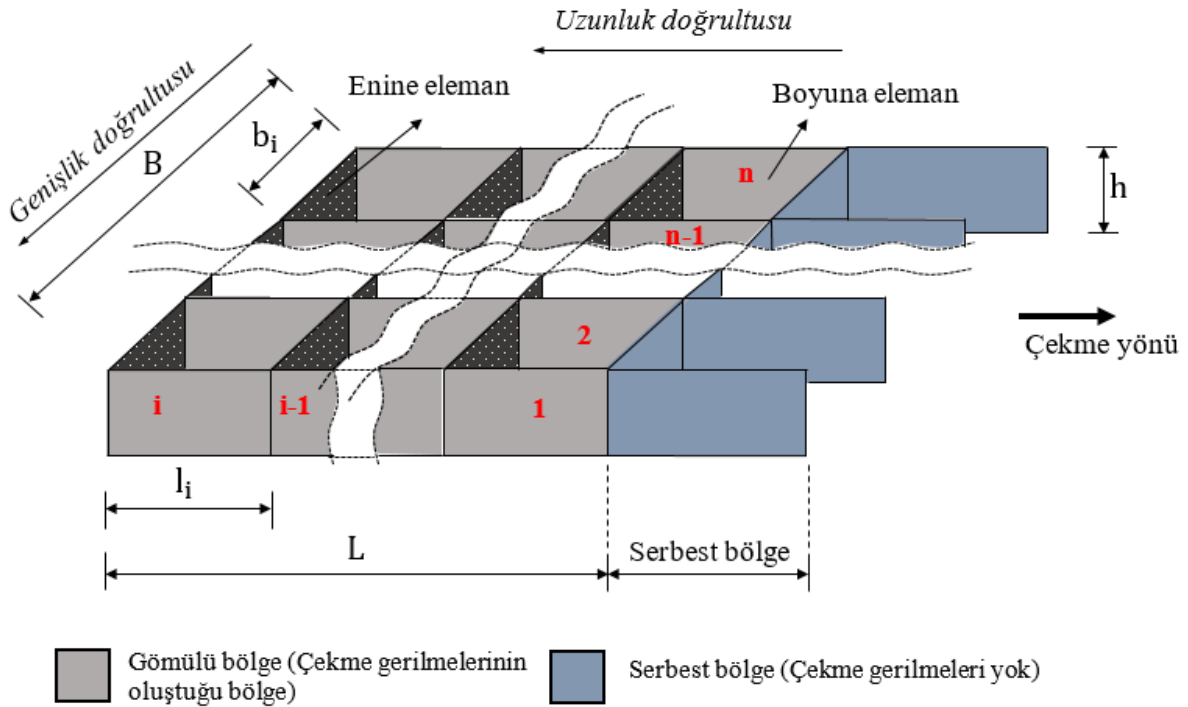
Zemin ortamında hücresel yapı elemanı çekme kuvvetine maruz kaldığında hücresel yapı elemanı boyunca farklı oranlarda uzamalar meydana gelmektedir. Boyuna olarak deney elemanları üzerinde oluşan bu uzamalar, elemanın boyutlarına ve zemin ortamına uygulanan düşey gerilmeye bağlı olarak farklılık göstermektedir. Özellikle, zemin ortamına uygulanan düşey gerilmenin artması ile hücresel yapı elemanları üzerindeki uzamalarda artış gözlemlenmektedir (EK-1). Bu bakımdan deney elemanları üzerinde boyunca oluşan farklı uzama miktarlarının belirlenmesi, hücresel yapı elemanları üzerindeki gerilme dağılımlarının belirlenmesi için önem teşkil etmektedir. Bu bölümde hücresel yapı elemanları üzerinde, eleman boyunca oluşan gerilme dağılımları ve gerilme dağılımlarına etki eden faktörler incelenmiştir. Hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan birim uzamalar ve gerilme dağılımları elemanlar üzerlerine yerleştirilen gerinim pulları yardımıyla belirlenmiş ve 4. Bölüm’ de detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca deney elemanları boyunca oluşan deplasmanlar deplasman ölçerler (LVDT) yardımı ile belirlenmiştir (4. Bölüm). Şekil 5.17 ‘de (5. Bölüm) zemin ortamına uygulanan farklı düşey gerilme değerleri altında deney elemanları boyunca oluşan birim uzama dağılımlarından seçilen bazı örnekler sunulmuştur. Zemin ortamına uygulanan düşey gerilme değerlerinin artması sonucunda birim uzama değerleri de artmaktadır. Birim uzama değerleri tüm deneyler için kutu ön yüzüne yakın bölgelerde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Hücresel yapı elemanları boyunun artmasıyla birim uzama değerleri de artmış ve hücresel yapı elemanının üretildiği malzemenin dayanım noktasına yaklaştıkça değişmediği görülmüştür.

6.2.2. Çekme gerilmesinin belirlenmesi

Bu bölümde zemin ortamı ile hücresel yapı elemanları arasındaki çekme gerilmesi-deplasman ara yüzey davranışları, 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme değerleri altında gerçekleştirilen çekme deneyleri ile belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, hücresel yapı elemanlarının boyutları (genişlik, boy ve yükseklik), hücresel yapı elemanının üretildiği malzeme rijitliği ve zemin ortamına uygulanan düşey gerilmeler gibi değişkenler incelenmiştir. Bu değişkenlerin zemin ortamı ile hücresel yapı elemanları arasında meydana gelen çekme gerilmesi-deplasman davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Zemin ortamı ile hücresel yapı elemanı arasındaki ara yüzey etkileşim mekanizması ile hücresel yapı elemanı üzerinde çekme kuvvetleri meydana gelmektedir. Çekme kuvvetleri hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin mobilizasyonu ile oluşmaktadır. Çekme gerilmeleri, zeminin kayma mukavemeti açısına, sıklığına, donatı elemanının uzunluğuna ve üretildiği malzemenin rijitliğine bağlı olarak değişmektedir (Ochai ve diğ., 1996; Sugimoto ve diğ., 2001).

Çekme gerilmeleri hücresel yapıya sahip geosentetik donatı elemanları boyunca meydana gelmektedir. Çekme gerilmelerinin hesaplanması için Şekil 6.2 'de verilen hücresel yapı elemanına ait şematik gösterim kullanılmıştır. Şematik gösterimde verilen hücresel yapı elemanı (Şekil 6.2) için “n” herhangi bir eleman için boyuna donatı elemanlarından oluşan kol sayısını, “i” ise herhangi bir eleman için birim genişlikte bulunan boyuna donatı eleman sayısını ifade etmektedir. Deney elemanının serbest bölgede olan boyuna donatı elemanı (zemin ortamı ile temas etmeyen kısmı) üzerinde oluşan gerilme, zemin ortamı ile arasında sürtünme olmadığından burada oluşan gerilmeler sürtünmeden kaynaklı çekme gerilmeleri olmamaktadır. Buna göre zemin ortamı ile donatı arasındaki çekme gerilmeleri, serbest bölgenin bitiş noktasından başlayarak i. boyuna donatı elemanlarına kadar olan bölgede oluşmaktadır.



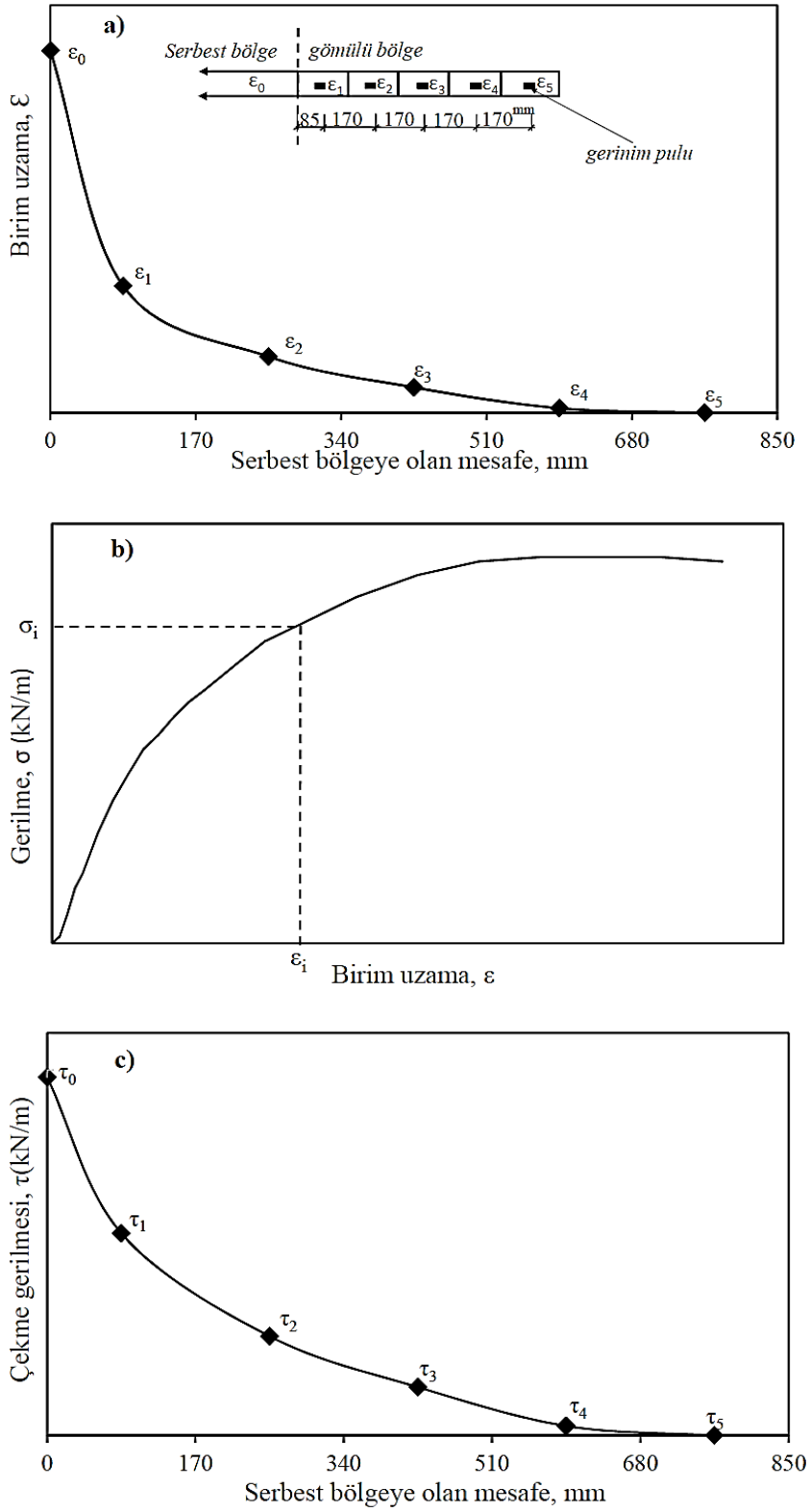
Şekil 6.2. Hücresel yapı elemanının şematik gösterimi

Hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri hücre kenarına yerleştirilen birim uzama ölçerler (gerinim pulu) yardımı ile birim uzamalara (ϵ_i) bağlı olarak kolay bir şekilde ölçülmektedir (“Hücresel Yapı Elemanlarının (Geocell) Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı bölüm Şekil 5.21’ e bakınız). Çekme gerilmeleri (τ_i), belirlenen birim uzamaların hücresel yapı elemanına ait gerilme-birim uzama eğrisinde yerine konularak elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamında çekme gerilmeleri, Ochiai ve diğ., (1996) tarafından yapılan yaklaşıma (Şekil 6.1) benzer olarak Şekil 6.3’ te verilen işlem sırasına göre belirlenmiştir. Buna göre çekme gerilmesinin belirlenmesi için yapılan işlemler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

1. Hücresel yapı elemanı üzerine yerleştirilen gerinim pulları yardımı ile eleman boyunca hücre üzerinde oluşan birim uzamalar (ϵ_i) belirlenir (Şekil 6.3a).
2. Belirlenen birim uzamalar (ϵ_i), hücresel yapıya sahip geosentetik malzemesine ait gerilme-birim uzama eğrisinde yerine konularak hücre üzerinde meydana gelen gerilme (σ_i) elde edilir (Şekil 6.3b). Bu gerilme aynı zamanda hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan çekme gerilmesi olarak ta adlandırılabilir.
3. Herhangi bir hücre elemanı üzerinde meydana gelen toplam çekme gerilmesi (τ_i) ise boyuna eleman kol sayısının o eleman üzerinde elde edilen çekme gerilmesine çarpımı ile elde edilir. Buna göre hücresel yapı elemanı üzerinde herhangi bir i. boyuna eleman üzerinde oluşan toplam çekme gerilmesi (Şekil 6.3c) Eşitlik 6.2 yardımı ile aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

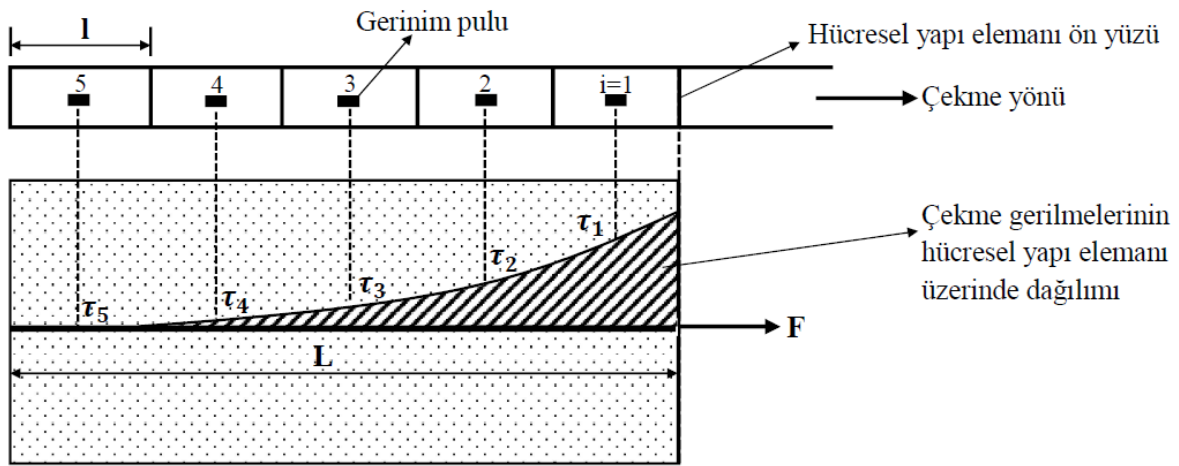
$$\tau = \sum_{i=1}^n \tau_i = n \left(\frac{\sigma_i}{l} \right) \quad (6.2)$$

Burada τ toplam çekme gerilmesi, n boyuna eleman kol sayısı, τ_i herhangi bir i. boyuna eleman üzerindeki çekme gerilmesi, l boyuna elemanın uzunluğudur.



Şekil 6.3. Hücresel yapı elemanı üzerinde meydana gelen çekme gerilmesinin belirlenmesi için uygulanan işlem aşamaları; a) Hücresel yapı elemanı boyunca meydana gelen birim uzama dağılımı b) hücresel yapı elemanına malzemesine ait gerilme-birim uzama eğrisi c) hücresel yapı elemanı boyunca meydana gelen çekme gerilmelerinin dağılımı

Hücresel yapı elemanı üzerindeki maksimum çekme gerilmesi serbest bölgenin hemen bittiği ve gömülü bölgenin ilk hücresinde meydana gelmektedir (Şekil 6.4). Hücresel yapı elemanı boyunca ölçülen birim uzamalara bağlı olarak çekme gerilmeleri elaman boyunca azalmaktadır (Şekil 6.4). Çekme gerilmelerinin hücresel yapı elemanları üzerinde dağılımları, birim uzamaların hücresel yapı elemanları üzerindeki dağılımına (“Hücresel Yapı Elemanlarının (Geocell) Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı bölüm Şekil 5.17’ ye bakınız) benzer olmaktadır.



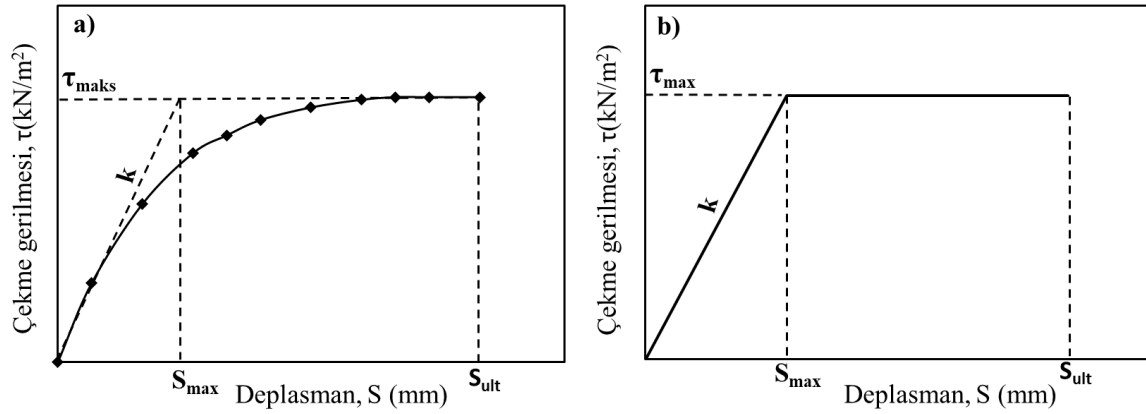
Şekil 6.4. Çekme gerilmelerinin hücresel yapı elemanı üzerinde dağılımının şematik gösterimi

Hücresel yapı elemanı üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri maksimum değerine ilk hücre elemanı üzerinde ulaşmaktadır. Buna göre maksimum çekme gerilmesi Eşitlik 6.3 yardımı ile belirlenmektedir.

$$\tau_{maks} = n\tau_1 \quad (6.3)$$

6.3. Çekme Gerilmesi-Deplasman Modeli

Deneysel olarak ölçülen birim uzama değerleri kullanılarak hesaplanan çekme gerilmeleri ve deplasman değerlerinden, Şekil 6.5a 'da verilen çekme gerilmesi-deplasmanı grafikleri elde edilmiştir. Genelleştirilmiş bir ara yüzey sürtünme davranışı elde edebilmek için zemin ile hücresel yapı elemanı arasındaki çekme gerilmesi-deplasman davranışı (Şekil 6.5a) çift doğrulu (bilineer) bir basitleştirme ile Şekil 6.5b'de sunulduğu gibi idealleştirilmiştir.



Şekil 6.5. Deneylerden elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

Bu çalışma kapsamında, hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan maksimum çekme gerilmesi değerleri, çekme deplasmanları ve başlangıç rijitlik değerleri (Eşitlik 6.4) hücresel yapı elemanı ile zemin ortamı arasındaki ara yüzey davranışını ifade eden çekme gerilmesi–deplasmanı grafiklerinden elde edilmiş ve Çizelge 6.1’ de verilmiştir. Ayrıca toplam 55 adet hücresel yapı elemanına ait çekme gerilmesi-deplasman ilişkileri EK-2’ de eleman konfigürasyonlarına göre verilmiştir.

Kullanılan hücresel yapı elemanının malzeme rijitliğine bağlı olarak çekme gerilmesi-deplasman davranışları farklılık gösterebilmektedir. Sugimoto ve Alagiyawanna (2003), özellikle düşük rijitliğe sahip donatı elemanları için maksimum çekme gerilmesinin maksimum uzamaya sebep olacağını ve eleman üzerinde oluşan çekme gerilmesi dağılımının eleman üzerinde oluşan birim uzama dağılımına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

$$k = \frac{\tau_{maks}}{S_{maks}} \quad (6.4)$$

Çizelge 6.1. Deney sonuçları

Test No	Yükseklik, h, (mm)	Genişlik, B, (mm)	Uzunluk, L, (mm)	Düşey Gerilme, σ_v (kPa)	Maksimum Çekme gerilmesi, τ_{maks} (kN/m ²)	Maksimum çekme gerilmesindeki deplasmanlar, S_{max} (mm)	Nihai deplasmanlar S_{ult} , (mm)	Başlangıç rijitliği, k, (kN/m ³)
1	100	130	170	10.12	18.58	0.60	2.10	30967
2	100	130	170	18.10	28.46	0.64	2.20	44474
3	100	130	170	31.40	41.87	0.56	2.50	74770
4	100	130	340	10.12	35.51	1.00	4.40	35510
5	100	130	340	18.10	65.55	1.08	6.60	60692
6	100	130	340	31.40	85.42	1.20	7.60	85416
7	100	130	510	10.12	61.71	1.50	5.50	41000
8	100	130	850	10.12	85.42	1.20	2.20	71180
9	100	260	170	10.12	25.96	2.40	3.50	10818
10	100	260	170	18.10	42.70	2.10	4.00	20331
11	100	260	170	31.40	62.81	1.60	4.85	39254
12	100	260	340	10.12	50.72	8.80	8.30	11528
13	100	260	340	18.10	79.19	6.00	10.50	23998
14	100	260	340	31.40	126.66	2.70	12.00	63329
15	100	260	510	10.12	75.41	5.00	13.20	15081
16	100	260	850	10.12	121.92	8.00	22.00	15239
17	100	390	170	10.12	32.90	1.24	3.70	26532
18	100	390	170	18.10	50.87	0.94	4.80	54121
19	100	390	170	31.40	77.54	0.89	7.00	87129
20	100	390	340	10.12	66.94	7.20	12.00	9298
21	100	390	340	18.10	97.92	6.50	13.50	15064
22	100	390	340	31.40	166.85	6.00	15.00	33370
23	100	390	510	10.12	100.54	4.80	19.50	20946
24	100	390	850	10.12	157.90	4.00	28.00	39476
25	150	130	170	10.12	20.66	0.60	1.80	34400
26	150	130	170	18.10	29.93	1.20	4.60	24942
27	150	130	170	31.40	41.87	0.90	6.80	46524
28	150	130	340	10.12	47.61	1.16	3.40	41000
29	150	130	340	18.10	67.33	5.30	13.00	15658
30	150	130	340	31.40	89.83	4.70	8.20	19113
31	150	130	510	10.12	70.65	1.45	4.80	48724
32	150	130	850	10.12	89.83	1.10	13.00	81663
33	150	260	170	10.12	27.87	0.82	4.20	33990
34	150	260	170	18.10	41.58	0.70	5.60	59396
35	150	260	170	31.40	60.98	0.55	7.90	110866
36	150	260	340	10.12	53.27	5.65	8.00	9428
37	150	260	340	18.10	82.80	6.50	13.00	12738
38	150	260	340	31.40	132.23	3.00	13.40	44076
39	150	260	510	10.12	103.54	11.50	18.00	9003
40	150	260	510	18.10	135.95	8.80	19.00	15448
41	150	260	850	10.12	126.66	2.35	23.00	53897
42	150	390	170	10.12	34.62	1.50	4.70	23079
43	150	390	170	18.10	52.41	1.24	6.20	42266
44	150	390	170	31.40	77.54	0.90	7.00	86161
45	150	390	340	10.12	67.63	2.00	8.20	33816
46	150	390	340	18.10	100.54	4.80	10.40	14363
47	150	390	340	31.40	174.54	6.30	16.00	27705
48	150	390	510	10.12	131.10	10.00	27.00	13110
49	150	390	510	18.10	179.66	11.00	28.00	16333
50	150	390	850	10.12	176.30	7.00	30.00	25186
51*	100	130	340	10.12	64.94	3.00	14.00	21647
52*	100	130	340	18.10	100.57	2.60	15.00	38679
53*	100	260	340	10.12	77.74	3.80	16.00	20458
54*	100	260	340	18.10	145.54	3.50	19.00	41583
55*	100	260	510	10.12	121.48	4.20	23.50	28925

*Malzeme 2

Hücresel yapı elemanı üzerinde oluşan çekme gerilmeleri, sürtünme ve pasif direnç oluşturan boyuna ve enine donatı elemanlarına bağlı olarak hücresel yapı elemanı boyunun artması ile artmaktadır (“Hücresel Yapı Elemanlarının (Geocell) Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı bölüm Şekil 5.17’ ye bakınız). Bu durum artan hücresel yapı elemanı boyunun eleman üzerinde oluşturacağı çekme gerilmesi değerinin de artacağını açıkça göstermektedir. Dolayısıyla maksimum çekme gerilmesi ile hücresel yapı elemanı boyu arasında yakın bir ilişkinin olduğu ortaya çıkmaktadır. Deney elemanı üzerindeki birim uzama değerlerinin artan düşey gerilme ile arttığı belirlenmiştir (“Hücresel Yapı Elemanlarının (Geocell) Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı bölüm Şekil 5.17’ ye bakınız). Dolayısıyla maksimum çekme gerilmesini etkileyen bir diğer faktörün zemin ortamına uygulanan düşey gerilme olduğu rahatlıkla söylenebilir. Ayrıca hücresel yapı elemanının imal edildiği malzemenin türü de bir diğer faktör olarak ortaya çıkmaktadır.

6.3.1. Maksimum çekme gerilmesinin analitik olarak belirlenmesi

Hücresel yapı elemanı üzerinde meydana gelen maksimum çekme gerilmesini etkileyen faktörler “Hücresel Yapı Elemanlarının (Geocell) Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı bölümde Şekil 5.17’ de açıkça görülmektedir. Bu çalışma kapsamında hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen maksimum çekme gerilmeleri ($\tau_{\max}$), hücresel yapı elemanı boyuna (L), hücre genişliğine (B), hücre yüksekliğine (h), hücresel yapı elemanı malzeme rijitliğine (E) ve uygulanan düşey gerilmeye (σ_v) bağlı olarak incelenmiştir. Buna göre hücresel yapı elemanı üzerinde meydana gelen maksimum çekme gerilmesi ($\tau_{\max}$) Eşitlik 6.5 yardımı ile belirlenebilmektedir.

$$\tau_{\max} = \sigma_v \cdot c \cdot \left(\frac{L}{b}\right)^d \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \theta \quad (6.5)$$

Bu bölümde c ve d sabit katsayılar olup tüm deney elemanları için 1.1717 ve 1.091 olarak belirlenmiştir. Hücresel yapı elemanlarının genişliğine (α), yüksekliğine (β) ve rijitliğine (θ) bağlı olan katsayılar Çizelge 6.2’ de verilmiştir. Çizelge 6.2’ de verilen katsayılar Eşitlik 6.5’ te yerine konularak deney elemanlarının maksimum çekme gerilmeleri analitik olarak belirlenmiştir. Maksimum çekme gerilmesinin belirlenmesi amacıyla Eşitlik 6.5’ te verilen

hücresel yapı elemanlarının genişliğine (α), yüksekliğine (β) ve rijitliğine (θ) bağlı olan katsayılar bu bölümde sırasıyla incelenmiştir.

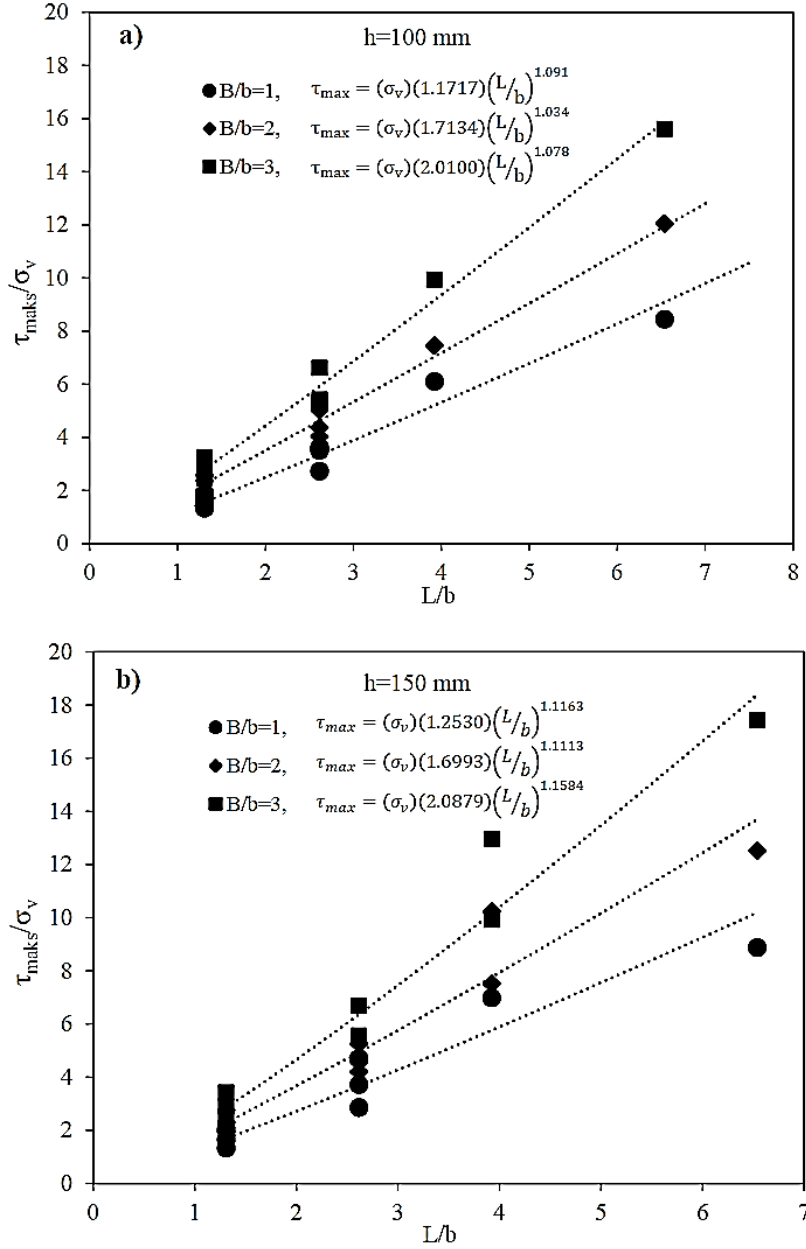
Çizelge 6.2. Maksimum çekme gerilmesinin belirlenmesinde kullanılan katsayılar

Maksimum çekme gerilmesini etkileyen faktörler	Katsayılar		
	α	β	θ
$B/b = 1$	1.000	-	-
$B/b = 2$	1.369	-	-
$B/b = 3$	1.770	-	-
$h_1 = 100 \text{ mm}$	-	1.000	-
$h_2 = 150 \text{ mm}$	-	1.109	-
Malzeme 1 (E_1)	-	-	1.000
Malzeme 2 (E_2)	-	-	1.592

Maksimum çekme gerilmesinin belirlenmesi için referans denklemin oluşturulması

Maksimum çekme gerilmesini etkileyen faktörler ile maksimum çekme gerilmesi arasındaki ilişkiler Şekil 6.6 'da verilmiştir. Maksimum çekme gerilmesi aynı hücresel yapı eleman genişliğinde, hücresel yapı elemanının boyunu ifade eden L/b (eleman boyu/birim hücre genişliği) değerleri ile düşey gerilmeye bağlı $\tau_{\max}/\sigma_v$ (maksimum çekme gerilmesi/düşey gerilme) değerleri ile arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Maksimum çekme gerilmelerinin değişimleri Şekil 6.6 'da $B/b=1$, $B/b=2$ ve $B/b=3$ için verilmektedir. Hücresel yapı elemanının genişliği arttıkça deney elemanı üzerinde oluşan çekme gerilmeleri de artmaktadır. Bu durum daha önce de bahsedildiği gibi artan sürtünme ve pasif direnç alanlarından kaynaklanmaktadır.

Maksimum çekme gerilmesi ile zemin ortamına uygulanan düşey gerilme, hücresel yapı elemanı boyu, genişliği ve yüksekliği arasında oldukça yüksek oranlı bir korelasyon mevcuttur (Şekil 6.6). Farklı B/b değerleri için belirlenen eşitlikler Şekil 6.6 üzerinde hücre yüksekliği (h) 100 mm ve 150 mm olan hücresel yapı elemanları için verilmiştir.



Şekil 6.6. Maksimum çekme gerilmesi ile zemin ortamına uygulanan düşey gerilme (σ_v), hücresel yapı elemanı boyu (L) ve birim hücre genişliği (B/b) arasındaki ilişki a) h=100 mm, b) h=150 mm

Maksimum çekme gerilmeleri, B/b=1 için verilen eşitlikler (Şekil 6.6) yardımı ile zemin ortamına uygulanan düşey gerilme (σ_v), hücresel yapı elemanı boyu (L), birim hücre genişliği (b) ve yüksekliğine (h) bağlı olarak belirlenmiştir. Maksimum çekme gerilmesi değerlerini tüm deney elemanları için tek bir eşitlik halinde elde edebilmek amacıyla Şekil 6.6 'da verilen B/b=1 olan referans deney elemanı genişliği olarak tanımlanan eşitlik kullanılmıştır (Eşitlik 6.6).

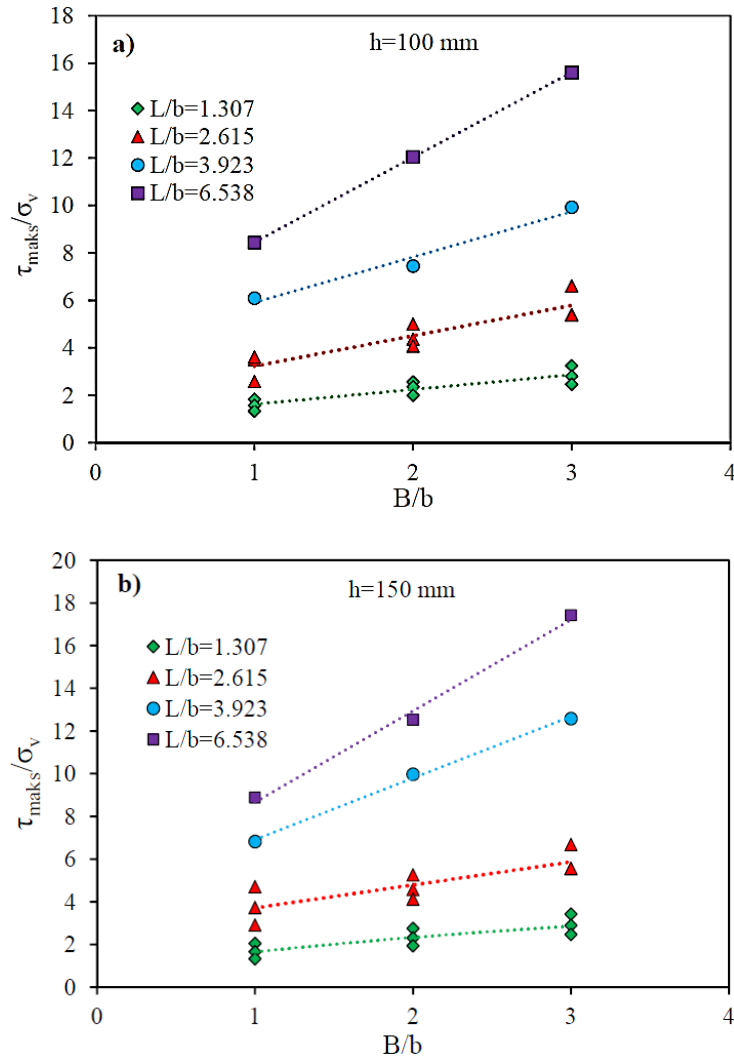
$$\tau_{(maks)ref} = (\sigma_v)(1.1717)\left(\frac{L}{b}\right)^{1.091} \quad (6.6)$$

Eleman genişliğinin (B) maksimum çekme gerilmesine olan etkisinin belirlenmesi

Eleman genişliğinin maksimum çekme gerilmesine olan etkisini ifade etmek için Şekil 6.7’de aynı L/b oranlarında genişlik (B/b=1, B/b=2 ve B/b=3) ile $\tau_{\max}/\sigma_v$ arasındaki ilişkiler verilmiştir. Genişliğin etkisini ifade etmek için kullanılan α katsayıları (Eşitlik 6.7) aynı L/b değerleri için aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Eşitlik 6.7’ de verilen “j” ifadesi eleman genişliğinin birim hücre genişliğine oranı olup Eşitlik 6.8’ de verilmiştir.

$$\alpha = \frac{(\tau_{\max}/\sigma_v)_{j=2} \text{ veya } 3}{(\tau_{\max}/\sigma_v)_{j=1}} \quad (6.7)$$

$$j = \frac{B}{b} \quad (6.8)$$



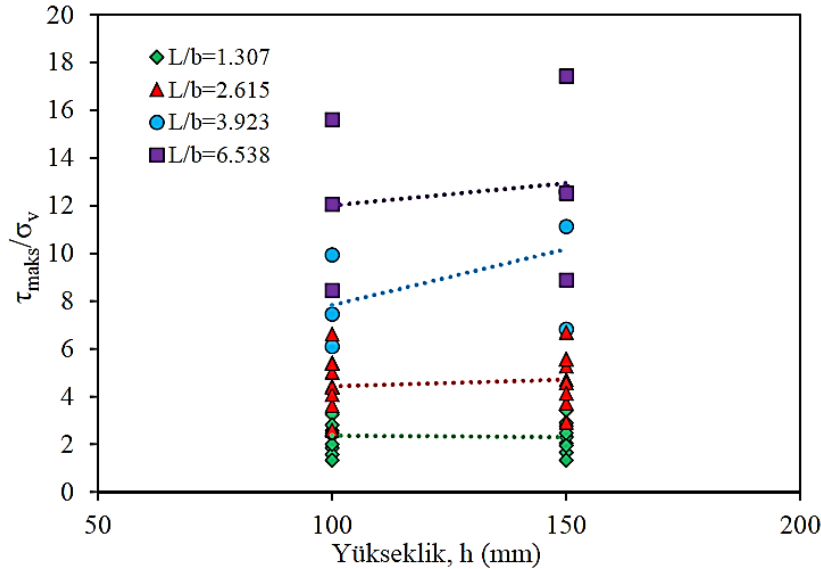
Şekil 6.7. Aynı eleman boyları (L/b) için, $\tau_{\max}/\sigma_v$ ile B/b arasındaki ilişki a) h=100 mm, b) h=150 mm

Maksimum çekme gerilmelerinin belirlenmesi için kullanılan α katsayıları (Şekil 6.7) 100 mm ve 150 mm hücre yükseklikleri için birbirlerine yakın değerlerde olduğu söylenebilir. Dolayısıyla her iki yükseklik için de genişliğin etkisini ifade eden α katsayıları eşit alınmış ve yüksekliğin etkisi ise Şekil 6.8 'de ayrı olarak incelenmiştir. Yukarıda Şekil 6.7 ve Eşitlik 6.5 yardımı ile α katsayıları $B/b=1$ için 1.00, $B/b=2$ için 1.369 ve $B/b=3$ için ise 1.770 olarak belirlenmiştir.

Eleman yüksekliğinin (h) maksimum çekme gerilmesine olan etkisinin belirlenmesi

Yüksekliğin etkisini ifade etmek için kullanılan β katsayıları, $\tau_{\max}/\sigma_v$ ile h arasındaki ilişkidir belirlenmiştir (Şekil 6.8). Şekilden de görüldüğü üzere 150 mm hücre yüksekliği için aynı L/b değerlerinde daha yüksek $\tau_{\max}/\sigma_v$ değerleri görülmektedir. Referans yükseklik olarak belirlenen 100 mm ile β katsayıları, Şekil 6.8' den elde edilen Eşitlik 6.9 yardımı ile aşağıdaki gibi belirlenmektedir. Eşitlik 6.9 yardımı ile β katsayıları hücre yüksekliği 100 mm ve 150 mm için sırasıyla 1.00 ve 1.109 olarak belirlenmiştir.

$$\beta = \frac{(\tau_{\max}/\sigma_v)_{h_2=150 \text{ mm}}}{(\tau_{\max}/\sigma_v)_{h_1=100 \text{ mm}}} \quad (6.9)$$



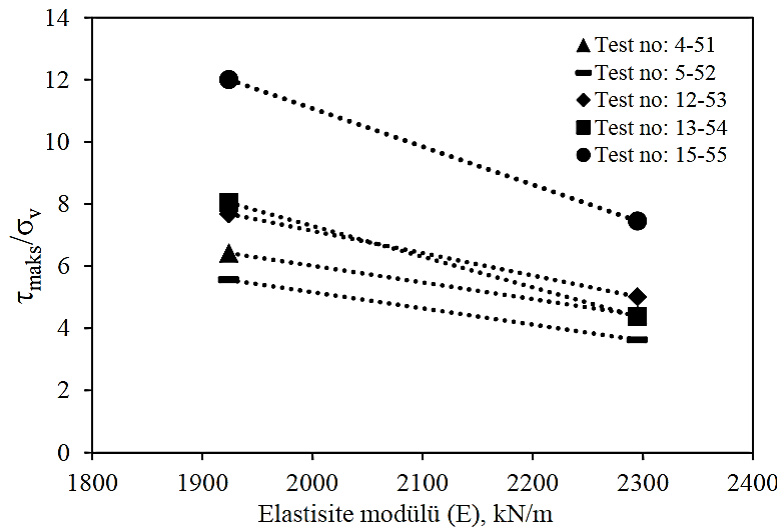
Şekil 6.8. Aynı eleman boyları (L/b) için $\tau_{\max}/\sigma_v$ ile h arasındaki ilişki

Eleman rijitliğinin (E) maksimum çekme gerilmesine olan etkisinin belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında hücrel yapı elemanı rijitliğinin (elastisite modülü) maksimum çekme gerilmeleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla iki ayrı malzeme türünde olan deney elamanları kullanılmıştır. Her iki malzeme (hücrel yapı elemanı) türü de aynı boyutlarda deney elemanları olarak hazırlanmış ve aynı düşey gerilme değerleri altında çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan çekme deneyleri sonucunda her iki hücrel yapı elemanı arasında maksimum çekme gerilmeleri açısından karşılaştırma yapılmış ve elde edilen bulgular Şekil 6.9 'da verilmiştir. Hücrel yapı elemanının rijitliğinin etkisini belirlemek amacıyla toplam 5 adet deney elemanı üzerinde yapılan karşılaştırmaya göre belirlenen θ katsayıları (Eşitlik 6.10), Şekil 6.9 'da $\tau_{\max}/\sigma_v$ ile elastisite modülü arasındaki ilişki yardımı ile belirlenmiştir. Malzeme türüne göre farklı iki hücrel yapı elemanına ait gerilme-birim uzama eğrilerinden elde edilen elastisite modülleri ile θ katsayıları;

$$\theta = \frac{(\tau_{\max}/\sigma_v)_{E_2}}{(\tau_{\max}/\sigma_v)_{E_1}} \quad (6.10)$$

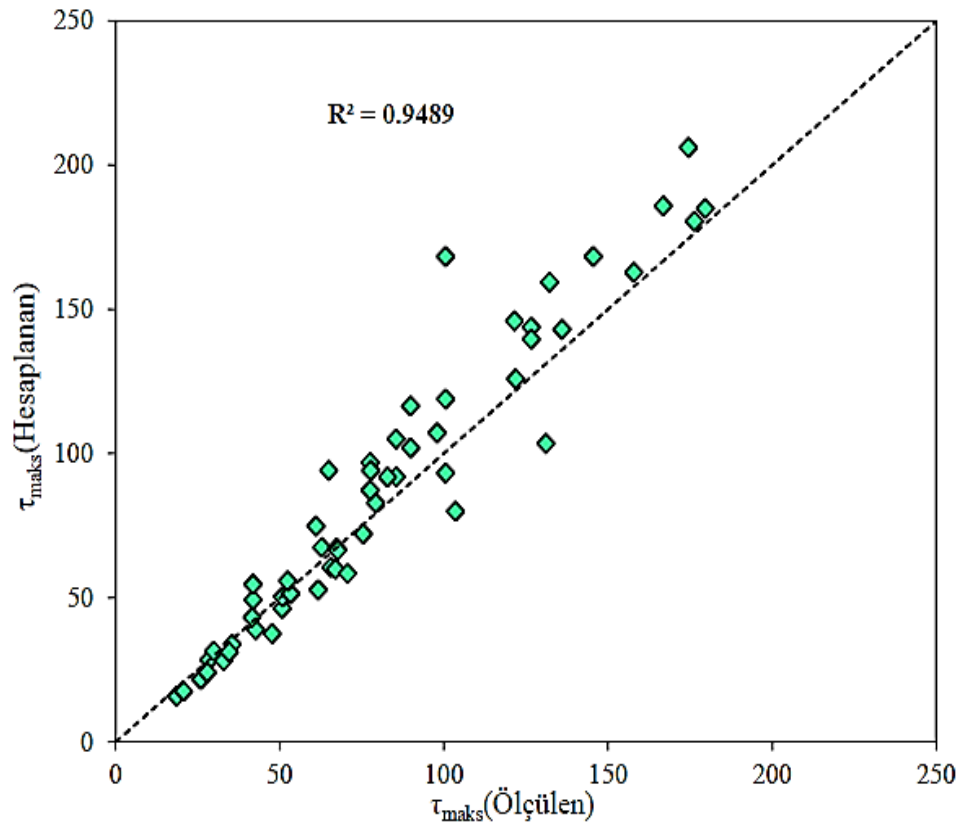
şeklinde belirlenmiştir. Şekilden de görüleceği üzere yüksek elastisite modülüne sahip elemanlar daha düşük çekme gerilmelerine sahiptirler. θ hücrel yapı elemanının rijitliğine bağlı olan katsayı referans malzemesi Malzeme1 elemanı için 1.000 diğer malzeme Malzeme 2 için ise 1.592 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.9. Hücrel yapı elemanı rijitliğinin çekme gerilmesine etkisi

Ölçülen ve hesaplanan maksimum çekme gerilmesinin belirlenmesi ve karşılaştırılması

Maksimum çekme gerilmesinin belirlenmesi amacıyla Eşitlik 6.5' te verilen hücresel yapı elemanlarının genişliğine (α), yüksekliğine (β) ve rijitliğine (θ) bağlı olan katsayılar Çizelge 6.2 ve 6.3' te verilmiştir. Belirlenen katsayılar Eşitlik 6.5' te yerine konularak maksimum çekme gerilmeleri tüm deney elemanları için analitik olarak hesaplanmıştır. EK-4' te bir deney numunesine ait maksimum çekme gerilmesinin analitik olarak hesaplanması sunulmuştur. Gerinim pulları yardımı ile belirlenen birim uzamalar kullanılarak ölçülen maksimum çekme gerilmeleri (Şekil 6.3), hesaplanan maksimum çekme gerilmeleri ile karşılaştırılmıştır. Hesaplanan maksimum çekme gerilmeleri ile deneysel olarak ölçülen maksimum çekme gerilmesi değerleri tüm deney elemanları için Şekil 6.10 ve Çizelge 6.3' te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Önerilen eşitlik ile hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen maksimum çekme gerilmeleri arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir (Şekil 6.10 ve Çizelge 6.3).



Şekil 6.10. Hesaplanan ve ölçülen maksimum çekme gerilmeleri arasındaki ilişki

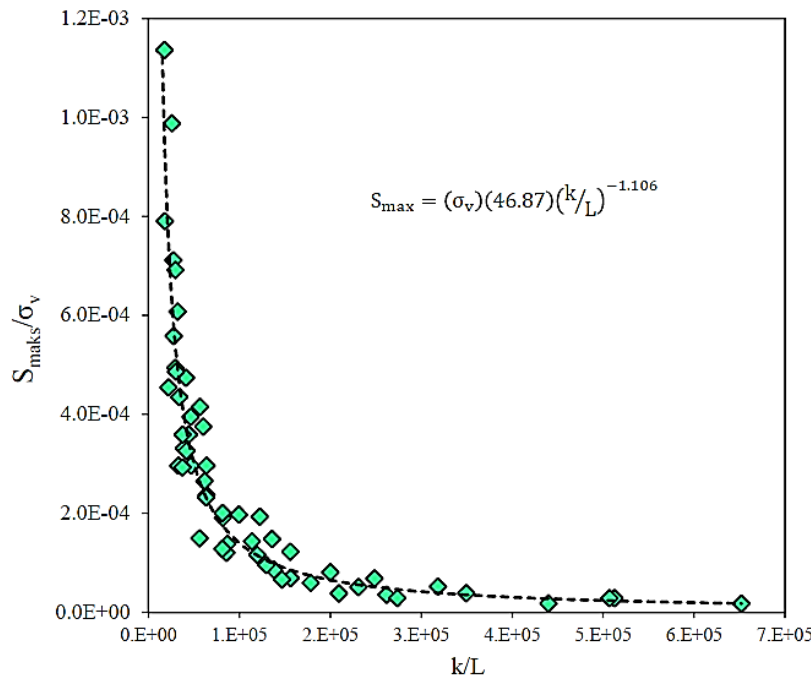
Çizelge 6.3. Ölçülen ve hesaplanan maksimum çekme gerilmelerinin (τ_{maks}) karşılaştırılması

Test No	Yükseklik, h, (mm)	Genişlik, B, (mm)	Uzunluk, L, (mm)	Düşey Gerilme, σ_v (kPa)	B/b	L/b	α	β	θ	Ölçülen τ_{maks} (kN/m ²)	Hesaplanan τ_{maks} (kN/m ²)
1	100	130	170	10.12	1	1.307	1.000	1.000	1.000	18.58	15.89
2	100	130	170	18.10	1	1.307	1.000	1.000	1.000	28.46	28.42
3	100	130	170	31.40	1	1.307	1.000	1.000	1.000	41.87	49.30
4	100	130	340	10.12	1	2.615	1.000	1.000	1.000	35.51	33.85
5	100	130	340	18.10	1	2.615	1.000	1.000	1.000	65.55	60.54
6	100	130	340	31.40	1	2.615	1.000	1.000	1.000	85.42	105.02
7	100	130	510	10.12	1	3.923	1.000	1.000	1.000	61.71	52.68
8	100	130	850	10.12	1	6.538	1.000	1.000	1.000	85.42	91.98
9	100	260	170	10.12	2	1.307	1.369	1.000	1.000	25.96	21.75
10	100	260	170	18.10	2	1.307	1.369	1.000	1.000	42.70	38.91
11	100	260	170	31.40	2	1.307	1.369	1.000	1.000	62.81	67.49
12	100	260	340	10.12	2	2.615	1.369	1.000	1.000	50.72	46.34
13	100	260	340	18.10	2	2.615	1.369	1.000	1.000	79.19	82.88
14	100	260	340	31.40	2	2.615	1.369	1.000	1.000	126.66	143.77
15	100	260	510	10.12	2	3.923	1.369	1.000	1.000	75.41	72.12
16	100	260	850	10.12	2	6.538	1.369	1.000	1.000	121.92	125.92
17	100	390	170	10.12	3	1.307	1.770	1.000	1.000	32.90	28.12
18	100	390	170	18.10	3	1.307	1.770	1.000	1.000	50.87	50.30
19	100	390	170	31.40	3	1.307	1.770	1.000	1.000	77.54	87.26
20	100	390	340	10.12	3	2.615	1.770	1.000	1.000	66.94	59.91
21	100	390	340	18.10	3	2.615	1.770	1.000	1.000	97.92	107.15
22	100	390	340	31.40	3	2.615	1.770	1.000	1.000	166.85	185.89
23	100	390	510	10.12	3	3.923	1.770	1.000	1.000	100.54	93.24
24	100	390	850	10.12	3	6.538	1.770	1.000	1.000	157.90	162.80
25	150	130	170	10.12	1	1.307	1.000	1.109	1.000	20.66	17.62
26	150	130	170	18.10	1	1.307	1.000	1.109	1.000	29.93	31.52
27	150	130	170	31.40	1	1.307	1.000	1.109	1.000	41.87	54.67
28	150	130	340	10.12	1	2.615	1.000	1.109	1.000	47.61	37.54
29	150	130	340	18.10	1	2.615	1.000	1.109	1.000	67.33	67.14
30	150	130	340	31.40	1	2.615	1.000	1.109	1.000	89.83	116.47
31	150	130	510	10.12	1	3.923	1.000	1.109	1.000	70.65	58.42
32	150	130	850	10.12	1	6.538	1.000	1.109	1.000	89.83	102.00
33	150	260	170	10.12	2	1.307	1.369	1.109	1.000	27.87	24.12
34	150	260	170	18.10	2	1.307	1.369	1.109	1.000	41.58	43.15
35	150	260	170	31.40	2	1.307	1.369	1.109	1.000	60.98	74.85
36	150	260	340	10.12	2	2.615	1.369	1.109	1.000	53.27	51.39
37	150	260	340	18.10	2	2.615	1.369	1.109	1.000	82.80	91.91
38	150	260	340	31.40	2	2.615	1.369	1.109	1.000	132.23	159.45
39	150	260	510	10.12	2	3.923	1.369	1.109	1.000	103.54	79.98
40	150	260	510	18.10	2	3.923	1.369	1.109	1.000	135.95	143.05
41	150	260	850	10.12	2	6.538	1.369	1.109	1.000	126.66	139.64
42	150	390	170	10.12	3	1.307	1.770	1.109	1.000	34.62	31.19
43	150	390	170	18.10	3	1.307	1.770	1.109	1.000	52.41	55.78
44	150	390	170	31.40	3	1.307	1.770	1.109	1.000	77.54	96.77
45	150	390	340	10.12	3	2.615	1.770	1.109	1.000	67.63	66.44
46	150	390	340	18.10	3	2.615	1.770	1.109	1.000	100.54	118.83
47	150	390	340	31.40	3	2.615	1.770	1.109	1.000	174.54	206.15
48	150	390	510	10.12	3	3.923	1.770	1.109	1.000	131.10	103.41
49	150	390	510	18.10	3	3.923	1.770	1.109	1.000	179.66	184.95
50	150	390	850	10.12	3	6.538	1.770	1.109	1.000	176.30	180.55
51*	100	130	340	10.12	1	2.615	1.000	1.109	1.592	64.94	94.12
52*	100	130	340	18.10	1	2.615	1.000	1.109	1.592	100.57	168.33
53*	100	260	340	10.12	2	2.615	1.369	1.109	1.592	77.74	94.12
54*	100	260	340	18.10	2	2.615	1.369	1.109	1.592	145.54	168.33
55*	100	260	510	10.12	2	3.923	1.369	1.109	1.592	121.48	145.94

*Malzeme 2

6.3.2. Maksimum çekme gerilmesindeki deplasman (S_{maks}) ve nihai deplasman (S_{ult}) değerlerinin belirlenmesi

Maksimum çekme gerilmesindeki deplasman değerleri (S_{maks} ve S_{ult}) Şekil 6.5 'te verilen çekme gerilmesi-deplasmanı grafiğinde olduğu gibi tüm hücrel yapı elemanı deney numuneleri için belirlenmiştir (EK-2). Belirlenen maksimum deplasmanlar (S_{maks}), düşey gerilmeye (σ_v), hücrel yapı elemanının boyuna (L) ve çekme gerilmesi-deplasman grafiğinin başlangıç rijitliğine (k) bağlı olarak belirlenmiştir. Toplam 55 adet hücrel yapı elemanına ait maksimum çekme gerilmesindeki deplasman değeri (S_{maks}), Excell ortamında elde edilen Şekil 6.11 yardımı ile belirlenmiştir. EK-4' te bir deney numunesine ait maksimum çekme gerilmesindeki deplasman değerinin analitik olarak hesaplanması sunulmuştur. Maksimum çekme gerilmesindeki deplasman değerinin düşey gerilmeye oranı (S_{maks}/σ_v) ile başlangıç rijitliğinin eleman boyuna oranı (k/L) arasında belirgin bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 6.11). Maksimum çekme gerilmesindeki deplasman değeri Şekil 6.11 yardımı ile Excell ortamında belirlenen Eşitlik 6.11 yardımı ile hesaplanmıştır. Buna göre düşey gerilmenin, başlangıç rijitliğinin ve eleman boyunun maksimum çekme gerilmesindeki deplasmana etkisi açıkça görülmektedir.

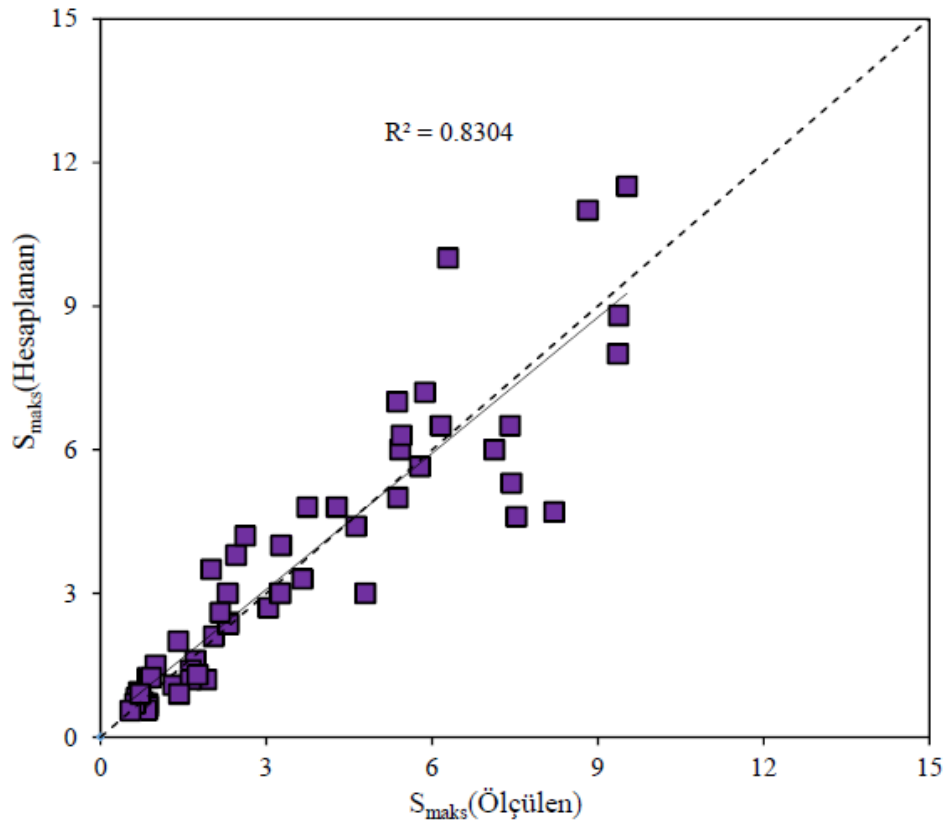


Şekil 6.11. Maksimum çekme gerilmesindeki deplasman ile düşey gerilme, başlangıç rijitliği ve eleman boyu arasındaki ilişki

Maksimum çekme gerilmesindeki deplasman, elamanın boyuna, başlangıç rijitliğine ve düşey gerilmeye bağlı olarak Şekil 6.11 'de verilen denklem yardımı ile aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$S_{maks} = (\sigma_v)46.87 \left(\frac{k}{L} \right)^{-1.106} \quad (6.11)$$

Toplam 55 adet hücreli yapı elemanı deney numuneleri için maksimum çekme gerilmesindeki deplasman değerleri (S_{maks}) Eşitlik 6.11 yardımı ile belirlenmiş ve deneysel olarak ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır (Şekil 6.12 ve Çizelge 6.4). Maksimum çekme gerilmesi değerleri için hesaplanan ve ölçülen deplasmanlar arasında iyi bir ilişki olduğu görülmektedir.



Şekil 6.12. Maksimum çekme gerilmesi değerleri için hesaplanan ve ölçülen deplasmanlar arasındaki ilişki

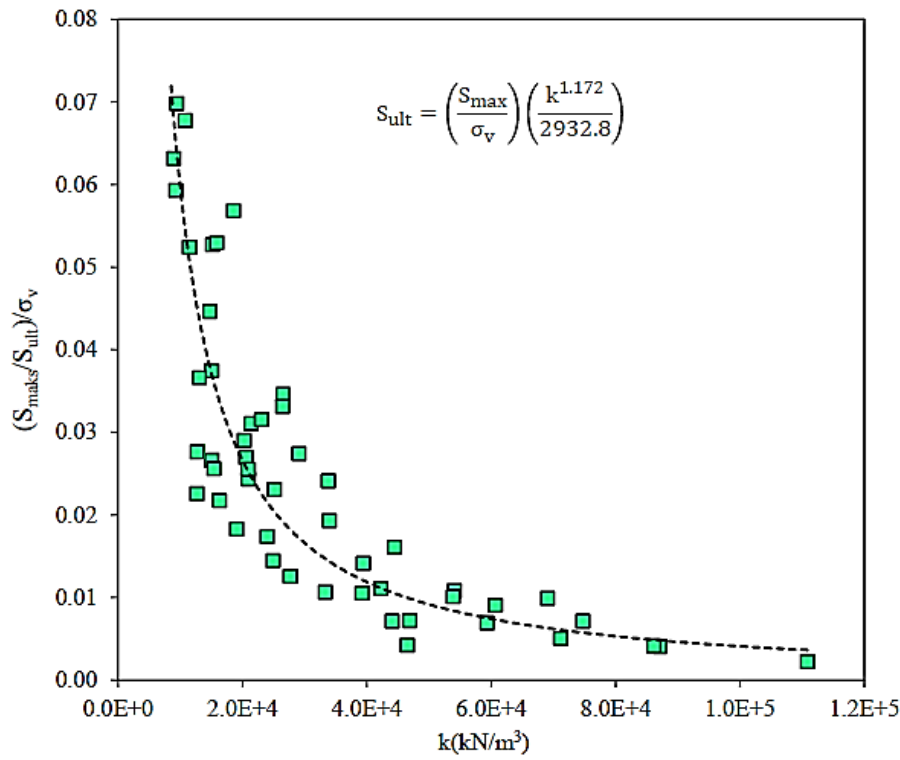
Çizelge 6.4. Ölçülen ve hesaplanan maksimum deplasmanların (S_{maks}) karşılaştırılması

Test No	Yükseklik, h, (mm)	Genişlik, B, (mm)	Uzunluk, L, (mm)	Düşey Gerilme, σ_v (kPa)	k (kN/m ³)	k/L	Ölçülen S_{maks} (mm)	Hesaplanan S_{maks} (mm)
1	100	130	170	10.12	26545	1.307	0.70	0.85
2	100	130	170	18.10	44474	1.307	0.64	0.86
3	100	130	170	31.40	74770	1.307	0.56	0.84
4	100	130	340	10.12	29107	2.615	1.22	1.66
5	100	130	340	18.10	60692	2.615	1.08	1.31
6	100	130	340	31.40	85416	2.615	1.20	1.91
7	100	130	510	10.12	20571	3.923	3.00	4.79
8	100	130	850	10.12	18569	6.538	4.60	7.52
9	100	260	170	10.12	10818	1.307	2.40	2.30
10	100	260	170	18.10	20331	1.307	2.10	2.05
11	100	260	170	31.40	39254	1.307	1.60	1.72
12	100	260	340	10.12	11528	2.615	8.80	9.96
13	100	260	340	18.10	23998	2.615	6.00	7.12
14	100	260	340	31.40	63329	2.615	2.70	3.04
15	100	260	510	10.12	15081	3.923	5.00	5.38
16	100	260	850	10.12	15239	6.538	8.00	9.36
17	100	390	170	10.12	26532	1.307	1.24	0.85
18	100	390	170	18.10	54121	1.307	0.94	0.69
19	100	390	170	31.40	87129	1.307	0.89	0.71
20	100	390	340	10.12	9298	2.615	7.20	5.87
21	100	390	340	18.10	15064	2.615	6.50	6.16
22	100	390	340	31.40	33370	2.615	6.00	5.42
23	100	390	510	10.12	20946	3.923	4.80	3.74
24	100	390	850	10.12	39476	6.538	4.00	3.26
25	150	130	170	10.12	14757	1.307	1.40	1.63
26	150	130	170	18.10	24942	1.307	1.20	1.63
27	150	130	170	31.40	46524	1.307	0.90	1.42
28	150	130	340	10.12	15871	2.615	5.80	6.74
29	150	130	340	18.10	15658	2.615	5.30	7.43
30	150	130	340	31.40	19113	2.615	4.70	8.21
31	150	130	510	10.12	21408	3.923	3.30	3.65
32	150	130	850	10.12	69100	6.538	1.30	1.76
33	150	260	170	10.12	33990	1.307	0.82	0.65
34	150	260	170	18.10	59396	1.307	0.70	0.62
35	150	260	170	31.40	110866	1.307	0.55	0.54
36	150	260	340	10.12	9428	2.615	5.65	9.67
37	150	260	340	18.10	12738	2.615	6.50	7.41
38	150	260	340	31.40	44076	2.615	3.00	3.25
39	150	260	510	10.12	9003	3.923	11.50	9.52
40	150	260	510	18.10	15448	3.923	8.80	9.38
41	150	260	850	10.12	53897	6.538	2.35	2.31
42	150	390	170	10.12	23079	1.307	1.50	0.99
43	150	390	170	18.10	42266	1.307	1.24	0.91
44	150	390	170	31.40	86161	1.307	0.90	0.72
45	150	390	340	10.12	33816	2.615	2.00	6.07
46	150	390	340	18.10	14363	2.615	4.80	6.49
47	150	390	340	31.40	27705	2.615	6.30	5.44
48	150	390	510	10.12	13110	3.923	10.00	6.28
49	150	390	510	18.10	16333	3.923	11.00	8.82
50	150	390	850	10.12	25186	6.538	7.00	5.37
51*	100	130	340	10.12	21647	2.615	3.00	2.30
52*	100	130	340	18.10	38679	2.615	2.60	2.17
53*	100	260	340	10.12	20458	2.615	3.80	2.45
54*	100	260	340	18.10	41583	2.615	3.50	2.00
55*	100	260	510	10.12	28925	3.923	4.20	2.62

*Malzeme 2

Ayrıca maksimum çekme gerilmesindeki deplasmana benzer olarak nihai deplasman (S_{ult}) ile düşey gerilme (σ_v), maksimum deplasman (S_{maks}) ve başlangıç rijitliği (k) arasındaki ilişki Şekil 6.13 'te verilmiştir. EK-4' te bir deney numunesine ait maksimum çekme gerilmesindeki nihai deplasman değerinin analitik olarak hesaplanması sunulmuştur. Nihai deplasman; maksimum deplasmana, başlangıç rijitliğine ve düşey gerilmeye bağlı olarak Şekil 6.13 'te verilen denklem yardımı ile aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$S_{ult} = \frac{S_{maks}}{\sigma_v} \frac{k^{1.172}}{2932.8} \quad (6.12)$$



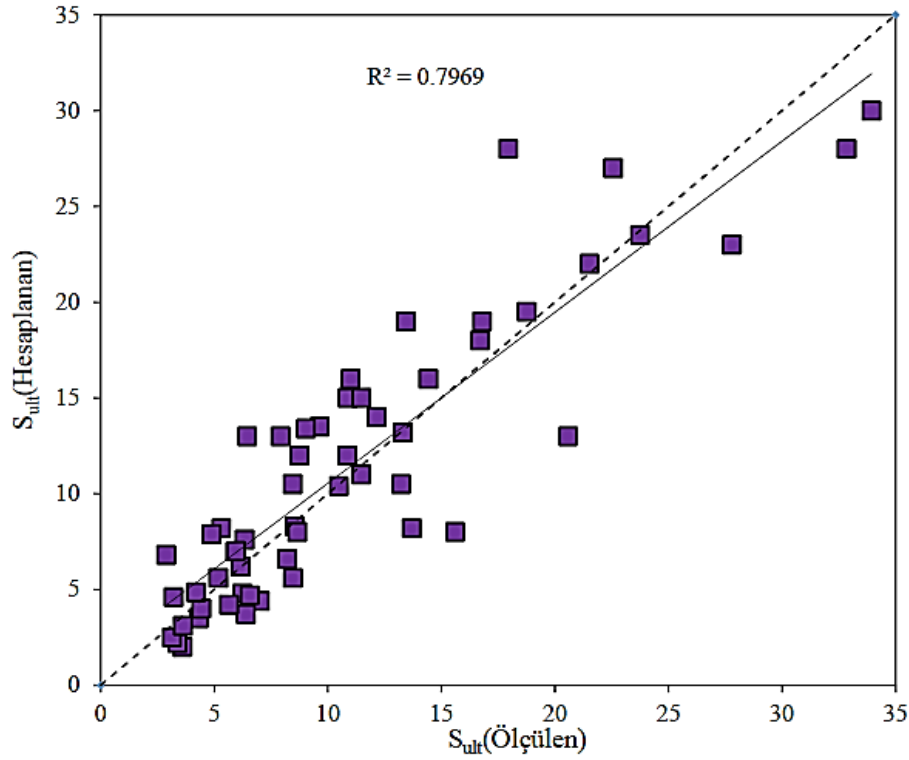
Şekil 6.13. $(S_{maks}/S_{ult})/\sigma_v$ ile başlangıç rijitliği (k) arasındaki ilişki

Toplam 55 adet hücresel yapı elemanı deney numuneleri için maksimum çekme gerilmesindeki nihai deplasman değerleri Eşitlik 6.12 yardımı ile belirlenmiş ve deneysel olarak ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır (Çizelge 6.5 ve Şekil 6.14). Hesaplanan nihai deplasman değerleri ile deneysel olarak elde edilen deplasman değerleri arasında oldukça iyi bir korelasyon olduğu görülmüştür. Fakat az da olsa bazı deney numunelerinde bu uyum görülmemektedir.

Çizelge 6.5. Ölçülen ve hesaplanan nihai deplasmanların (S_{ult}) karşılaştırılması

Test No	Yükseklik, h, (mm)	Genişlik, B, (mm)	Uzunluk, L, (mm)	Düşey Gerilme, σ_v (kPa)	k (kN/m ³)	S_{maks} (mm)	Ölçülen S_{ult} (mm)	Hesaplanan S_{ult} (mm)
1	100	130	170	10.12	26545	0.70	2.00	3.61
2	100	130	170	18.10	44474	0.64	2.20	3.38
3	100	130	170	31.40	74770	0.56	2.50	3.13
4	100	130	340	10.12	29107	1.22	4.40	7.01
5	100	130	340	18.10	60692	1.08	6.60	8.21
6	100	130	340	31.40	85416	1.20	7.60	6.34
7	100	130	510	10.12	20571	3.00	11.00	11.48
8	100	130	850	10.12	18569	4.60	8.00	15.61
9	100	260	170	10.12	10818	2.40	3.50	4.32
10	100	260	170	18.10	20331	2.10	4.00	4.43
11	100	260	170	31.40	39254	1.60	4.85	4.21
12	100	260	340	10.12	11528	8.80	8.30	8.54
13	100	260	340	18.10	23998	6.00	10.50	8.46
14	100	260	340	31.40	63329	2.70	12.00	9.21
15	100	260	510	10.12	15081	5.00	13.20	13.29
16	100	260	850	10.12	15239	8.00	22.00	21.53
17	100	390	170	10.12	26532	1.24	3.70	6.39
18	100	390	170	18.10	54121	0.94	4.80	6.25
19	100	390	170	31.40	87129	0.89	7.00	5.96
20	100	390	340	10.12	9298	7.20	12.00	10.86
21	100	390	340	18.10	15064	6.50	13.50	9.65
22	100	390	340	31.40	33370	6.00	15.00	10.87
23	100	390	510	10.12	20946	4.80	19.50	18.75
24	100	390	850	10.12	39476	4.00	28.00	32.85
25	150	130	170	10.12	14757	1.40	3.10	3.63
26	150	130	170	18.10	24942	1.20	4.60	3.22
27	150	130	170	31.40	46524	0.90	6.80	2.89
28	150	130	340	10.12	15871	5.80	5.60	8.47
29	150	130	340	18.10	15658	5.30	13.00	6.68
30	150	130	340	31.40	19113	4.70	8.20	5.32
31	150	130	510	10.12	21408	3.30	10.50	13.23
32	150	130	850	10.12	69100	1.30	13.00	20.58
33	150	260	170	10.12	33990	0.82	4.20	5.65
34	150	260	170	18.10	59396	0.70	5.60	5.19
35	150	260	170	31.40	110866	0.55	7.90	4.88
36	150	260	340	10.12	9428	5.65	8.00	8.66
37	150	260	340	18.10	12738	6.50	13.00	7.93
38	150	260	340	31.40	44076	3.00	13.40	9.03
39	150	260	510	10.12	9003	11.50	18.00	16.70
40	150	260	510	18.10	15448	8.80	19.00	13.46
41	150	260	850	10.12	53897	2.35	23.00	27.80
42	150	390	170	10.12	23079	1.50	4.70	6.57
43	150	390	170	18.10	42266	1.24	6.20	6.17
44	150	390	170	31.40	86161	0.90	7.00	5.95
45	150	390	340	10.12	33816	2.00	8.20	13.70
46	150	390	340	18.10	14363	4.80	10.40	9.83
47	150	390	340	31.40	27705	6.30	16.00	11.01
48	150	390	510	10.12	13110	10.00	27.00	22.56
49	150	390	510	18.10	16333	11.00	28.00	17.95
50	150	390	850	10.12	25186	7.00	30.00	33.95
51*	100	130	340	10.12	21647	3.00	14.00	12.16
52*	100	130	340	18.10	38679	2.60	15.00	11.48
53*	100	260	340	10.12	20458	3.80	16.00	14.43
54*	100	260	340	18.10	41583	3.50	19.00	16.80
55*	100	260	510	10.12	28925	4.20	23.50	23.75

*Malzeme 2



Şekil 6.14. Hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen nihai deplasmanlar arasındaki ilişki

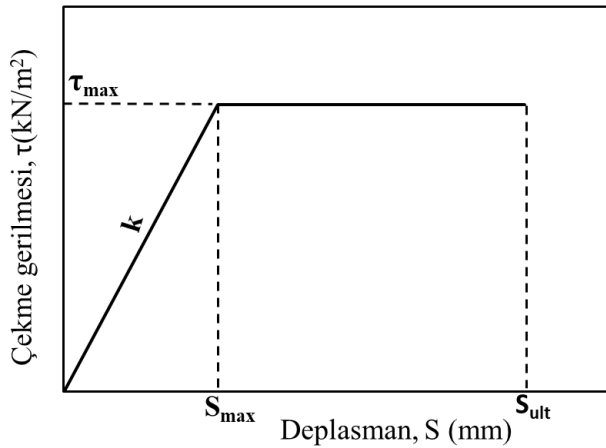
6.4. Sonuçlar ve Bulgular

Farklı boyutlarda hazırlanan, yüksek esnekliğe sahip, hücresel yapı elemanları kullanılarak laboratuvarında bir seri çekme deneyi yapılmıştır. Hücresel yapı elemanları ile zemin arasındaki ara yüzey davranışının genelleştirilebilecek şekilde ifade edebilmek amacıyla çekme gerilmesi- deplasmanı ilişkileri belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Hücresel yapı elemanları boyunca oluşan gerilme dağılımları eleman boyutlarına ve düşey gerilmeye bağlı olarak değişmektedir. Hücresel yapı elemanlarının boyları ve zemin ortamına uygulanan düşey gerilme değerleri arttıkça hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan maksimum birim uzama değerleri %0.6'dan %7'ye kadar artış göstermiştir.
- Deney sonuçlarına göre gerinim pulları yardımı ile belirlenen çekme gerilmeleri maksimum değerlerine deney kutusu önyüzüne yakın bölgelerde ulaşmıştır. Ayrıca maksimum çekme gerilmeleri daha çok sürtünme ve pasif direnç oluşturması nedeniyle hücresel yapı deney elemanı boylarının artması ile artmıştır.
- Deneysel olarak elde edilen çekme gerilmesi- deplasmanı grafiklerinden elde edilen maksimum çekme gerilmeleri, bu çekme gerilmesi düzeyindeki deplasmanlar ve nihai

deplasmanlar hücresel yapı deney elemanı boyutları ile zemin ortamına uygulanan düşey gerilme değerlerinden önemli oranda etkilenmiştir. Deneysel sonuçlar kullanılarak maksimum çekme gerilmesi ve deplasman değerlerinin hesaplanabilmesi için analitik olarak bağıntılar geliştirilmiştir. Geliştirilen bağıntılar kullanılarak hesaplanan değerler ve deneysel olarak ölçülen değerler karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen maksimum çekme gerilmesi ve deplasman değerlerinin birbirleri ile çok yüksek oranlarda korelasyonlar ile uyumlu oldukları görülmüştür.

- Yapılan çalışmalar sonucunda zemin ortamına gömülü hücresel yapı elemanlarının çekme yükleri altındaki çekme gerilmesi-deplasmanı davranışı genelleştirilmiş ve tasarımcılar tarafından kullanılabilecek genel bir çekme gerilmesi-deplasman modeli önerilmiştir. Önerilen model ve bu modeli oluşturan önemli değerler Şekil 6.15'te topluca sunulmuştur. Bu modelinin tasarım aşamasında ve sonlu eleman modellemelerinde kullanılabileceği ve literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



$$\tau_{maks} = \sigma_v 1.1717 \left(\frac{L}{b}\right)^{-1.091} \alpha \beta \theta$$

$$k = \frac{\tau_{maks}}{S_{maks}}$$

$$S_{maks} = (\sigma_v) 46.87 \left(\frac{k}{L}\right)^{-1.11}$$

$$S_{ult} = \frac{S_{maks}}{\sigma_v} \frac{k^{1.22}}{2932.8}$$

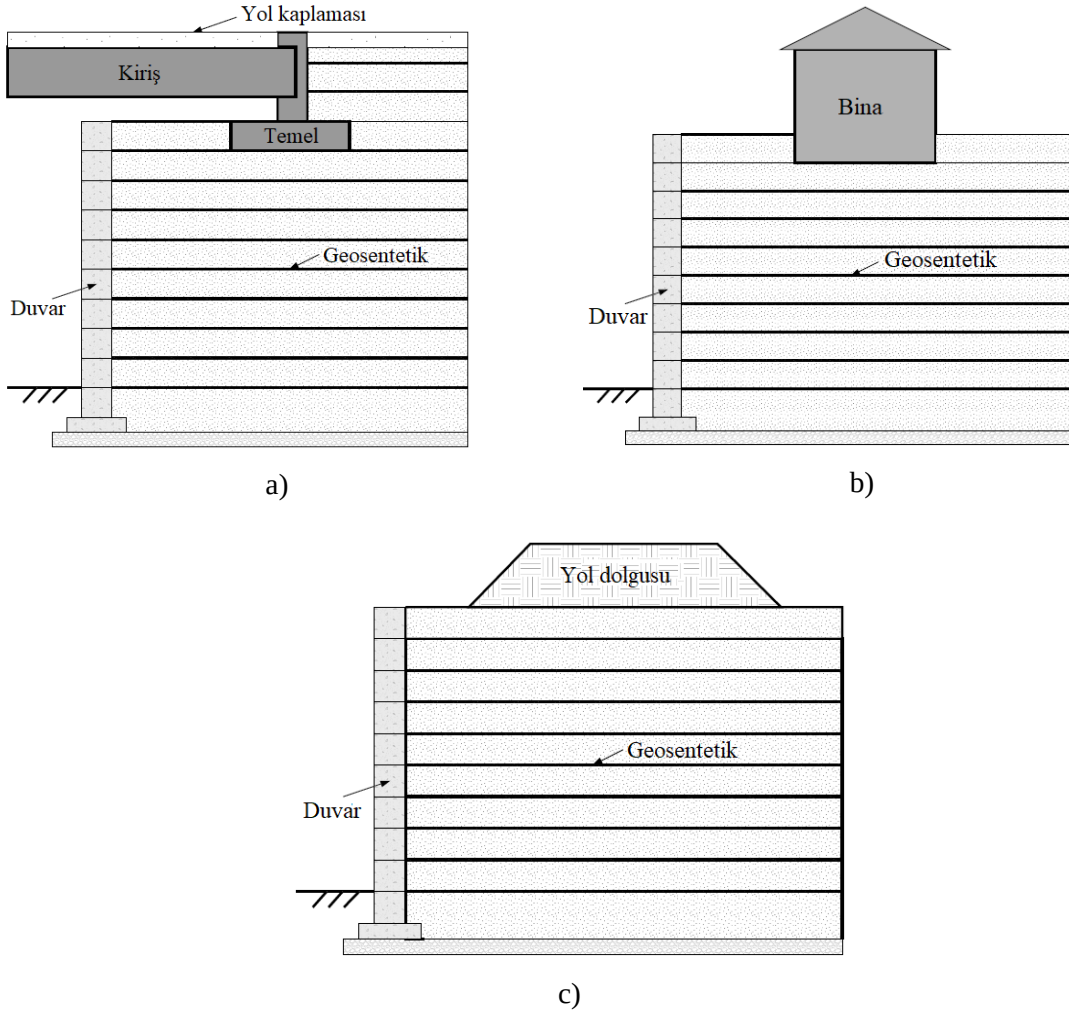
Şekil 6.15. Hücresel yapı elemanları ile zemin ortamı ara yüzeyi için önerilen çekme gerilmesi-deplasmanı modeli

7. HÜCRESEL YAPI ELEMANI KULLANILARAK TASARLANAN MODEL İSTİNAT DUVARININ YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI

7.1. Giriş

Geosentetikler, geoteknik mühendisliği uygulamalarında zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli yer tutmaktadır. Taşıma gücü kapasitesinin artırılmasında, şev stabilizasyonunda ve istinat duvarlarının stabiltesinin artırılmasında geosentetikler kullanılmaktadır. Geosentetikler, yapı yüklerinden dolayı meydana gelen çekme kuvvetlerini karşılamak için donatı elemanı olarak zemin ortamında kullanılmaktadır. Geosentetik donatılı zemin olarak adlandırılan bu tür kompozit zemin-geosentetik birlikteliği; düşük maliyetli, estetik, basit ve hızlı yapım tekniklerine sahip olması nedeniyle zemin yapılarında kullanım alanları genişlemektedir. Günümüzde geosentetik donatılı zeminler statik ve dinamik yükler altında birçok çalışmaya konu olmaktadır. Son yıllarda ise geosentetik donatılı zeminler köprü ayağı ve bina temeli ve yol dolgusunu desteklemek amacıyla da kullanılmaktadır.

Geosentetiklerin, köprü temellerinde ve köprü yaklaşım yapılarında kullanımı ile oluşacak olan oturmaların daha düşük veya izin verilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir (Adams, 1997; Abu-Hejleh ve diğ., 2000). Geosentetiklerin köprü ayağı, bina temeli ve yol dolgusu destekleme yapısı gibi istinat yapılarında kullanımı Şekil 7.1 'de şematik olarak verilmiştir. Yapı temellerini desteklemek için oluşturulan geosentetik donatılı istinat duvarları genellikle yüksek temel yüklerine maruz kalmaktadır. Aşırı yüklerden dolayı temel zemininde meydana gelen aşırı oturmalar oluşabilmektedir. Bu bakımdan geosentetikler temele gelen yükleri temel zemini tabanına yayarak zeminde oluşacak olan aşırı oturmaları ve yanal deformasyonları azaltmaktadır. Ayrıca temele gelen yükün büyüklüğü, temelin duvar yüzeyine olan mesafesi ve temel boyutları, taşıma kapasitesini ve duvarda oluşacak olan deformasyonları önemli ölçüde etkilemektedir (El Sawwaf, 2007; Leshchinsky, 2014; Xiao ve diğ., 2016).



Şekil 7.1. Geosentetik donatılı ile güçlendirilmiş istinat duvarlarının kullanım alanları a) köprü ayağı temeli, b) bina dolgu temeli, c) yol dolgusu

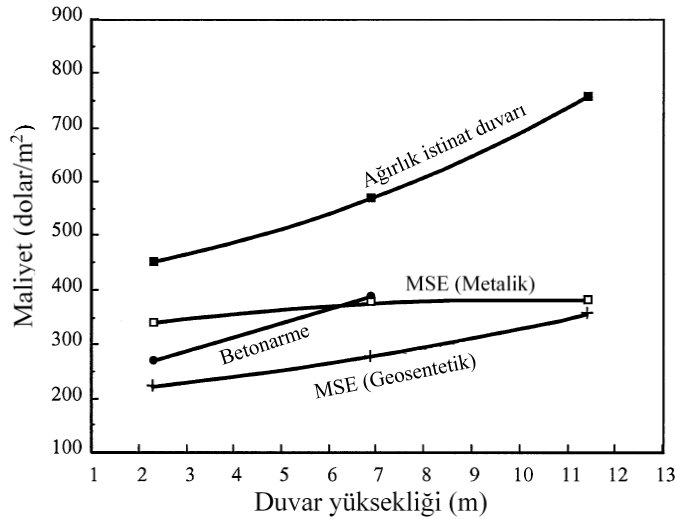
Geleneksel olarak kullanılan istinat duvarları (ağırlık, betonarme vb.), hızlı inşaa gereksinimi olan durumlarda, daha yüksek istinat duvarı gereksinimlerinde ($H > 6$ m), kentsel alanlarda kısıtlı mekânlarda ve düşük maliyetli yapı ihtiyacının olduğu durumlarda gerekli çözümler sunamamaktadır. Bu bakımdan hızlı inşaa edilebilen, düşük maliyetli ve kısıtlı alanlarda dahi çözüm sunabilen yeni tip bir istinat duvarı tasarımı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu tür problemlere çözüm sunabilmek adına ilk kez Lee (1973) tarafından çelik galvaniz şeritleri kullanarak tasarlanan istinat duvarının maliyet açısından oldukça olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. İstinat duvarı yüksekliğine göre kategorize edilen çalışmalarda; ağırlık, betonarme, metalik donatı elemanlı ve geosentetik donatı elemanlı istinat duvarlar türlerinin birim maliyetleri incelenmiştir. Lee (1973), Yako ve Christopher (1988) ve Koerner ve diğ., (1998) tarafından yapılan çalışmalarda istinat duvarlarının birim maliyetleri Çizelge 7.1' de

verilmiştir. Çizelge 7.1’ de duvar yüksekliği; yüksek ($H \geq 9m$), orta ($4.5 < H < 9.0$) ve düşük ($H \leq 4.5 m$) olmak üzere üç grupta kategorize edilmiştir.

Çizelge 7.1. İstinat duvarlarında birim alana göre duvar maliyeti (Dolar cinsinden)

Duvar tipi	Duvar yüksekliği	Lee ve diğ., (1973)	Yako ve Christopher (1988)	Koerner ve diğ. (1998)
Ağırlık tipi	Yüksek	300	570	760
	Orta	190	344	573
	Düşük	190	344	455
Betonarme	Yüksek	245	377	-
	Orta	230	280	390
	Düşük	225	183	272
Metal donatılı geosentetik istinat duvarı	Yüksek	140	300	385
	Orta	100	280	381
	Düşük	70	172	341
Geosentetik donatılı istinat duvarı	Yüksek	-	-	357
	Orta	-	-	279
	Düşük	-	-	223

Geosentetiklerin istinat duvarlarında kullanımı maliyet açısından oldukça önemli çözümler sunduğu Çizelge 7.1’ de açıkça gözükmemektedir. Lee ve diğ., (1973), Yako ve Christopher (1988) ve Koerner ve diğ., (1998) gibi araştırmacılar tarafından (Çizelge 7.1) yapılan maliyet analizleri daha açık ifade ile Şekil 7.2’ de verilmiştir. Bu çalışmalarda ağırlık tipi istinat duvarlarının çok maliyetli oldukları açık bir şekilde gözükmemektedir. Özellikle artan duvar yüksekliği ile ağırlık tipi istinat duvar maliyetinde belirgin bir artış olduğu belirlenmiştir. Bir diğer istinat duvar türü olan betonarme istinat duvarları, ağırlık istinat duvarlarına göre daha az maliyetli olmasına rağmen artan duvar yüksekliği ile birim alana düşen duvar maliyeti de belirgin bir şekilde artmaktadır. Mekanik olarak stabilize edilmiş istinat duvarları (MSE duvar) ise kullanılan donatı elemanlarına göre maliyet açısından farklılık göstermektedir. Metalik şerit kullanılarak yapılan istinat duvarları, artan duvar yüksekliği ile ağırlık ve betonarme tipi istinat duvarlarına göre oldukça belirgin bir artış göstermemektedir. Bir diğer istinat duvarı ise son zamanlarda yaygın olarak kullanılan geosentetik donatılı istinat duvar tipidir. Geosentetik donatılı istinat duvarları ise maliyet açısından metalik şerit kullanılarak yapılan istinat duvarlarına benzer davranış göstermektedir. Ancak geosentetik donatılı istinat duvarlarının birim alana düşen maliyeti açısından metalik donatılı istinat duvarına göre artan duvar yüksekliği ile daha az maliyet artışı gösterdiği açıkça görülmektedir (Şekil 7.2).



Şekil 7.2. Duvar tiplerinin artan duvar yüksekliği ile birim alana düşen maliyeti (Koerner ve diğ., 1998)

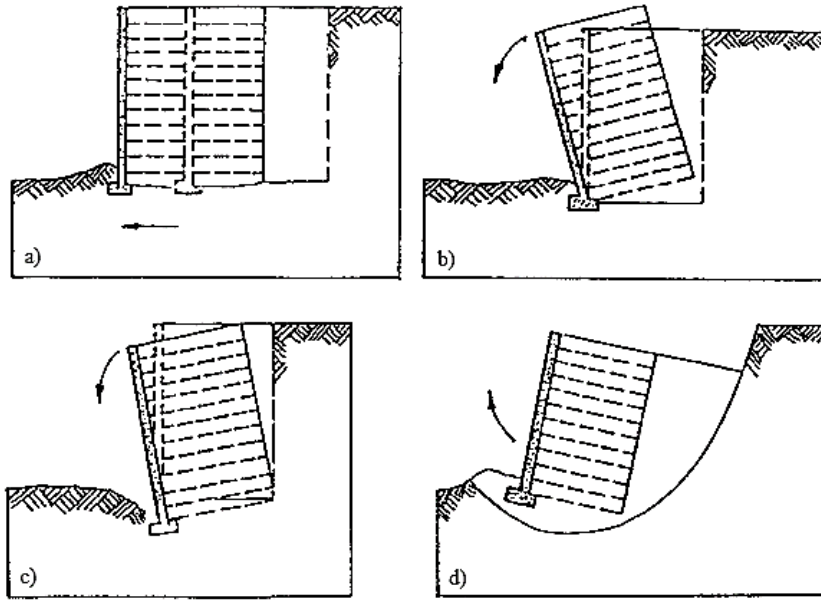
7.2. Geosentetik Donatılı İstinat Duvarı Tasarımı

Geosentetik donatılı istinat duvarı tasarımlarında, genel olarak limit denge yöntemi kullanılmaktadır. Duvar geometrisi ve donatı elemanlarının özellikleri (fiziksel ve mekanik) dikkate alınarak, iç ve dış stabilite tahkiklerine göre duvar tasarımı yapılmaktadır (Elias ve diğ. 2001). Dolayısıyla bu bölümde istinat duvarı tasarımı için yapılan stabilite analizlerine yer verilmiştir.

7.2.1. Dış stabilite tahkiki

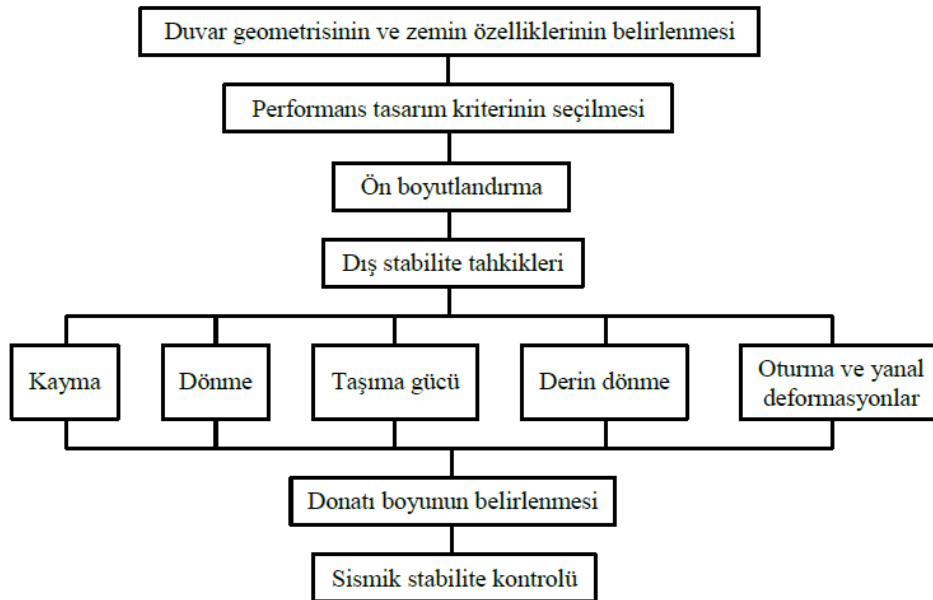
Ağırlık ve yarı ağırlık istinat duvarları gibi geleneksel olarak tasarlanan istinat duvarlarına benzer olarak, geosentetik donatılı istinat duvarlarının da dış stabilite tahkiki dört aşamadan oluşmaktadır. Geosentetik donatılı istinat duvarı duvar ön yüzünü oluşturan blok, panel veya yapılacak bölüm Geosentetik donatılı istinat duvarı tasarımında Şekil 7.3' te ve aşağıda sırasıyla verilen yenilme durumuna göre tahkiki yapılmaktadır.

- İstinat duvarının taban üzerinde kaymaya karşı stabilite tahkiki
- Yanal kuvvetler etkisi ile dönmeye karşı stabilite tahkiki
- İstinat duvarının temel zeminin taşıma gücü açısından yenilmeye karşı stabilite tahkiki
- İstinat duvarı ve dolgu zeminin oturduğu zeminin geniş bir kayma yüzeyi içerisinde kalıp dönmeye karşı stabilite tahkiki



Şekil 7.3. Geosentetik donatılı istinat duvarlarında dış stabilite tahkikleri açısından potansiyel yenilme durumları a) kayma, b) dönme, c) taşıma gücü, d) derin dönme (Elias ve diğ., 2001)

Geosentetik donatılı istinat duvarlarında dış stabilite tahkiki Şekil 7.4' te verilen akış şemasında işlem sırasına göre yapılmaktadır (Elias ve diğ., 2001).



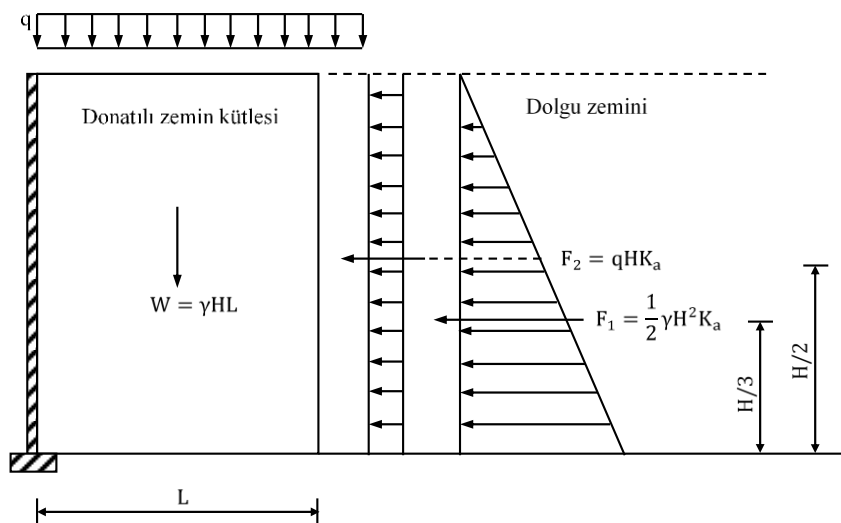
Şekil 7.4. Geosentetik donatılı istinat duvarlarında dış stabilite tahkiklerinin tasarım aşamaları (Elias ve diğ., 2001)

Dış stabilite tahkiki için ilk olarak duvar yüksekliği, eğimi veya tepe genişliği gibi duvar geometrisine ait parametreler ve duvar arkası donatılı zemine ait fiziksel ve mekanik özellikler (birim hacim ağırlık, içsel sürtünme açısı ve kohezyon) belirlenmektedir. Ayrıca

varsa yeraltı su seviyesinin durumu da belirlenmektedir. İstinat duvarının performansının seçilen kriterlere göre belirlenmektedir. Buna göre herhangi bir istinat duvarının performansı; kayma, taşıma gücü ve devrilme açısından güvenlik kriterlerinin (güvenlik katsayıları) seçilmesi, duvar üzerinde oluşacak maksimum yanal deplasmanlar ve temel zeminin de oluşacak maksimum farklı oturmaların belirlenmesi, sismik yüklere karşı güvenlik kriterinin seçilmesi ve tasarım ömrünün ne kadar olacağına karar verilmesi gibi birçok kriterlere bağlı olmaktadır. Yüksekliği belirlenen istinat duvarında donatı elemanının boyu en az duvar yüksekliğinin %70' i kadar ($0.7H$) olmalıdır. Ancak duvar arkası zeminin şevli olması, aşırı trafik yükünün varlığı veya duvara ilave yük oluşturacak durumların olması gibi birçok durumda donatı elemanının boyu artırılarak duvar yüksekliğinin %80 ile %110 ($0.8H-1.1H$) arasında seçilmektedir (Elias ve diğ. 2001).

Dış stabilite tahkiki için duvar arkası donatılı zemin ile duvar ön yüzünün oluşturduğu ve sanki rijit yekpare bir yapı olan kompozit kütle üzerine gelen dış kuvvetlerin belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 7.5). Burada F_1 ve F_2 sırasıyla zemin ve sürşarj yükünden dolayı etki eden aktif toprak basınçları olup zeminin içsel sürtünme açısına (ϕ) bağlı olarak aktif toprak basınç katsayılarının belirlenmesi ile hesaplanabilmektedir. Buna göre aktif toprak basınç katsayısı (K_a) Eşitlik 7.1 yardımı ile belirlenmektedir. Ayrıca Şekil 7.5' te W donatılı zemin kütlelerinin ağırlığı, H istinat duvarı yüksekliği ve L ise donatılı zemin kütlelerinin genişliğidir.

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (7.1)$$



Şekil 7.5. Geosentetik donatılı istinat duvarlarına etki eden dış kuvvetler (Elias ve diğ., 2001)

Geosentetik donatılı istinat duvarına etki eden kuvvetlerin (yanal toprak basıncı ve temel zeminine etki eden düşey gerilme) belirlenmesi ile duvarın kaymaya karşı stabilite tahkiki aşağıda Eşitlik 7.2 yardımı ile yapılmaktadır.

$$GS_{\text{kayma}} = \frac{\sum \text{Yatay tutan kuvvetler}}{\sum \text{Yatay deviren kuvvetler}} = \frac{\sum P_R}{\sum P_d} \geq 1.5 \quad (7.2)$$

$$P_d = F_1 + F_2 \quad (7.3)$$

$$P_R = (W + qL)\mu \quad (7.4)$$

Burada μ donatılı istinat duvarı ile temel zemini arasındaki sürtünme katsayısı olup duvar ile temel zemini arasındaki ara yüzey sürtünme açısının (δ) bilinmesi ile hesaplanmaktadır. Buna göre sürtünme katsayısı (μ),

$$\mu = \tan \delta \quad (7.5)$$

şeklinde belirlenmektedir. Duvar ile temel zeminin arasındaki ara yüzey sürtünme açısı genellikle zeminin içsel sürtünme açısına bağlı olarak $1/3\phi$ - $2/3\phi$ arasında alınmaktadır.

Temel zemininin taşıma gücü açısından yeterli olup olmadığı, klasik zemin mekaniğine göre belirlenen nihai taşıma gücünün (q_{ult}) güvenlik katsayısına (GS) bölünmesi ile elde edilen izin verilebilir taşıma gücünün (q_a) elde edilmesi ile belirlenmektedir. Taşıma gücü tahkiki için güvenlik sayısı genellikle 2' den büyük alınmaktadır. İstinat duvarı temel zeminine gelen toplam düşey gerilmenin (q_0) izin verilebilir taşıma gücünden düşük olması durumunda istinat duvarı taşıma gücü açısından güvenli olmaktadır (Eşitlik 7.6).

$$q_0 \leq q_a = \frac{q_{ult}}{GS} \quad (7.6)$$

İstinat duvarı temel zeminine gelen düşey gerilme (q_0) eksantiristeye bağlı olarak Eşitlik 7.7' de verilmiştir.

$$q_0 = \frac{\sum V}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) \quad (7.7)$$

Burada B donatılı zemin ve duvar ön yüzü elemanının toplam genişliği ve $\sum V$ ise temel zeminine gelen toplam düşey yüküdür. Temel zeminin nihai taşıma gücü (q_{ult}) ise Meyerhoff (1953) tarafından önerilen Eşitlik 7.8 yardımı ile aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$q_{ult} = cN_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + qN_qF_{qs}F_{qd}F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma B'N_\gamma F_{\gamma s}F_{\gamma d}F_{\gamma i} \quad (7.8)$$

Burada q temel seviyesindeki zemin örtü yükü ($= \gamma D$), B' efektif temel genişliği ($= B - 2e$), c temel zeminin kohezyonu, N_c , N_q ve N_γ zeminin içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü faktörleri, F_{cs} , F_{qs} ve $F_{\gamma s}$ temel şekline bağlı şekil faktörleri, F_{cd} , F_{qd} ve $F_{\gamma d}$ temelin derinliğine bağlı derinlik faktörleri ve F_{ci} , F_{qi} ve $F_{\gamma i}$ ise temel zeminine gelen temel yükünün geliş açısına bağlı yük eğim faktörleridir.

7.2.2. İç stabilite tahkiki

Geosentetik donatılı istinat duvarlarında iç stabilite tahkiki açısından iki şekilde yenilme durumu ortaya çıkmaktadır. Birincisi, donatı elemanının çekme dayanımı aşırıp aşırı deformasyona veya kopmaya uğraması, ikincisi ise donatı elemanı üzerinde meydana gelen çekme kuvvetlerinin donatı ile zemin arasında oluşan sürtünme direncinden fazla olması durumudur. Donatı elemanı üzerinde oluşan çekme kuvvetleri, donatı ile zemin arasındaki sürtünme direncini aşması sonucu duvar ön yüzünde aşırı deplasmanlar ve istinat duvarı üzerinde bölgesel yenilmeler veya çökmeler meydana gelmektedir. Bu tür yenilme durumları donatı elemanının çekme yenilmesi olarak adlandırılmaktadır. Dolayısıyla iç stabilite tahkiklerinde maksimum çekme kuvvetinin büyüklüğü, yeri, kritik kayma yüzeyine göre konumu ve donatı elemanının maksimum çekme kuvvetini karşılayabilecek uzunluğa sahip olup olmaması gibi durumlar bu aşamada tasarım açısından çok önem teşkil etmektedir. Bu bakımdan geosentetik donatılı istinat duvarlarının tasarımı iç stabilite tahkiki açısından Şekil 7.6 'da verilen akış şemasına göre yapılmaktadır.

İç stabilite tasarımında ilk olarak duvar arkası dolgu zemininde oluşacak potansiyel kayma yüzeyinin (Şekil 7.7) yerinin belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonra istinat duvarında kullanılacak olan donatı türü (metalik veya geosentetik) duvar ön yüzüne bağlantısı uygun olacak şekilde seçilir. Seçilen donatı elemanlarında ve duvar-donatı kesişim noktalarında statik ve dinamik yükler altında meydana gelen çekme kuvvetleri belirlenir. Belirlenen

yükler altında donatı elemanlarının çekme kapasiteleri hesaplanır. Geosentetik donatılı istinat duvarlarında iç stabilite tahkiki için donatı elemanları üzerinde meydana gelen çekme kuvvetleri aşağıda verilen işlem sırasıyla belirlenmektedir:

- Her bir donatı elemanı seviyesinde istinat duvarı üzerine etki eden yanal gerilme (σ'_a) belirlenir. Yanal gerilme hesaplanmasında aktif toprak basınç katsayısı (k_a) kullanılmakta olup yanal gerilme Coulomb toprak basınç eşitlikleri ile belirlenmektedir. Eşitlik 7.9' da verilen $\Delta\sigma$ sürşarj yükünden dolayı oluşan gerilme artışıdır.

$$\sigma'_a = k_a(\sigma_v + \Delta\sigma) \quad (7.9)$$

- Her donatı elemanı seviyesi için birim duvar yüzeyine gelen yanal yük (T) belirlenir (Eşitlik 7.10).

$$T = \sigma'_a S_v S_H \quad (7.10)$$

Burada S_v duvar arkasına yerleştirilen donatı elemanları arasındaki düşey mesafe ve S_H ise yatay mesafedir.

- Birim duvar yüzeyine gelen yük (T) ile donatı elemanına ait izin verilebilir çekme dayanımı (T_u) karşılaştırılarak, iç stabilite açısından kontrol edilmelidir. Çekme kuvveti (T), izin verilebilir çekme dayanımından (T_u) eşit veya küçük olmalıdır.

Duvarın iç stabilite açısından güvenli bir şekilde tasarlanması için, donatı elemanı ile zemin arasında sürtünme direnci sonucu oluşan çekme kapasitesi birim duvar yüzeyine gelen yanal yükten (T) büyük veya eşit olmalıdır (Eşitlik 7.11).

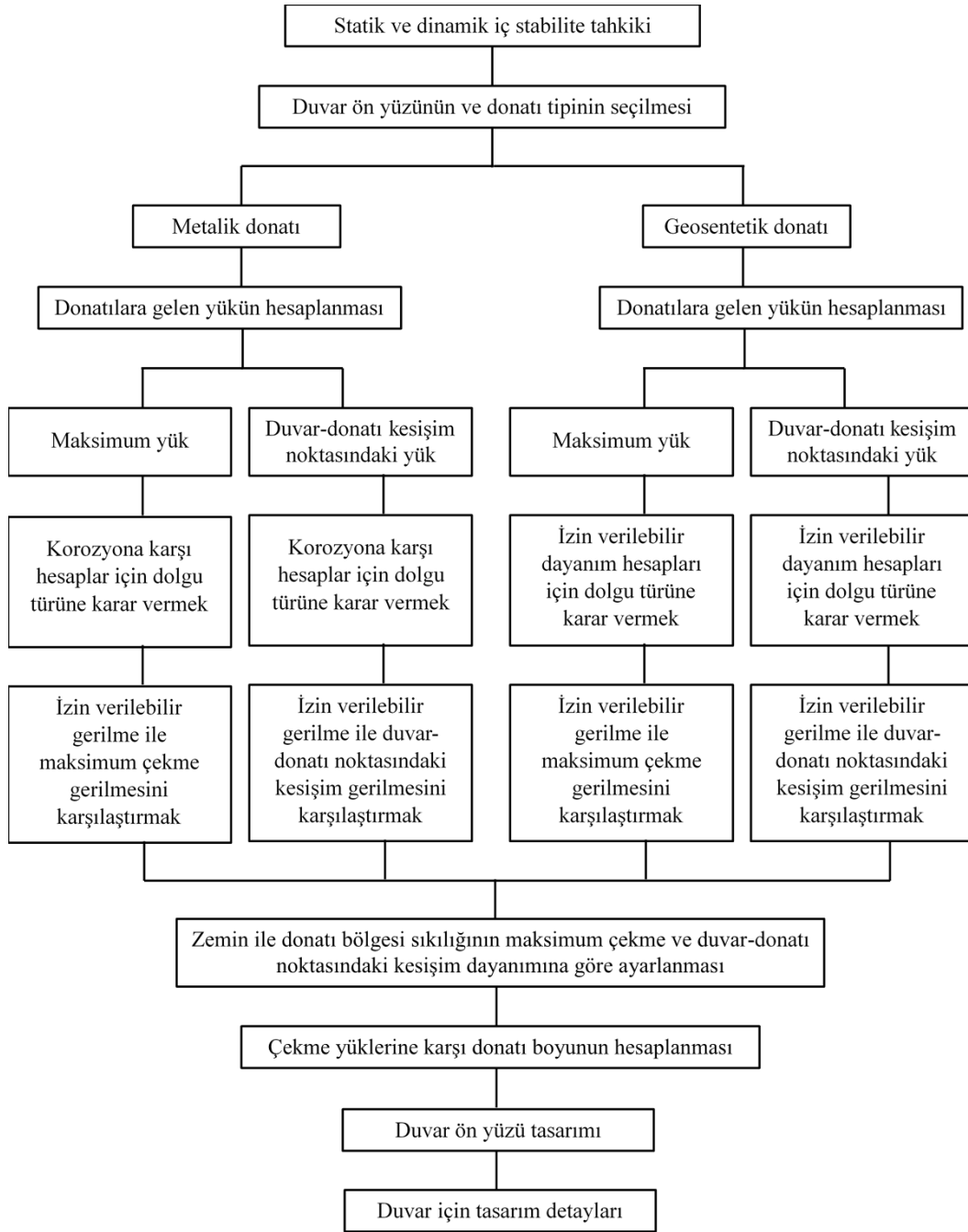
$$GS = \frac{2L_e w \sigma_v \tan \delta}{\sigma'_a S_v S_H} \quad (7.11)$$

Burada GS güvenlik katsayısı, L_e donatı elemanının ankraj bölgesindeki uzunluğu, w donatı elemanının genişliği, σ_v donatı elemanı üzerindeki efektif düşey gerilme ve δ ise donatı elemanı ile zemin arasındaki sürtünme açısıdır. Burada duvar arkasına yerleştirilen donatı elemanının toplam boyu (L):

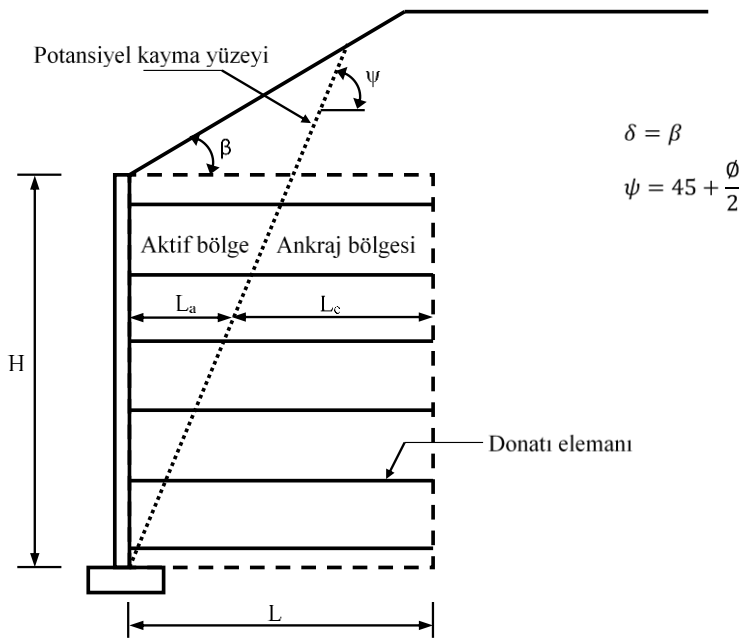
$$L = L_a + L_e \quad (7.12)$$

Burada L_a potansiyel kayma yüzeyinin önünde yer alan ve aktif bölgede kalan donatı elemanın uzunluğu olup geometriden (Şekil 7.7) Eşitlik 7.13' te verildiği gibi belirlenebilir. Burada Z donatı elemanının bulunduğu derinliktir.

$$L_a = (H - Z) \tan(45 - \phi/2) \quad (7.13)$$



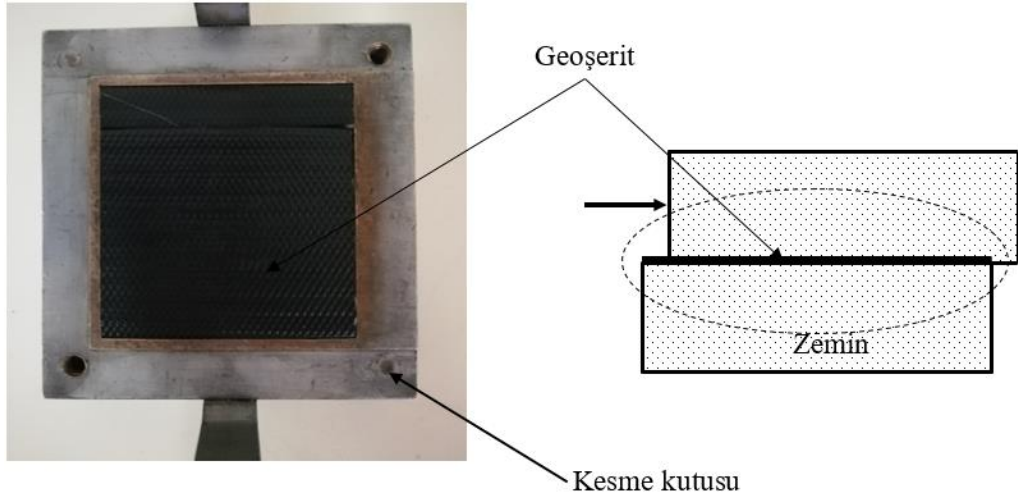
Şekil 7.6. Geosentetik donatılı istinat duvarlarında iç stabilite tahkiklerinin tasarım aşamaları (Elias ve diğ., 2001)



Şekil 7.7. Geosentetik donatılı istinat duvarlarında potansiyel kayma yüzeyinin yeri (Elias ve diğ., 2001)

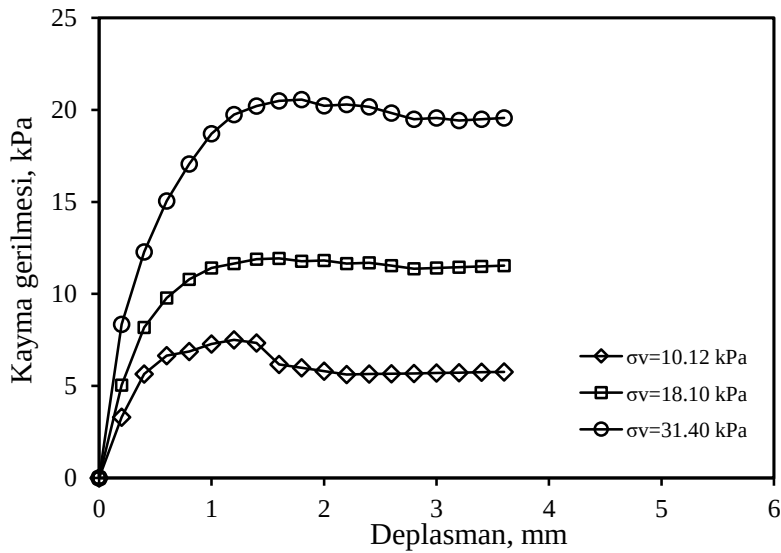
7.3. Model Duvar Deneylerinde Kullanılan Donatı Elemanları Boylarının Belirlenmesi

Model duvar deneylerinde, hücresel yapı elemanı ve geoşerit olmak üzere iki farklı donatı elemanı kullanılmıştır. Donatı elemanlarının boyları, ankraj bölgesindeki donatının karşılayabileceği çekme yüküne göre belirlenmiştir. Hücresel yapı elemanı ile geoşerit donatı elemanlarının ankraj bölgesinde eşit büyüklükte çekme yüklerini karşılayabilmesi için uygun eleman boyları (L_e) hesaplanmıştır. Hücresel yapı elemanı ile geoşerit donatı elemanlarının zeminler içerisindeki çekme davranışlarının belirlenmesi gerekmektedir. Hücresel yapı elemanına ait çekme davranışı ifade eden ve çekme kapasitesini belirleyen yaklaşım bu çalışma kapsamında “Hücresel Yapı Elemanlarının Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı 5. Bölümde detaylı bir şekilde verilmiştir. Geoşerit donatı elemanı ile zemin arasındaki sürtünme davranışının belirlenmesi için zemin-geoşerit ara yüzey sürtünme açısının (δ) bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada zemin-geoşerit ara yüzey sürtünme davranışı, laboratuvarda yapılan kesme kutusu deneyleri ile belirlenmiştir. Geoşerit donatı elemanı kesme kutusun ortasına yerleştirilerek kayma yüzeyinin zemin ile geoşerit donatı elemanı arasında oluşması sağlanmıştır (Şekil 7.8).

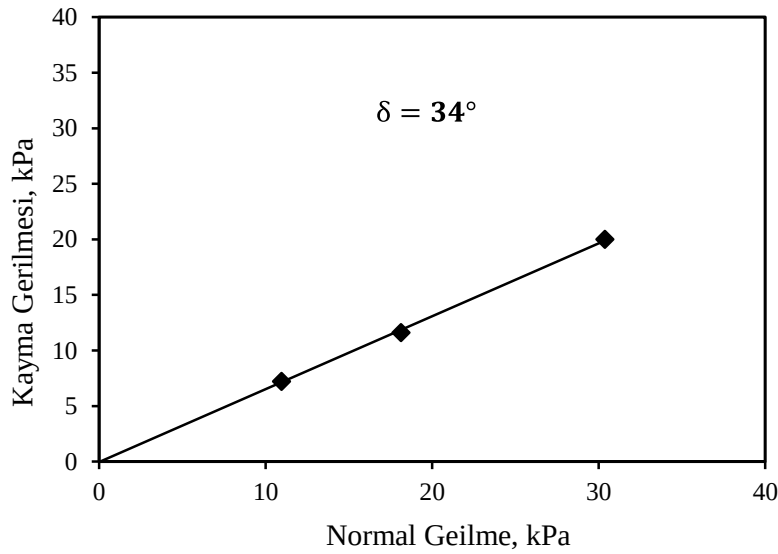


Şekil 7.8. Geoşerit donatı elemanının kesme kutusuna yerleşimi

Geoşerit donatı elemanı kesme kutusunda konumuna yerleştirildikten sonra kesme kutusunun diğer yarısı zemin ile doldurularak kesme kutusu deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Daha sonra zemin-geoşerit ara yüzey sürtünme açısı 10.12 kPa, 18.10 kPa ve 31.40 kPa düşey gerilmeler altında kesme kutusu deneyi ile belirlenmiştir. Kesme kutusuna ait deney sonuçları Şekil 7.9’ da ve zemin-geoşerit ara yüzey kırılma zarfı ve sürtünme açısı ise Şekil 7.10’ da verilmiştir. Buna göre zemin-geoşerit ara yüzey sürtünme açısı (δ) 34° olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.9. Zemin-geoşerit donatı elemanı ara yüzey kesme kutusu deney sonuçları



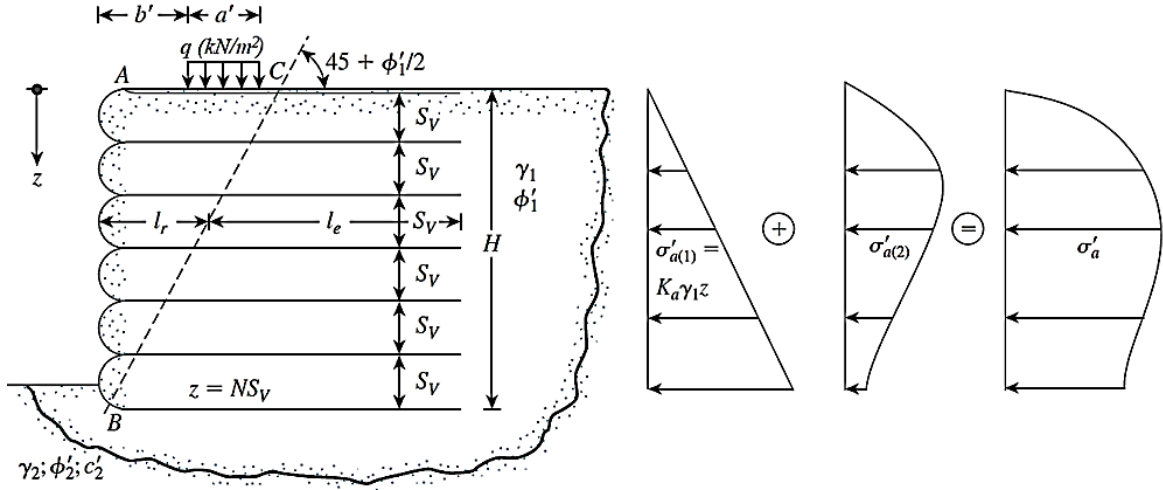
Şekil 7.10. Zemin-geoşerit donatı elemanı ara yüzey kırılma zarfı ve sürtünme açısı

Model duvar deneylerinde donatı elemanı boyunun belirlenmesi amacıyla, bu çalışma kapsamında hücresel yapı elemanı ile zemin arasındaki sürtünme davranışı (“Hücresel Yapı Elemanlarının Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı 5. Bölüm’ e bakınız) ve zemin-geoşerit ara yüzey sürtünme davranışı (Şekil 7.10) belirlenmiştir. Model duvar deneylerinde ankraj bölgesinde bulunan hücresel yapı ve geoşerit donatı elemanlarının boyları, sürtünme davranışlarına göre çekme dirençleri eşit olacak şekilde belirlenmiştir. Çekme dirençleri, duvara etki eden aktif toprak basınçlarının dağılımına ve donatı elemanı üzerinde meydana gelen zemin yüküne (düşey gerilme) bağlı olarak belirlenmiştir.

Aktif toprak basıncı ve düşey gerilmelerin belirlenmesi

Model duvar deneylerinde donatı elemanlarının boylarının hesaplanması için duvar ön yüzüne gelen aktif toprak basıncı ve toplam düşey gerilme değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bir istinat duvarına etki eden aktif toprak basınç dağılımı verilmiştir (Şekil 7.11). Herhangi bir derinlikteki aktif toprak basıncı, zemin yükü ($\sigma'_{a(1)}$) ve duvar arkası zemin yüzeyine etkiyen sürşarj yükü ($\sigma'_{a(2)}$) olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Dolayısıyla bir istinat duvarı üzerine etki eden herhangi bir derinlikteki aktif toprak basıncı, granüler zemin ($c=0$) yükünden ve sürşarj yükünden dolayı olan Eşitlik 7.14 yardımı ile belirlenmiştir.

$$\sigma'_a = \sigma'_{a(1)} + \sigma'_{a(2)} \quad (7.14)$$



Şekil 7.11. Bir istinat yapısına etki eden yanal toprak basıncının dağılımı (Laba ve Kennedy, 1986)

Herhangi bir donatı elemanı seviyesindeki toplam düşey gerilme (σ_v), zemin yükü ($\sigma_{v(1)}$) ve sürşarj yükünden (temel yüklemesi) dolayı meydana gelen gerilme artışının ($\sigma_{v(2)}$) toplamına eşittir (Eşitlik 7.15).

$$\sigma_v = \sigma_{v(1)} + \sigma_{v(2)} \quad (7.15)$$

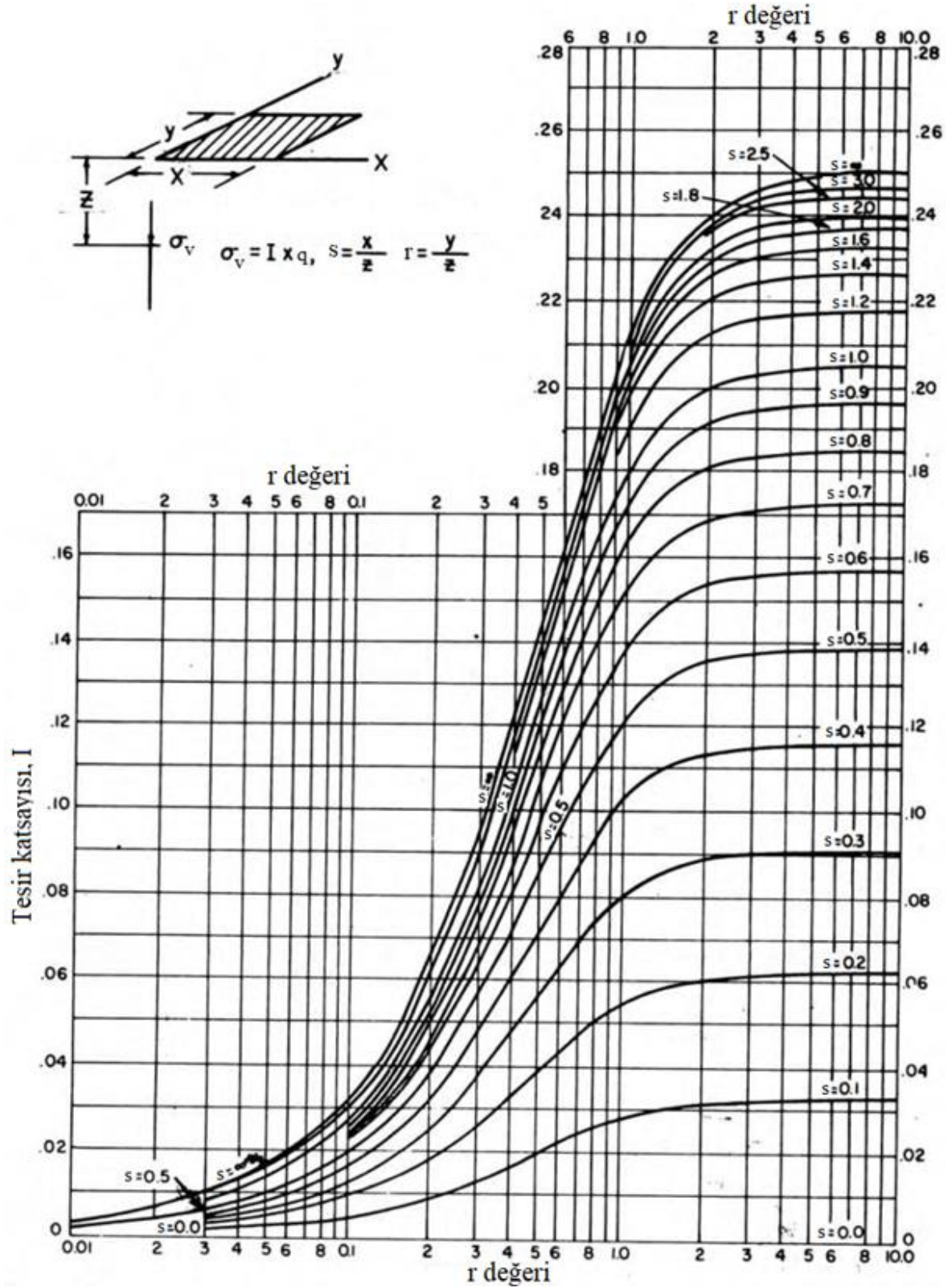
Sürşarj yükünden dolayı meydana gelen gerilme artışı, dikdörtgen alana yüklenmiş yayılı yüklerin tesir katsayılarının belirlenmesine dağılıma göre herhangi bir donatı seviyesi (z) için Şekil 7.12’deki abakta verilmiştir. Abaktan “s” ve “r” değerleri yüklenmiş alanın genişliğine (x) ve uzunluğuna (y) bağlı olarak Eşitlik 7.16 ve 7.17’de belirtilmiştir.

$$s = \frac{x}{z} \quad (7.16)$$

$$r = \frac{y}{z} \quad (7.16)$$

Buna göre “z” derinliğinde herhangi bir donatı elemanı seviyesindeki gerilme artışı Şekil 7.12’de verilen abak yardımı ile tesir katsayılarının belirlenmesi ile Eşitlik 7.17 yardımı ile belirlenebilmektedir.

$$\sigma_{v(2)} = q * I \quad (7.17)$$



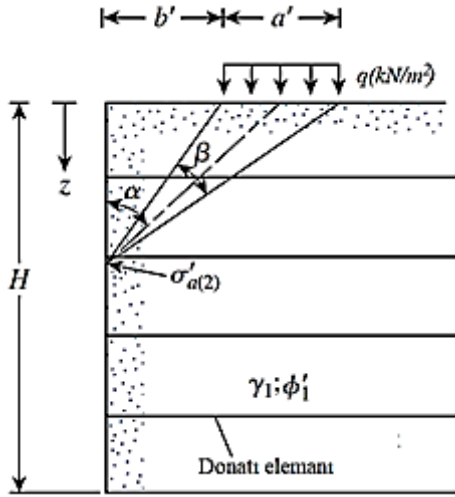
Şekil 7.12. Üniform yüklenmiş dikdörtgen alanda derinlikçe meydana gelen gerilme artışlarının tesir katsayıları kullanılarak belirlenmesi (Holtz ve Kovacs, 2015)

Laba ve Kennedy (1986) göre bir istinat duvarı arkasında sürşarj yükünden dolayı etki eden aktif toprak basıncı Eşitlik 7.18 ile belirlenmektedir (Şekil 7.13).

$$\sigma'_{a(2)} = M \left[\frac{2q}{\pi} (\beta - \sin\beta \cos 2\alpha) \right] \quad (7.18)$$

Burada β radyan cinsinden olup M ise Eşitlik 7.19 ile belirlenmektedir.

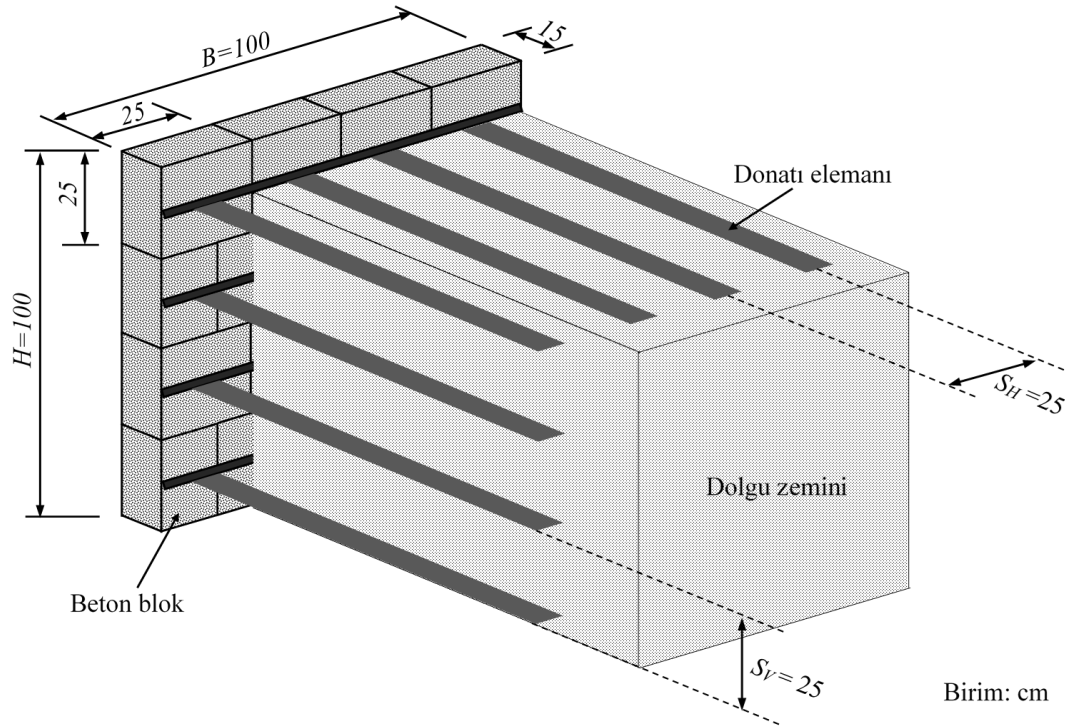
$$M = 1.4 - \frac{0.4b'}{0.14H} \geq 1 \quad (7.19)$$



Şekil 7.13. İstinat duvarına etkiyen aktif toprak basıncı (Laba ve Kennedy, 1986)

Donatılı duvar modeli

Bu çalışma kapsamında model duvar boyutları (genişlik x yükseklik) 1000 x 1000 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Model duvar sisteminde donatı elemanları olarak sırasıyla hücresel yapı elemanı, geoşerit ve hücresel yapı elemanı-geoşerit elemanlar olmak üzere üç farklı donatı elemanı kullanılması amaçlanmıştır. Model duvar sisteminde, duvar ön yüzü boyutları (genişlik x yükseklik x kalınlık) 250 x 250 x 150 mm olan beton blok elemanların kullanılmıştır (Şekil 7.14). Model duvar deneylerinde kullanılacak olan donatı elemanlarının (hücresel yapı elemanı ve geoşerit) yerleşimi, aralarındaki mesafe yatay olarak merkezden merkeze (S_H) 25 cm düşey olarak ise merkezden merkeze (S_V) 25 cm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında yapılan model duvar deneylerinde kullanılan donatı elemanlarının yatay ve düşey olarak yerleşimi Şekil 7.14' te verilmiştir.



Şekil 7.14. Model duvar deneylerinde donatı elemanlarının yatay ve düşey olarak yerleşiminin şematik gösterimi

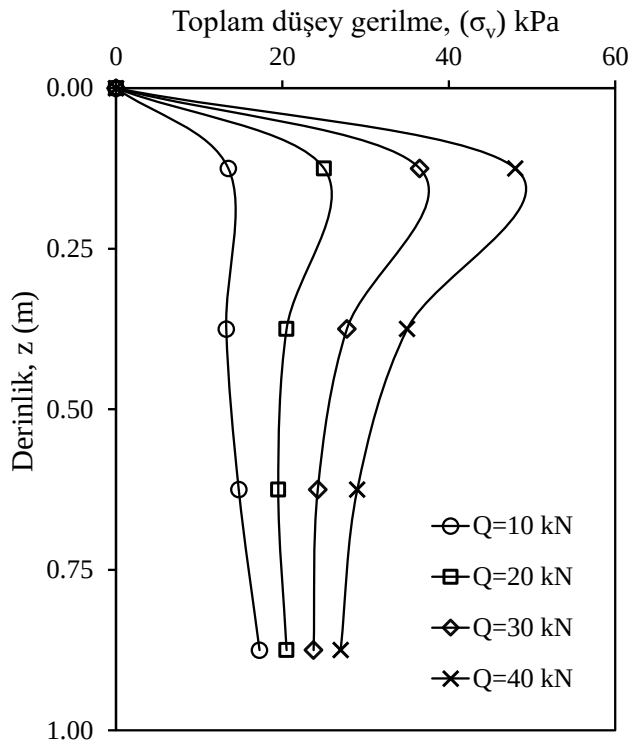
7.3.1. Geoşerit donatı elemanı boyunun belirlenmesi

Model duvar deneylerinde her bir bloğa bir adet donatı elemanı bağlanarak aynı derinlikteki tüm blokların eşit şekilde davranış göstermesi amaçlanmıştır. Model duvar deneylerinde donatı elemanlarının yatayda ve düşeyde yerleşimine göre herhangi bir derinlikteki beton blok üzerine gelen yanal yük (T) Eşitlik 7.10 yardımı ile belirlenmiştir. Model duvar deneylerinde iç stabilite açısından herhangi bir derinlikte bir blok üzerine gelen yükün, zemin ile donatı elemanı arasındaki sürtünme direnci (P_s) tarafından karşılanması gerekmektedir. Ayrıca blok üzerine gelen yük, donatı elemanın çekme dayanımını da aşmaması gerekmektedir. Bu bakımdan herhangi bir derinlikte donatı elemanının iç stabilite açısından güvenliği Eşitlik 7.11 yardımı ile belirlenmektedir. Bu çalışma kapsamında geoşerit donatı elemanının boyu aşağıda sırasıyla verilen aşamalara göre belirlenmiştir.

- Model duvar deneyleri için; duvar yüksekliği (H), dolgu zeminine ait birim hacim ağırlık (γ) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) gibi zemin özellikleri belirlenir.
- Zemin ile geoşerit arasındaki sürtünme açısı (δ) belirlenir.
- Geoşerit donatı elemanının genişliği (w) ve model duvar deneylerinde yatay ve düşey yerleşim aralıkları (S_V ve S_H) belirlenir.

- Eşitlik 7.14 yardımı ile yanal aktif toprak basıncı belirlenir.
- Her bir beton bloğa gelen yanal yük (T) Eşitlik 7.10 yardımı ile belirlenir.
- Belirlenen bir güvenlik katsayısı ile (GS) donatı elemanının ankraj bölgesindeki uzunluğu (L_e) belirlenir.

Model duvar deneyleri için kullanılan geoşerit donatı elemanının boyunun belirlenmesi amacıyla, duvar derinliğince belirlenen düşey gerilmeler Şekil 7.15’ te verilmiştir. Belirlenen düşey gerilmeler ile geoşerit donatı elemanının boyu yukarıda verilen eşitlikler yardımıyla derinlikle belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 7.2’ de verilmiştir. Çizelge 7.2 ‘ de derinlikle düşey gerilme ve aktif toprak basıncının değişimi verilmiştir. Geoşerit donatı elemanlarının ankraj bölgesindeki boyu, 30 kN yük altında Eşitlik 7.11’ de verilen güvenlik katsayısının ($GS=1$) bir alınması ile elde edilmiştir. Geoşerit donatı elemanının toplam boyu (L) ise aktif bölgede bulunan donatı boyu (L_a) ile ankraj bölgesindeki donatı boyunun (L_e) toplamına eşittir. Buna göre aktif bölgede bulunan donatı boyu (L_a) Eşitlik 7.13 yardımı ile belirlenmiştir.



Şekil 7.15. Model duvar deneylerinde temel yüklemesinden dolayı duvar derinliğince meydana gelen düşey gerilme

Çizelge 7.2. GS=1 için geoşerit donatı elemanının boyunun hesaplanması

Derinlik, z (m)	σ_v (kN/m ²)	σ'_a (kN/m ²)	T (kN)	L_a (m)	L_e (m)	L (m)
0.125	36.50	13.86	0.87	0.42	0.35	0.77
0.375	27.75	15.75	0.98	0.30	0.53	0.83
0.625	24.25	7.17	0.45	0.18	0.27	0.45
0.875	23.75	6.72	0.42	0.06	0.26	0.32

Model duvar deneylerinde kullanılan geoşerit donatı elemanının toplam boyu en yüksek 0.375 m derinliğinde olup 0.83 m olarak belirlenmiştir. Olası problemlere karşı tasarımda güvenli bölgede kalınması amacıyla bu çalışma kapsamında donatı elemanının toplam boyu (L) her derinlik için 1.0 m olarak seçilmiştir.

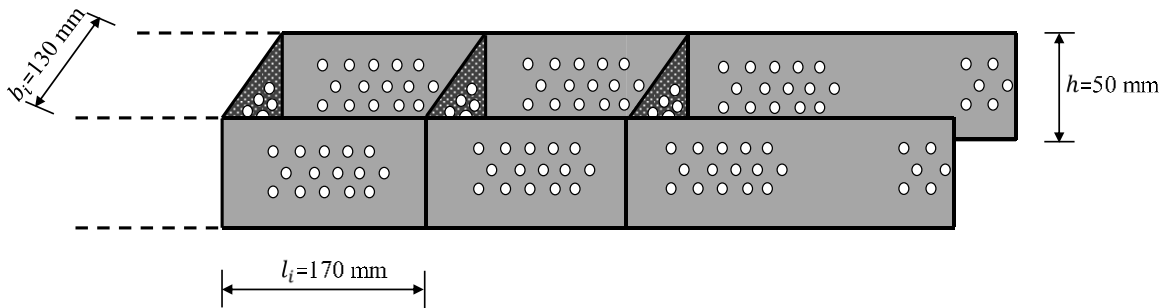
7.3.2. Hücresel yapı elemanı boyunun belirlenmesi

Model duvar deneylerinde kullanılacak hücresel yapı elemanlarının boyu, belirlenen geoşerit donatı elemanlarının boylarına göre hesaplanmıştır. İlk olarak geoşerit donatı elemanı için belirlenen boy (L_e) GS=1 için Eşitlik 7.11' de yerine konularak bloklar üzerine etki eden yanal yük (T) hesaplanmıştır. Daha sonra geoşerit donatı elemanı için hesaplanan yanal yüke göre hücresel yapı elemanının boyutları “Hücresel Yapı Elemanlarının Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı 5. Bölüm’ de detaylı bir şekilde verildiği gibi çekme deney sonuçlarından elde edilen veriler yardımı ile belirlenmiştir. Buna göre toplam boyu (L) 1.0 m olan geoşerit donatı elemanı için bloklar üzerine gelen yanal yükün (T) derinlikle değişimi Eşitlik 7.10 yardımı ile belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 7.3’ te verilmiştir.

Çizelge 7.3. L= 1.0 m geoşerit donatı boyu için bloklara gelen yanal yüklerin derinlikle değişimi

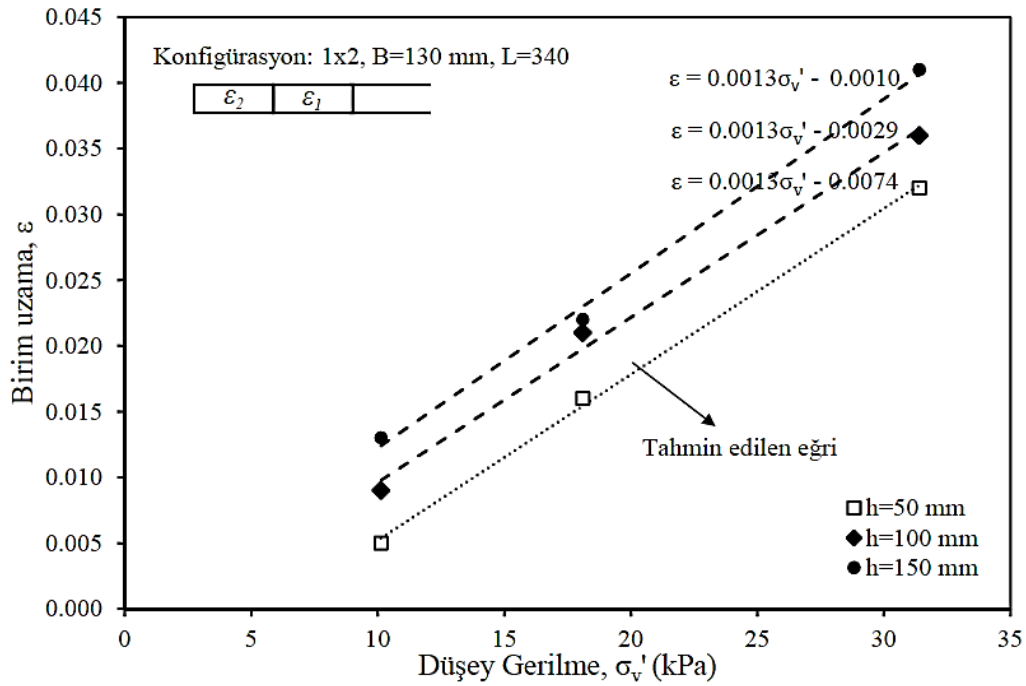
Derinlik, z (m)	σ_v (kN/m ²)	σ'_a (kN/m ²)	L_e (m)	T (kN)
0.125	36.50	13.86	0.58	1.28
0.375	27.75	15.75	0.70	1.11
0.625	24.25	7.17	0.82	1.34
0.875	23.75	6.72	0.94	1.66

Bu çalışma kapsamında hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri (“Hücresel Yapı Elemanlarının Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı 5. Bölüm’ e bakınız) büyük ölçüde hücresel yapı elemanı malzemesinin çekme dayanımına (T_u) bağlı olduğu belirlenmiştir. Model duvar deneylerinde kullanılan hücresel yapı elemanlarının yüksekliği 50 mm, genişliği ise 130 mm olacak şekilde seçilmiştir (Şekil 7.16). Hücresel yapı elemanı tek hücre genişliğinde olacak şekilde hazırlanmış, uzunluk doğrultusundaki hücre sayısı ise yapılan hesaplara göre belirlenmiştir. Hücresel yapı elemanın çekme kapasiteleri, malzeme çekme dayanımından ($T_u=18$ kN/m) küçük olması gerekmektedir (“Hücresel Yapı Elemanlarının (Geocell) Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı bölümde Eşitlik 5.10’ a bakınız). Bu bakımdan hücre yüksekliği 50 mm olan donatı elemanı için herhangi bir derinlikteki taşınabilecek yanal yük en fazla 1.8 kN ($18 \times 2 \times 0.05$) büyüklüğünde olmaktadır. Buna göre hücre yüksekliği 50 mm olan hücresel yapı elemanlarının çekme davranışlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, sadece hücre yüksekliği 100 ve 150 mm olan deney numunelerinin çekme davranışları belirlenmiştir (“Hücresel Yapı Elemanlarının Çekme Kuvvetleri Altındaki Davranışı” ve “Hücresel Yapı Elemanlarının (Geocell) Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı bölümlere bakınız). Ancak hücre yüksekliği 50 mm için yapılan çekme deneyleri, hücresel yapı elemanı numune sayısının yetersiz oluşu ve numunelerin malzeme kalitesinin her eleman için aynı olmaması nedeniyle oldukça kısıtlı sayıda yapılabilmektedir. Bu nedenle hücre yüksekliği 50 mm olan hücresel yapı elemanlarının zeminler içerisindeki sürtünme davranışı detaylı bir şekilde ortaya koyulamamıştır. Buna göre hücre yüksekliği 50 mm olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, hücre yüksekliği 100 ve 150 mm olan hücresel yapı elemanlarının çekme davranışlarına göre belirlenmiştir.

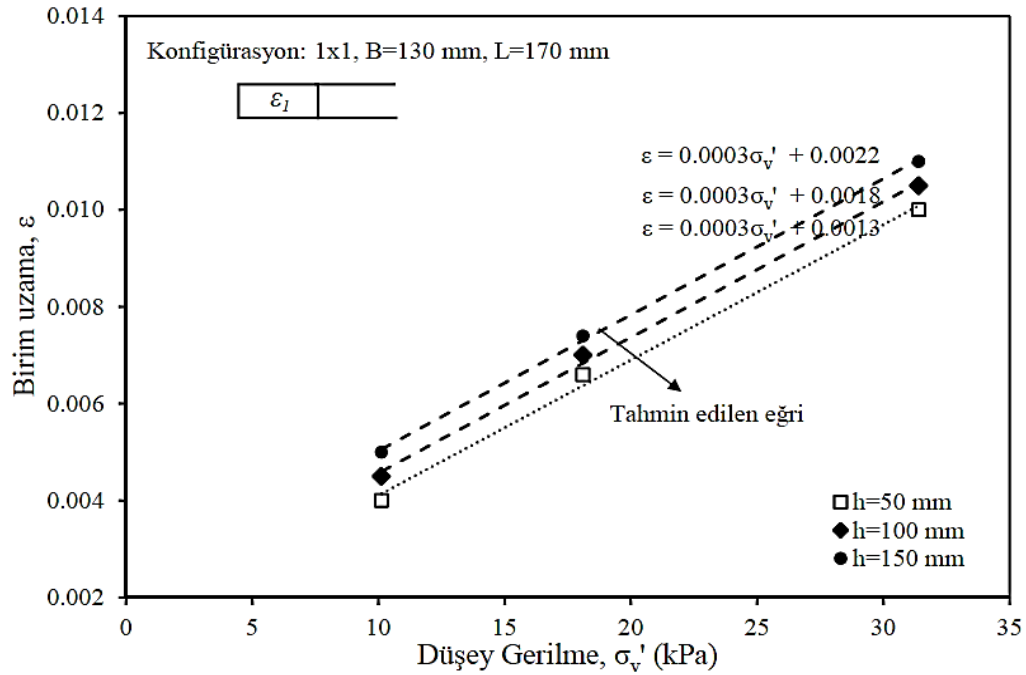


Şekil 7.16. Model duvar deneylerinde kullanılan hücresel yapı elemanının şematik görünümü

Model duvar deneylerinde hücresel yapı elemanlarının boyunun belirlenmesi amacıyla, hücre yüksekliği 100 mm ve 150 mm olan hücresel yapı elemanlarına ait birim uzama ile düşey gerilme arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Hücre yüksekliği 100 ve 150 mm olan hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen birim uzamaların düşey gerilme ile değişimi Şekil 7.17 ve 7.18’ de verilmiştir. Artan düşey gerilme ile hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen birim uzamaların lineer olarak arttığı belirlenmiştir. Hücre yüksekliği 100 ve 150 mm için birim uzama-düşey gerilme eğilim çizgilerinin birbirine paralel ve eğimlerinin neredeyse aynı olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda hücre yüksekliği 50 mm olan hücresel yapı elemanına ait birim uzama-düşey gerilme eğilim çizgisinin de 100 ve 150 mm hücre yüksekliği için elde edilen eğilim çizgilerine paralel olması beklenmektedir. Dolayısıyla artan hücre yüksekliği ile artan birim uzama değişimleri de dikkate alınarak hücre yüksekliği 50 mm için birim uzama-düşey gerilme eğilim çizgisi tahmini olarak belirlenmiştir. Hücre yüksekliği 50 mm olan hücresel yapı elemanlarının eğilim çizgileri ve eğilim çizgilerinin denklemleri, konfigürasyonları 1x1 ve 1x2 olan deney numunelerine göre belirlenmiştir (Şekil 7.17 ve 7.18).



Şekil 7.17. Konfigürasyonu 1x1 olan hücresel yapı elemanlarının birim uzama ile düşey gerilme arasındaki ilişki



Şekil 7.18. Konfigürasyonu 1x2 olan hücresel yapı elemanlarının birim uzama ile düşey gerilme arasındaki ilişki

Tahmini olarak birim uzama-düşey gerilme davranışı elde edilen ve hücre yüksekliği 50 mm olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri, pasif ve sürtünme dirençlerinin ayrı ayrı hesaplanması ile belirlenmiştir (“Hücresel Yapı Elemanlarının (Geocell) Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı bölümde Eşitlik 5.11 ve 5.17’ ye bakınız). Konfigürasyonları 1x1 ve 1x2 olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri (P) Çizelge 7.3’ te verilen derinlikle değişen düşey gerilmelere (σ_v) göre belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 7.4’ te verilmiştir. Hücre yüksekliği 50 mm için belirlenen çekme kapasiteleri, konfigürasyonları 1x1 ve 1x2 olan deney numunelerinin hepsinde bloklar üzerine gelen yanal yükleri (T) karşılayabilmektedir. Ancak hücresel yapı elemanlarının çekme kapasitelerini etkileyen en önemli faktörün malzeme çekme dayanımı olduğu bu çalışma kapsamında belirlenmiştir (“Hücresel Yapı Elemanlarının (Geocell) Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı bölüme bakınız). Bu bakımdan hücre yüksekliği 50 mm olan hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri artan hücresel yapı elemanı boyu ile malzeme çekme dayanımına bağlı olarak değişmemektedir. Dolayısıyla model duvar deneylerinde kullanılmak üzere seçilen herhangi bir hücresel yapı elemanı boyu için oluşacak olan çekme kapasiteleri, çekme dayanıma bağlı olarak maksimum 1.8 kN değerinde olacaktır (Çizelge 7.4).

Model duvar deneylerinde kullanılacak olan hücresel yapı elemanının ankraj bölgesindeki boyu 0.125 m derinlik için iki hücre ($L_e=0.34$ m) boyu olarak seçilmiştir. Buna göre 0.125 m derinlik için hücresel yapı elemanının boyu ($L_a+0.34$) 0.76 m olarak belirlenmiştir. Bir hücresel yapı elemanının tek bir hücre boyu (l_i) 0.17 m olduğundan, 0.125 m derinlik için kullanılması gereken 0.76 m donatı elemanı boyu ancak boyuna hücre sayısı beş olan hücresel yapı elemanı tarafından sağlanabilmiştir. Sonuç olarak 0.125 m derinlik için kullanılan hücresel yapı elemanının donatı boyu 0.85 m olarak belirlenmiştir. Model duvar derinliği boyunca aynı uzunlukta donatı elemanı kullanılması amacıyla 0.375, 0.625 ve 0.875 m derinliklerde de hücresel donatı elemanının boyu 0.85 m olarak alınmıştır.

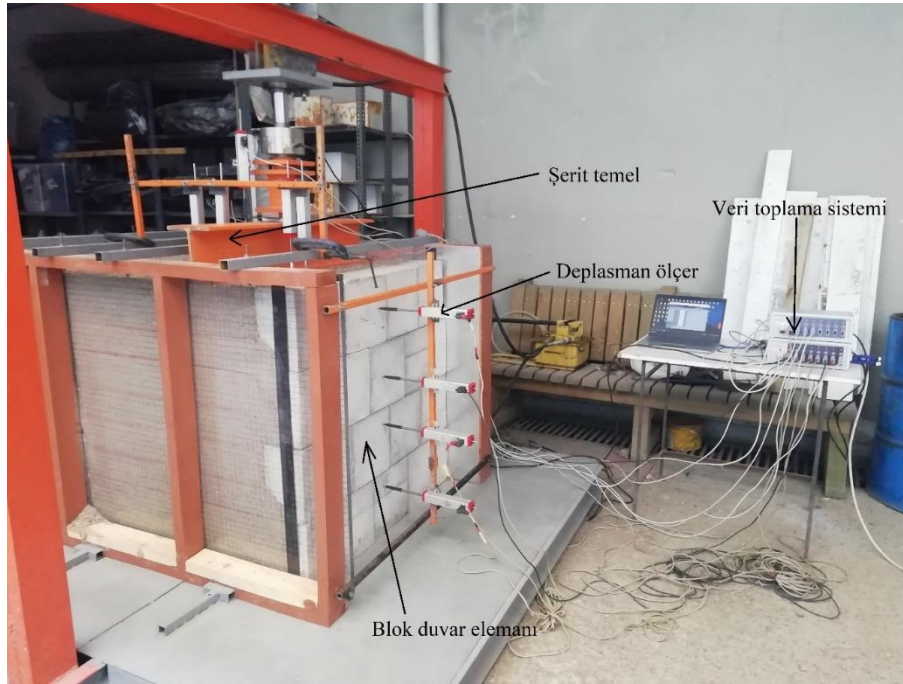
Çizelge 7.4. Hücre yüksekliği 50 mm için derinlikle değişen düşey gerilmelere göre çekme kapasiteleri (P)

Derinlik, z (m)	σ_v (kN/m ²)	T (kN)	Konfigürasyon: 1x1		Konfigürasyon: 1x2		
			ϵ_1	P (kN)	ϵ_1	ϵ_2	P (kN)
0.125	36.50	1.28	0.0110	1.80	0.0352	-	1.80
0.375	27.75	1.11	0.0084	1.67	0.0232	-	1.80
0.625	24.25	1.34	0.0086	1.70	0.0241	-	1.80
0.875	23.75	1.66	0.0092	1.79	0.0267	-	1.80

7.4. Model Duvar Deney Düzenegi

Hücresel yapı elemanları ve geoşerit kullanılarak oluşturulan model duvar deneyleri ile duvar üzerinde oluşan yanal hareketler ve duvar arkası zeminde oluşan oturmalar incelenmiştir. Büyük ölçekli olarak tasarlanan model duvarlar ön yüzü betonarme olarak imal edilmiş bloklardan oluşturulmuştur. Duvar arkası zemine şerit temel ile yükleme yapılarak duvar hareketleri ve temelin oturma miktarları incelenmiştir. Duvar ön yüzünde oluşan yanal hareket, temelin oturma miktarı ve temele yakın zemin yüzeyinde oluşan oturmalar deplasman ölçerler yardımı ile belirlenmiştir. Model duvar deneyleri için kullanılan malzemelere (zemin ve hücresel yapı elemanı) ait fiziksel ve mekanik özellikler 3. Bölümde verilen Deneysel Çalışma kısmında detaylı olarak açıklanmıştır. Bu çalışmada hücresel yapı elemanı, geoşerit ve hücresel yapı elemanı ve geoşerit birlikte kullanılarak güçlendirilmiş üç adet model deney düzenegi geliştirilmiştir.

Model duvar deney düzeneği kutusu ahşap kullanılarak 1000x1100x2000 mm boyutlarında (en x yükseklik x uzunluk) tasarlanmıştır. Deney kutusu için plywood (20 mm kalınlık) malzemesi ahşap destek kirişleri (50x100 mm) ile güçlendirilerek imal edilmiştir. Ayrıca model deney kutusunun bir kenarı pleksi cam ile kaplanarak duvar arkası zeminin yükleme durumunda yaptığı hareketin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Kullanılan pleksi cam, plywood ile aynı kalınlıkta olup darbelere ve yüklere karşı dayanıklıdır. Kullanılan zemin malzemesi model deney kutusuna yerleştirilmeden önce, deney kutusu iç yüzeyleri yağlanarak yükleme anında kutu iç yüzeylerinde meydana gelebilecek sürtünme dirençlerinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan model duvar deney düzeneğine ait genel bir görünüm Resim 7.1’ de verilmiştir. Model duvar düzeneği; deney kutusu, yükleme sistemi (çerçeve, hidrolik krikolar), beton bloklar, hücresel yapı elemanı veya geoşerit, deplasman ölçerler (LVDT’ ler), yük hücreleri ve veri toplama sisteminden (veri toplama cihazı ve bilgisayar) oluşmaktadır. Model deney düzeneğinde kullanılan ölçüm cihazları (LVDT ‘ler, yük hücreleri, veri toplama cihazı) “Kohezyonsuz Zeminler İçerisindeki Hücresel Yapı Elemanlarının Çekme Kapasitelerinin Belirlenmesine Yönelik Laboratuvar Deney Düzeneği” adlı bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Ayrıca model duvar deney düzeneğine ait yandan ve üstten şematik gösterim Şekil 7.19 ve 7.20’ de verilmiştir.

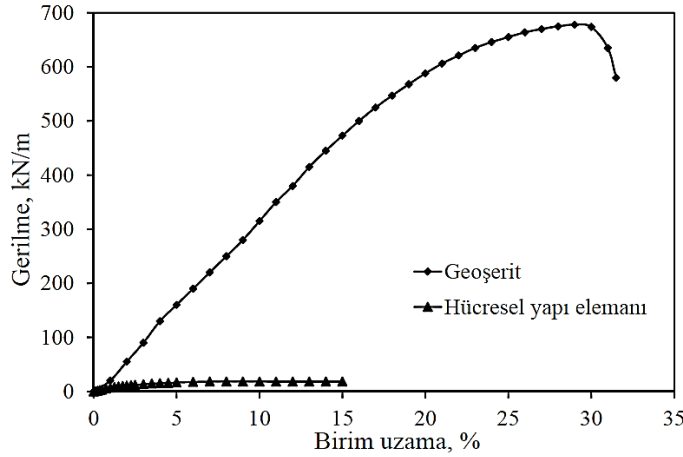


Resim 7.1. Model duvar deney düzeneğine ait genel bir görünüm

verilmiştir. Ayrıca model duvar deneylerinde kullanılan zemin malzemesine ait fiziksel ve mekanik özellikler ise (dane dağılımı, özgül ağırlık, maksimum ve minimum boşluk oranları, içsel sürtünme açısı ve kohezyon) “Kohezyonsuz Zeminler İçerisindeki Hücresel Yapı Elemanlarının Çekme Kapasitelerinin Belirlenmesine Yönelik Laboratuvar Deney Düzeneği” adlı bölümde detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 7.5. Donatı elemanların fiziksel ve mekanik özellikleri

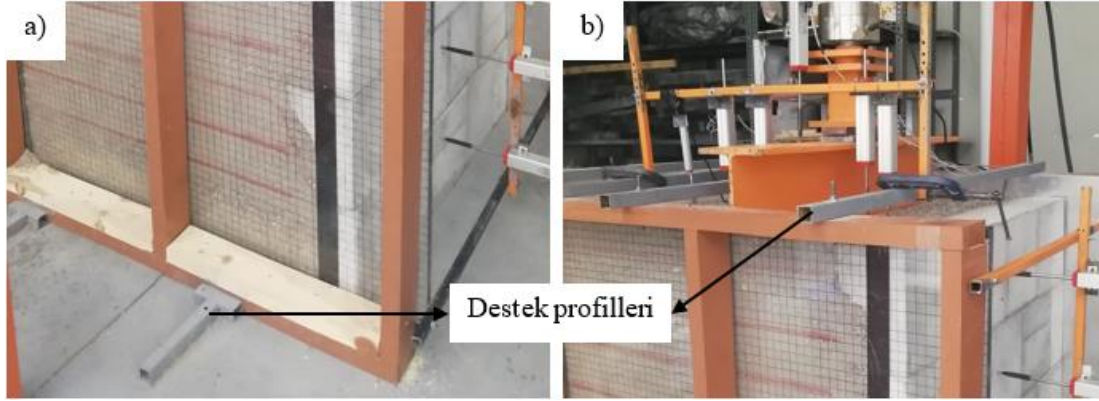
Özellik	Geoşerit	Hücresel yapı elemanı
Hücre genişliği (b_i)	-	130 mm
Hücre uzunluğu (l_i)	-	170 mm
Hücre yüksekliği (h)	-	50 mm
Yoğunluk	0.965 g/cm ³	0.965 g/cm ³
Kalınlık	1.5 mm	1.5 mm
Çekme dayanımı	>650 kN/m	>18 kN/m
Kaynak noktası dayanımı	-	>18 kN/m



Şekil 7.21. Donatı elemanlarına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

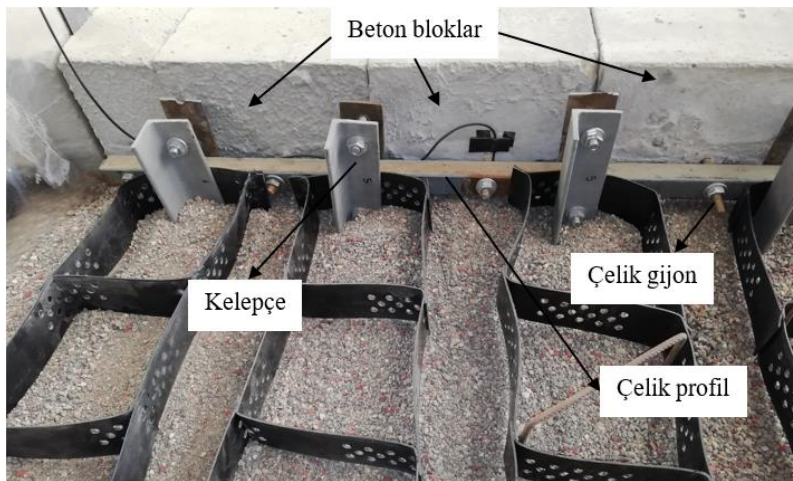
7.4.2. Duvar yükleme deneyi

Model deney kutusu yaklaşık olarak 3.5 ton kum malzemesi ile doldurulmaktadır. Kum malzemesi deney kutusuna belli bir sıkılıkta yerleştirilmekte olup, sıkıştırılma işlemi el tipi tokmak kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca deney sırasında yükleme işlemi aşamasında deney kutusu aşırı yüklere maruz kalmaktadır. Bu bakımdan deney kutusu üzerine gelen yükleri sağlıklı bir şekilde taşıyabilmesi için deney kutusu tabanında ve üstünde çelik profiller ile destek sağlanmıştır (Resim 7.2).

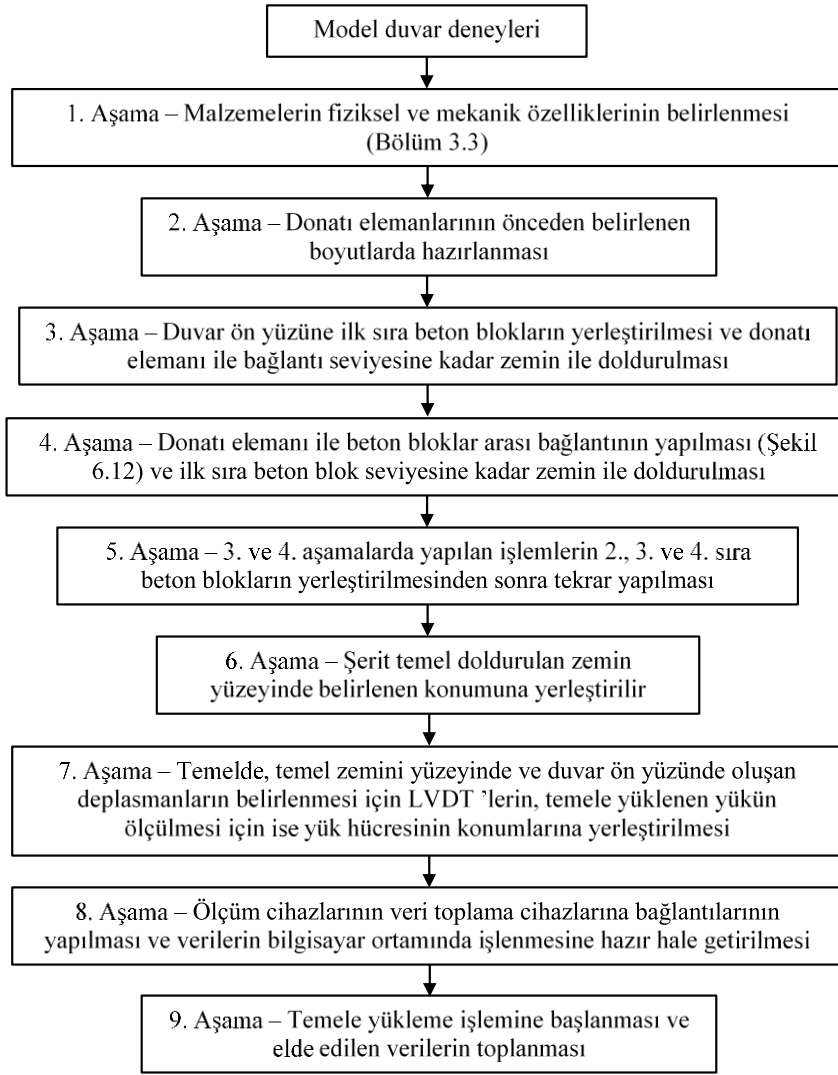


Resim 7.2. Deney kutusunun tabandan ve tavandan göçmemesi için kullanılan destek profilleri a) tabana yerleştirilen b) üstüne yerleştirilen

Duvar deney kutusu ön yüzüne beton bloklar 4 sıra halinde toplam 16 adet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Beton blokların hücresel yapı veya geoşerit donatı elemanına bağlantısı için beton bloklara gömülü çelik gijonlar kullanılmıştır. Beton bloklar sıra halinde çelik profil vasıtasıyla birbirlerine bağlanarak donatı elemanlarının beton bloklara bağlantısı için uygun ortam hazırlanmıştır. Daha sonra donatı elemanları sıra halinde beton bloklara bağlanan çelik profillere kelepçe ile bağlanarak donatı elemanı ile beton blok arasındaki bağlantı oluşturulmuştur (Resim 7.3). Duvar deney kutusunun yükleme aşamasında zarar görmemesi için alınan önlemler Resim 7.2’ de ve beton blokların donatı elemanlarına bağlantısı ise Resim 7.3’ te verilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda model duvar deneyleri ile ilgili deneysel çalışma aşamaları Şekil 7.22 ‘de akış diyagramında verilmiştir.



Resim 7.3. Donatı elemanının beton bloklara bağlantısı



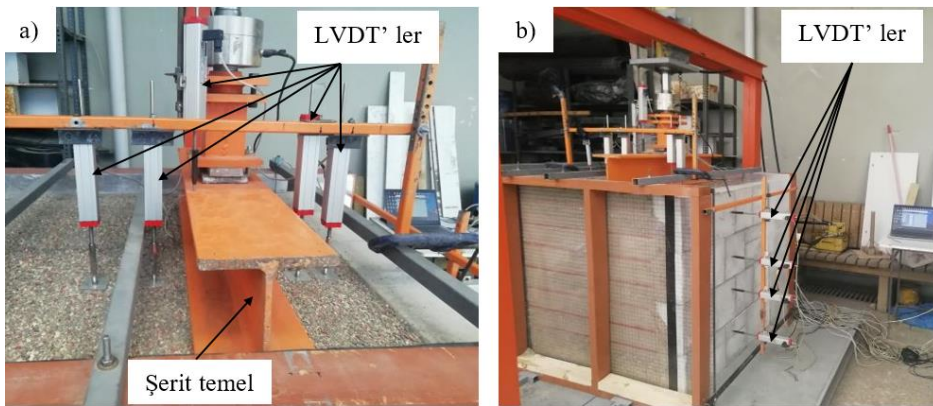
Şekil 7.22. Model duvar deneyleri için deneysel çalışma akış diyagramı

Duvar deney kutusu, beton blok yüksekliğinin yarısına göre 12.5' er cm' lik 8 eşit tabakalar halinde dolgu zemini ile doldurulmuştur. Boyları önceden belirlenen donatı elemanları (hücresel yapı ve geoşerit) beton bloklar ile bağlantısı yapılmadan önce bloklar ilk sıra halinde deney kutusu ön yüzüne yerleştirilir. Daha sonra deney kutusu zemin ile beton blok ortasına (12.5 cm) gelecek kadar doldurulup sıkıştırılır. Sıkıştırılma işleminden sonra donatı elemanları, bloklar ile bağlantısı yapılarak konumlarına göre yerleştirilir (Resim 7.4a). Daha sonra deney kutusunun beton blok seviyesine kadar kalan kısmı zemin ile doldurularak ilk sıra için doldurma işlemi tamamlanır. Daha sonra sırasıyla 2., 3. ve 4. sıra beton bloklar donatı elemanları ile birlikte aynı işleme tabi tutularak deney kutusunun zemin ile doldurma işlemi tamamlanmaktadır (Resim 7.4b).

Genişliği 20 cm ve uzunluğu 100 cm olan I Profilden yapılan şerit temel, duvar arkası zemin yzeyi izerinde konumuna yerleştirilmiştir (Resim 7.5a). şerit temel ile beton blok duvar arası mesafe, temel genişliği kadar seğilip 20 cm olarak belirlenmiştir. Daha sonra temelde ve temel zemini yzeyinde meydana gelecek oturmaların (Resim 7.5a) ve duvar ın yzeyinde oluşacak yanal deplasmanların (Resim 7.5b) belirlenmesi için deplasman lerler (LVDT 'ler) konumlarına yerleştirilmiştir. Model duvar arkası zemin yzeyine temel vasıtasıyla yükleme yapmak için yükleme krikoları, uygulanan yükleri ölçmek için ise yk hücresi kullanılmıştır. Yükleme işlemi manuel krikolar yardımı ile elle yapılmıştır. Daha sonra yükleme aşamasında temelde, temele yakın bölgelerde ve duvar ın yzeyinde oluşan deplasmanlar ve uygulana yük değerleri, ölçüm cihazlarının veri toplama cihazına bağlantısı yapılarak bilgisayar ortamında elde edilmiştir.



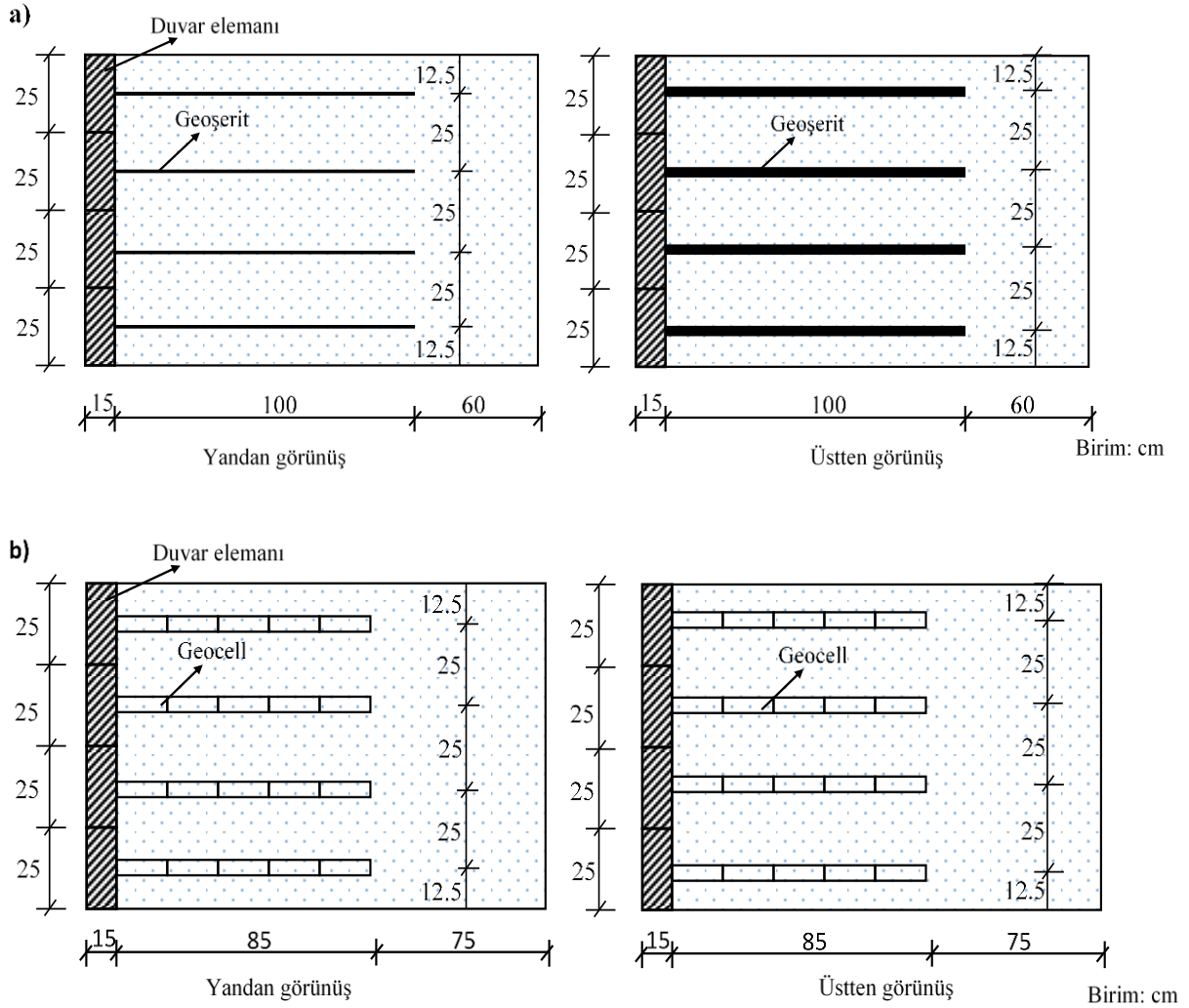
Resim 7.4. Deney kutusu doldurma işlemi a) ilk sıra beton blokların donatı elemanları ile bağlantısı yapılarak deney kutu içinde konumlarına yerleştirilmesi b) sırasıyla beton blokların yerleştirilmesi

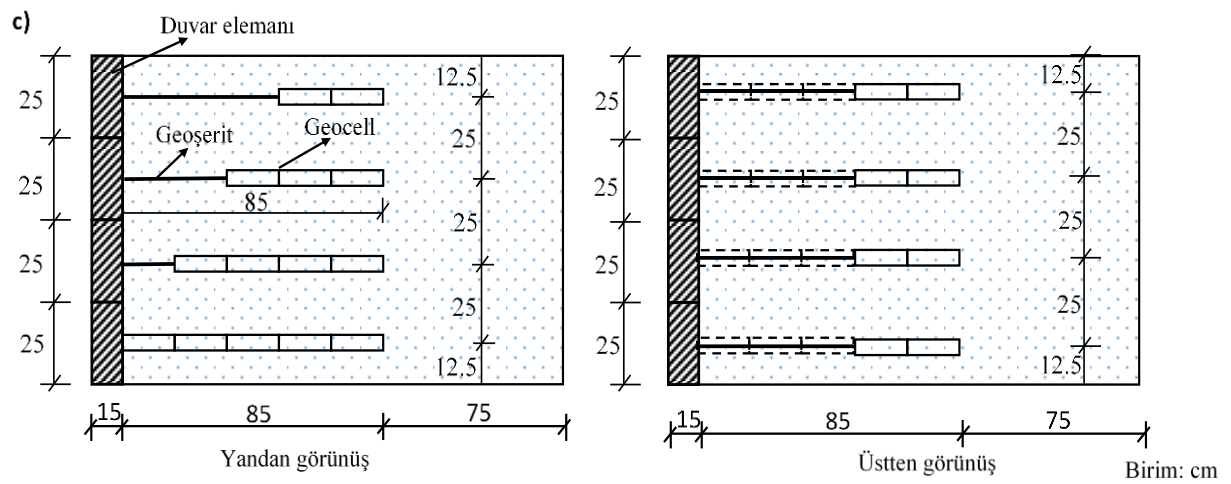


Resim 7.5. Deplasman lmleri için LVDT 'lerin yerleşimi a) temel ve temel yzeyine yakın bölgelere b) duvar ın yzne

7.4.3. Deney programı

Model duvar deneyleri için yapılan deneysel çalışma kapsamında hücresel yapı elemanı, geoserit ve geoserit-hücresel yapı elemanı birlikteliği ile oluşturulan kompozit donatı elemanları olmak üzere üç farklı donatı elemanı türü kullanılmıştır. Model duvar deneylerinde yapılan deneyler ve kullanılan donatı elemanlarının konumları şematik olarak Şekil 7.23’ te ve ayrıca donatı elemanlarına ait görünümüler ise Resim 7.6’ da gösterilmiştir. Tüm deneyler için yükleme işlemi temel boyutları ve konumu aynı olan tek bir temel üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneylerde yapılan deplasman ölçümleri model duvar örneklerini birbirleri ile karşılaştırabilmek için aynı noktalardan alınmıştır.



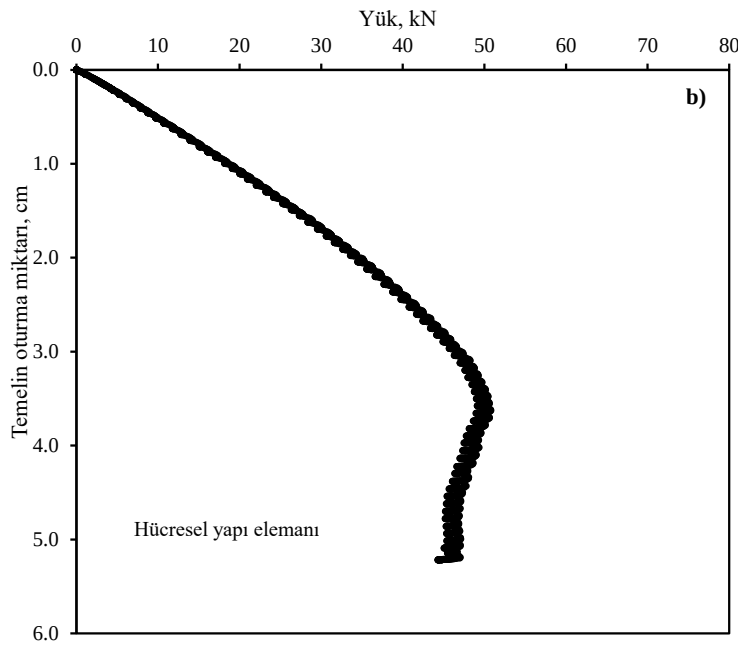
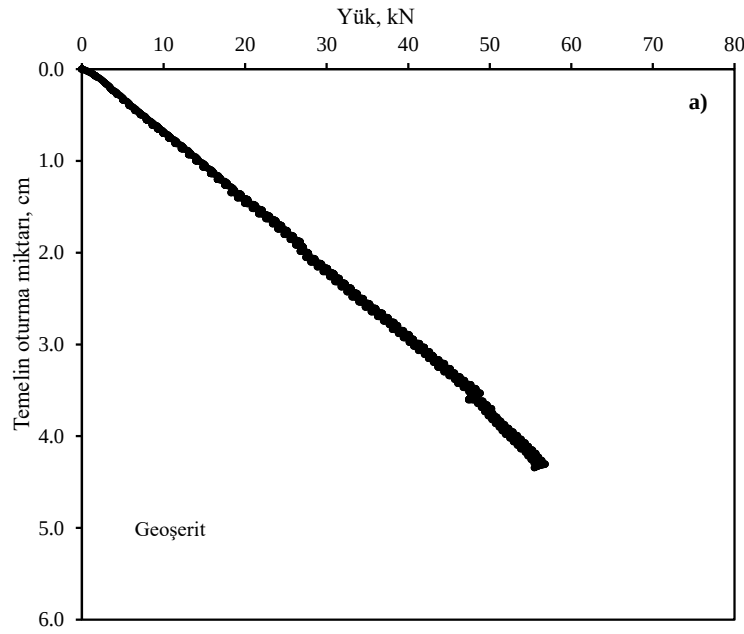


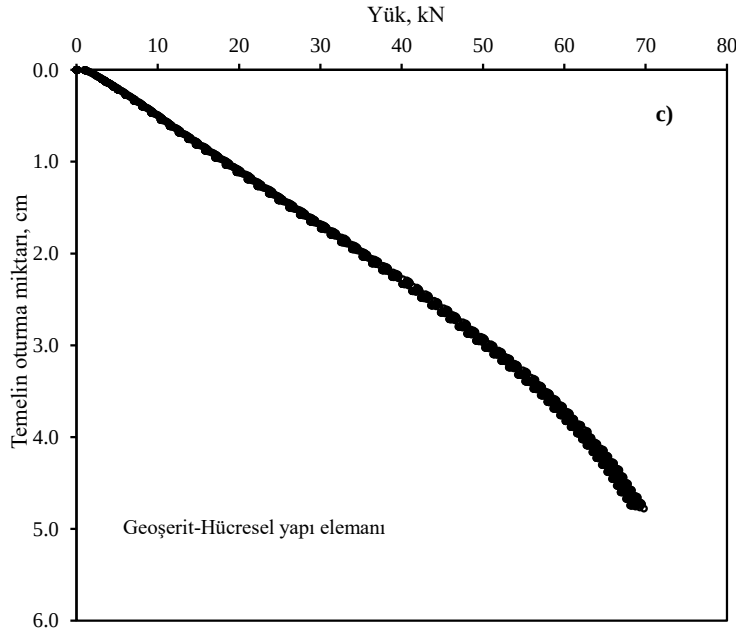
Şekil 7.23. Model duvar deneylerinin yandan ve üstten görünüşleri a) hücresel yapı elemanlı model duvar b) geoşerit elemanlı model duvar c) hücresel yapı elemanı ve geoşerit birlikte kullanılarak oluşturulan model duvar



Resim 7.6. Model duvar deneylerinde kullanılan donatıların yerleşimi a) hücresel yapı elemanlı model duvar b) geoşerit elemanlı model duvar c) hücresel yapı elemanı ve geoşerit birlikte kullanılarak oluşturulan model duvar

(Şekil 7.25). Hücresel yapı elemanlı model duvar deneyinde temelin yük-oturma performansının geoşerit donatılı model duvara göre daha iyi olduğu söylenebilir. Geoşerit-hücresel yapı elemanlı model deneyde ise oturma miktarları geoşerit donatılı model duvar deneylerine göre daha az, fakat hücresel yapı elemanlı model duvar deneylerine göre ise biraz fazla olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, hücresel yapı elemanlı model duvarların yük-oturma performansı iyi fakat yanal duvar hareketleri ise diğer model duvarlara göre kötü olduğu belirlenmiştir.

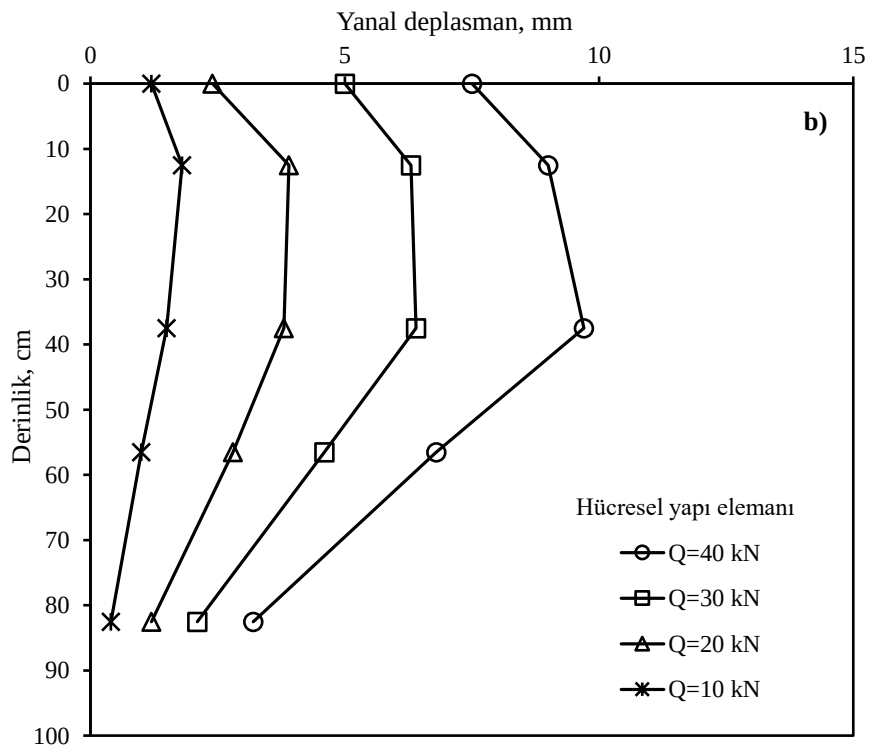
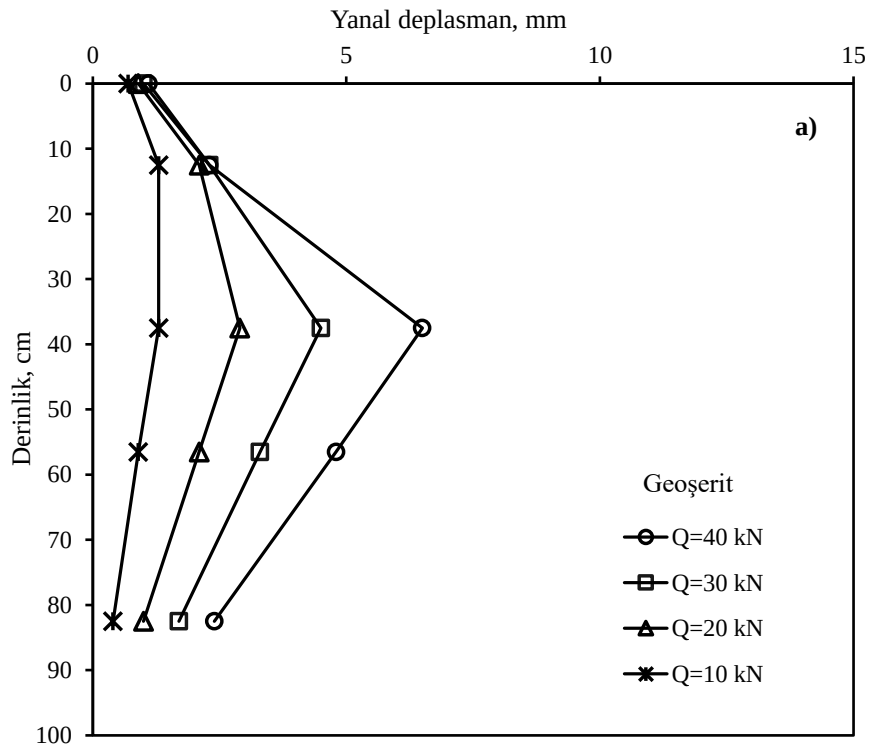


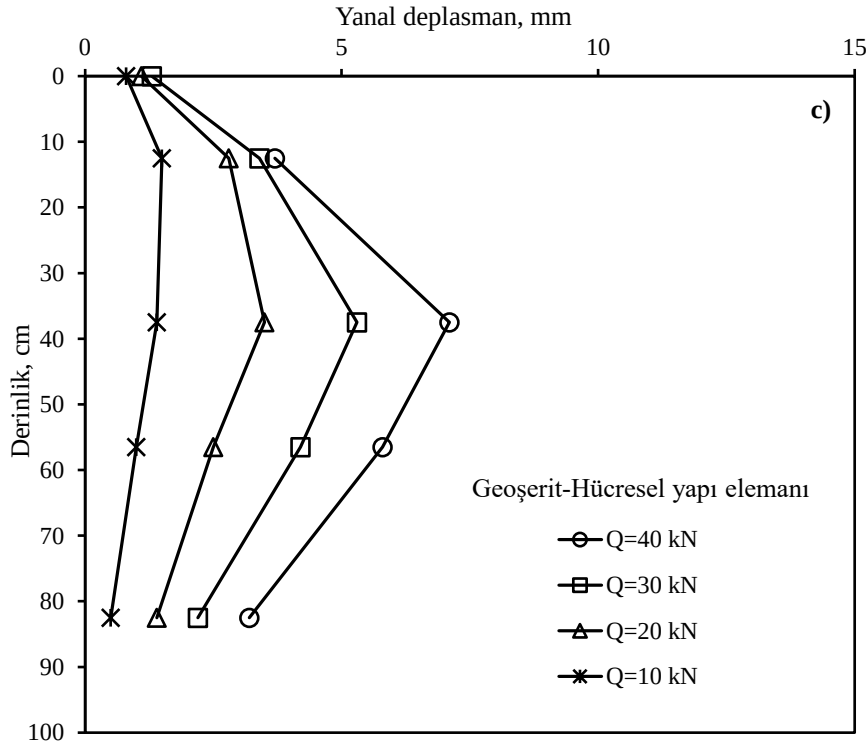


Şekil 7.25. Model duvar deneylerinde donatı türlerine göre temelin yük-oturma ilişkileri a) geoşerit b) hücreesel yapı elemanı c) geoşerit-hücreesel yapı elemanı

7.5.1. Model duvar deneylerinde yanal duvar hareketlerin belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında farklı donatı elemanı türlerine göre oluşturulan model duvar deneylerinde temel yüklemesi sonucu duvar ön yüzünde meydana gelen yanal hareketler incelenmiştir. Donatı türlerine göre elde edilen yanal hareketler birbirleriyle karşılaştırılması amacıyla, model duvar ön yüz elemanlarının (beton blokların) derinlikle yanal hareket değişimleri belirlenmiştir. Geoşerit, hücreesel yapı elemanı ve geoşerit-hücreesel yapı elemanlı donatı kullanılarak oluşturulan model duvar deneylerine ait derinlikçe yanal duvar hareketleri Şekil 7.26 'da verilmiştir. Yanal duvar hareketleri tüm model deneylerin hepsinde temel yükü artıkça artmaktadır. Model duvar deneylerinde en fazla yanal duvar deplasmanları 37.5 cm derinliğinde, en az duvar deplasmanların ise 82.5 cm derinliğinde olduğu belirlenmiştir. Farklı donatı türlerine göre oluşturulan model duvar deneylerinde en fazla yanal duvar hareketi hücreesel yapı elemanlı model duvarda meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 7.26). Geoşerit ve geoşerit-hücreesel yapı elemanlı model duvarlarda ise duvar yanal hareketleri birbirine yakın olduğu belirlenmiştir.

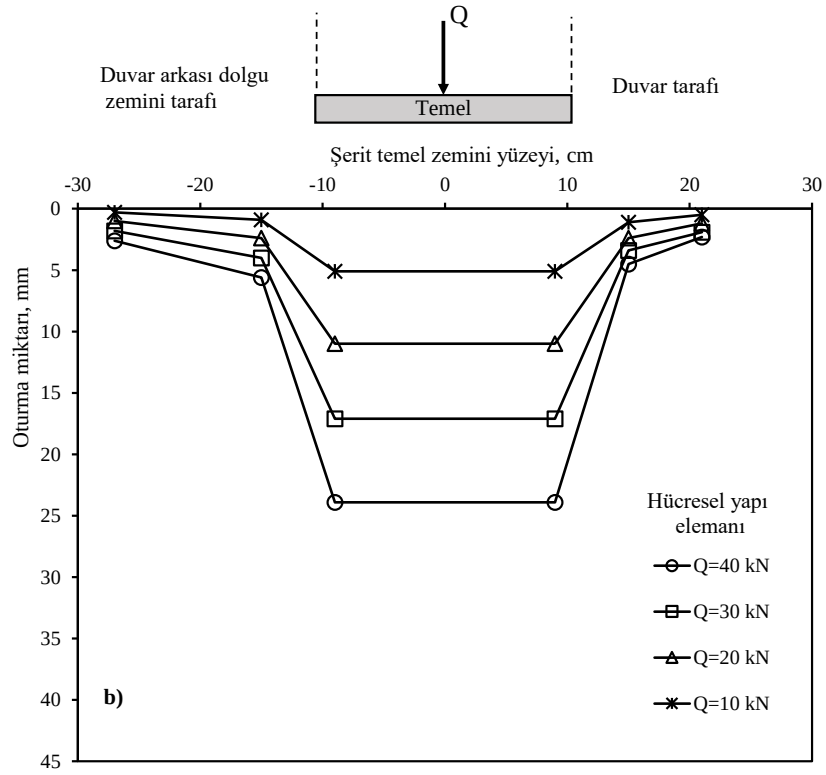
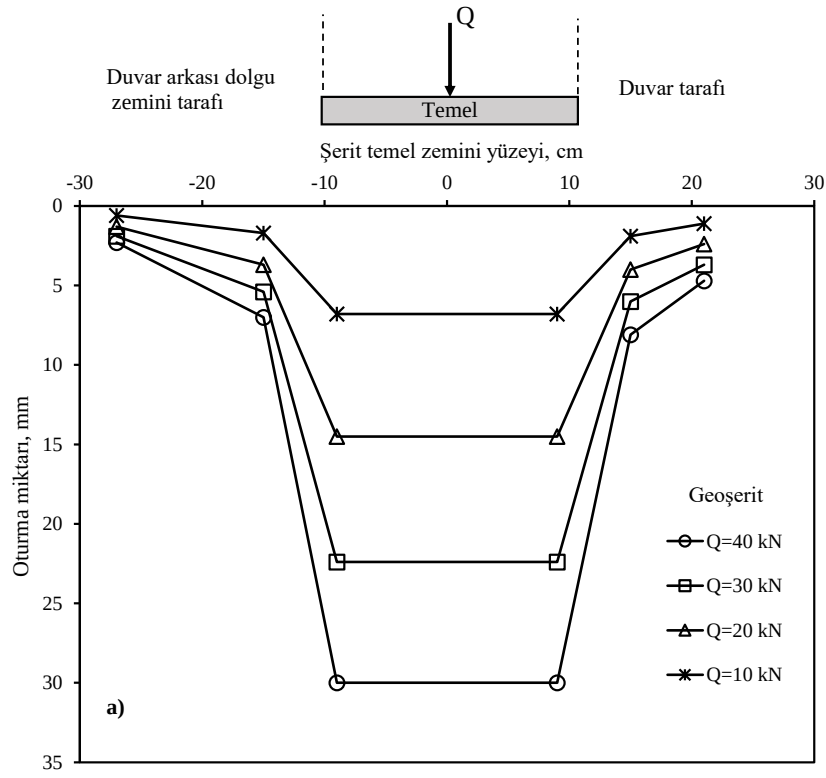


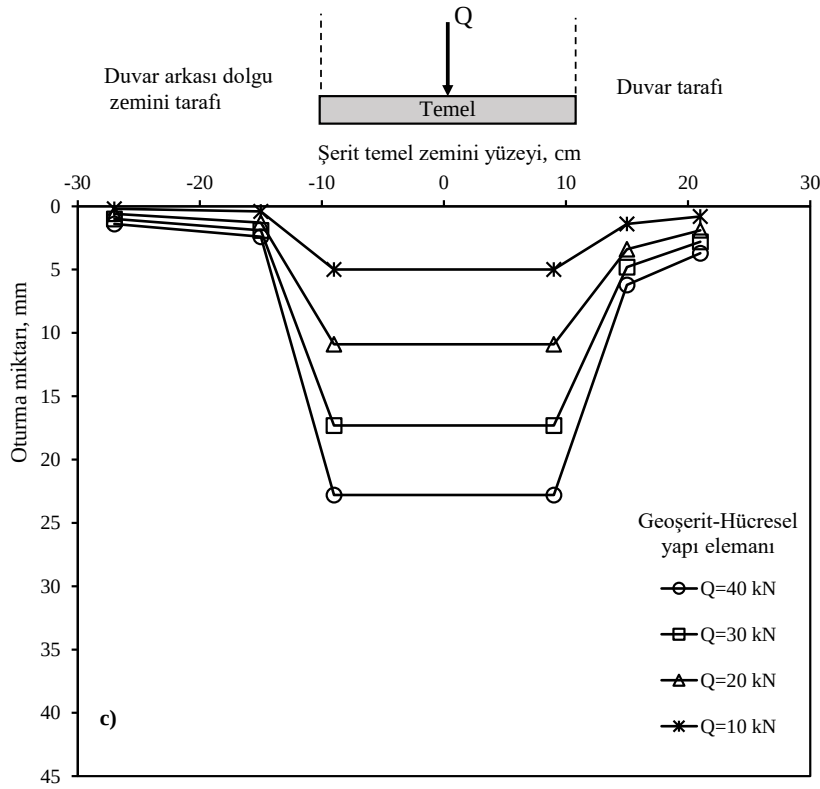


Şekil 7.26. Yüklemeden dolayı oluşan yanıl duvar hareketleri a) geoşerit, b) hücreseı yapı elemanı ve c) geoşerit-hücreseı yapı elemanı

7.5.2. Model duvar deneylerinde temel ve temel zemini yüzeyinde meydana gelen oturmaların belirlenmesi

Yüklemeden dolayı temel zemini yüzeyinde duvar boyunca oluşacak oturmalar her üç donatı elemanı türü ile oluşturulmuş model duvarlar için belirlenmiş ve elde edilen veriler Şekil 7.27 'de verilmiştir. Şekilde x eksenindeki “0” şerit temelin merkezini, “-“ değerlerin temel yüzeyinin dolgu tarafını ve “+” işareti ise temel yüzeyinin duvar tarafını ifade etmekte olup bu yüzeylerde oluşan oturmalar Şekil 7.27 'de verilmiştir. Şekilden de görüleceğe üzere hücreseı yapı elemanlı model duvarda temel yüzeyinin oturma değerleri geoşerit donatılı model duvara göre daha az olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 7.25b' de görüldüğü gibi hücreseı yapı elemanın yük-oturma performansı ile açıklanabilir. Ayrıca geoşerit-hücreseı yapı elemanlı model duvarda temel yüzey oturmaları dolgu tarafında duvar tarafına göre oldukça düşük düzeydedir (Şekil 7.27c). Bu durumun çekme bölgesinde hücreseı yapı elemanın oturma performansından kaynaklandığı net bir şekilde söylenebilir.





Şekil 7.27. Yüklemeden dolayı temel zemini yüzeyinde oluşan oturmalar a) geoşerit, b) hücresele yapı elemanı ve c) geoşerit-hücresele yapı elemanı

7.6. Model Duvar Hareketlerinin Çekme Gerilmesi-Deplasman İlişkileri Kullanılarak Belirlenmesi

Bu bölümde model duvar deneylerinden elde edilen yanıl duvar hareketleri “Hücresele Yapı Elemanlarının Çekme Gerilmesi-Deplasman Davranışı Modeli” adlı bölümde geliştirilen çekme gerilmeleri-deplasman ilişkileri kullanılarak tahmin edilmektedir. Bu kapsamda sadece hücresele yapı elemanı kullanılarak oluşturulan model duvar deneyinde elde edilen yanıl duvar hareketleri incelenmiştir (Şekil 7.26b). Model duvar deneyinde çekme yüklerine maruz kalan hücresele yapı elemanı üzerinde meydana gelen maksimum deplasmanlar (S_{maks}) aşağıda verilen eşitlik yardımı ile belirlenmektedir.

$$S_{maks} = (\sigma_v) 46.87 \left(\frac{k}{L_e} \right)^{-1.106} \quad (7.20)$$

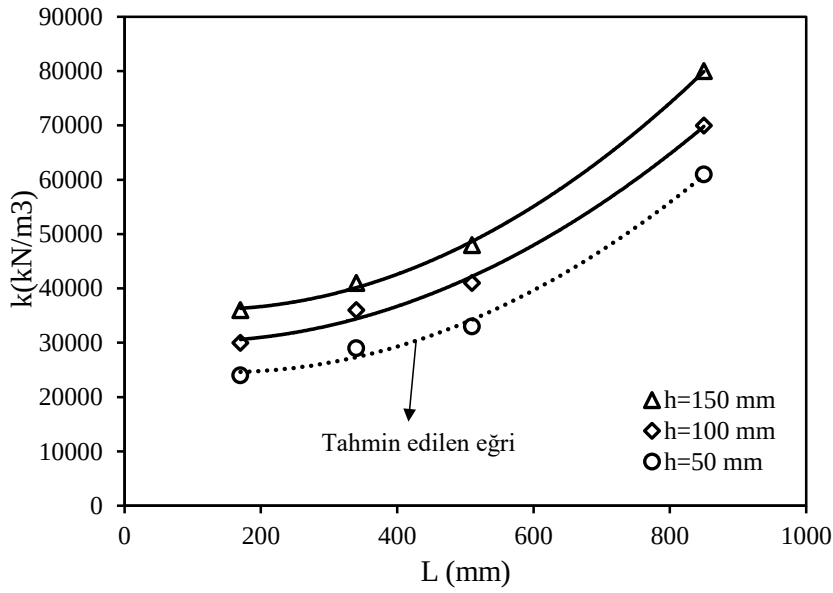
Burada k (kN/m^3) çekme gerilmesi-deplasman eğrisinin başlangıç rijitliği, L_e (m) ankraj bölgesindeki hücresele yapı elemanının boyu ve σ_v (kN/m^2) ise uygulanan düşey gerilmedir.

Model duvar deneyinde ankraj bölgesinde bulunan hücresel yapı elemanı üzerine uygulanan toplam düşey gerilme (σ_v), temel yükünden kaynaklı oluşan gerilme artışı ve zemin yükü toplamına eşittir (Eşitlik 7.15). Temel yükünden dolayı derinlikçe meydana gelen gerilme artışı üniform yüklenmiş dikdörtgen temellerde tesir katsayıları yöntemine (Şekil 7.12) göre belirlenmiştir. Model duvar derinliğince hücresel yapı elemanı üzerine gelen toplam düşey gerilme uygulanan temel yüküne (Q) göre Çizelge 7.6 'da verilmiştir.

Çizelge 7.6. Duvar derinliğince uygulanan düşey gerilme

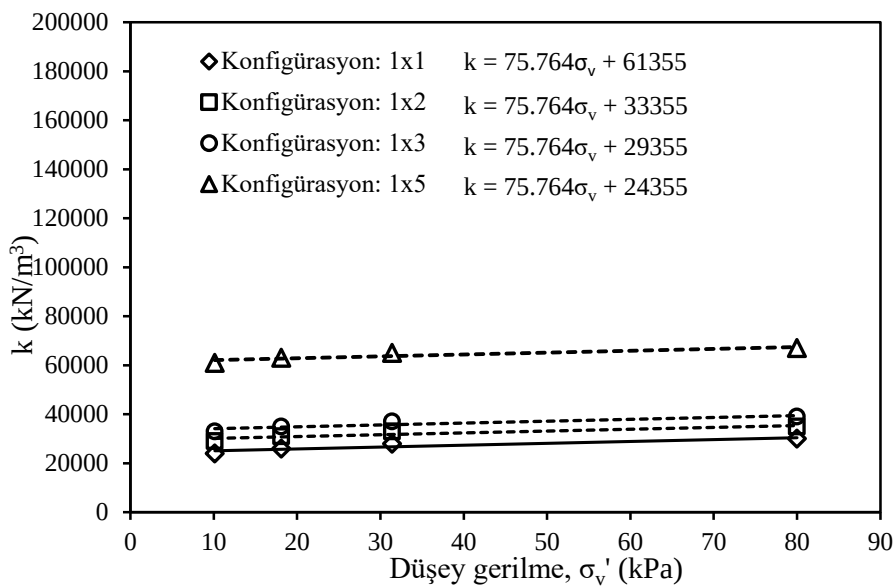
Derinlik, z (m)	Düşey gerilme, σ_v (kN/m ²)			
	Q=10 kN	Q=20 kN	Q=30 kN	Q=40 kN
0.125	13.50	25.00	36.50	48.00
0.375	13.25	20.05	27.75	35.00
0.625	14.75	19.50	24.25	29.00
0.875	17.25	20.50	23.75	27.00

Maksimum deplasman hesaplarında kullanılmak üzere belirlenecek olan başlangıç rijitliği (k), hücre yüksekliği 50 mm olan hücresel yapı elemanlarına ait çekme gerilmesi-deplasman ilişkilerinden yetersiz sayıda olduğundan belirlenememiştir. Bu bakımdan hücre yüksekliği 50 mm olan hücresel yapı elemanlarının başlangıç rijitlik değerleri (k), hücre yüksekliği 100 mm ve 150 mm olan deney numunelerinden elde edilen başlangıç rijitliği değerlerine (k) göre belirlenmiştir. Konfigürasyonları 1x1, 1x2, 1x3 ve 1x5 olan hücresel yapı elemanları üzerinde yapılan çekme deneylerinde elde edilen çekme gerilmesi-deplasman ilişkileri kullanılmıştır. Konfigürasyonları 1x1, 1x2, 1x3 ve 1x5 olan hücresel yapı elemanlarının başlangıç rijitlik değerleri 10.12 kPa düşey gerilme altında hücre yüksekliği 100 mm ve 150 mm için Şekil 7.28' de verilmiştir. Ayrıca hücre yüksekliği 50 mm olan hücresel yapı elemanlarının başlangıç rijitlik değerleri, hücre yüksekliği 100 mm ve 150 mm olan hücresel yapı elemanlarının başlangıç rijitliği-eleman boyu arasındaki ilişkilere benzer olarak Şekil 7.28' de tahmini olarak verilmiştir.



Şekil 7.28. Hücre yükseklikleri 50, 100 ve 150 mm ve konfigürasyonu 1x1, 1x2, 1x3 ve 1x5 olan hücresel yapı elemanlarının başlangıç rijitliği-elaman boyu arasındaki ilişkiler

Model duvar deneylerinde kullanılan hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen toplam düşey gerilmeler dikkate alınarak, model duvar üzerinde oluşan yanal deplasman hesaplarında kullanılmak üzere başlangıç rijitliği değerleri Şekil 7.29' de tahmini oluşturulan eğrilerden elde edilmiştir. Buna göre model duvar deneylerinde kullanılan hücresel yapı elemanlarının başlangıç rijitliği değerleri üzerine gelen toplam düşey gerilmelere göre Çizelge 7.7'de verilmiştir.



Şekil 7.29. Hücre yüksekliği 50 mm için başlangıç rijitliği-düşey gerilme ilişkisi

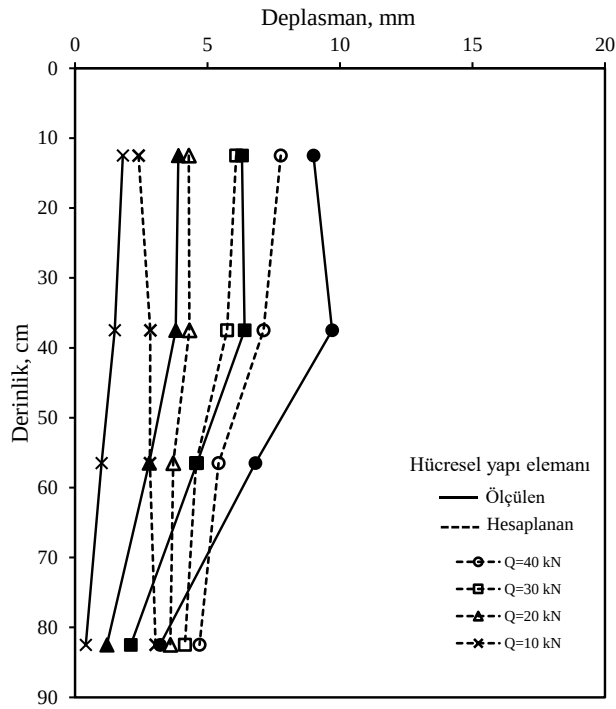
Çizelge 7.7. Duvar derinliğince uygulanan yüklere göre tahmin edilen k değerleri

Derinlik, z (m)	Konfigürasyon	Başlangıç rijitliği, k (kN/m ³)			
		k ₁₀ kN	k ₂₀ kN	k ₃₀ kN	k ₄₀ kN
0.125	1x2	30400	31250	32120	33000
0.375	1x3	34350	34900	35500	36000
0.625	1x4	48500	48800	49200	49550
0.875	1x5	62600	62900	63150	63650

Model duvar ön yüzünde meydana gelen yanal deplasmanlar, uygulanan düşey gerilmeler altında ve tahmin edilen başlangıç rijitliği değerleri kullanılarak Eşitlik 7.20 yardımı ile belirlenmiştir. Hesaplanan yanal deplasmanların uygulanan yüke göre derinlikle değişimi Çizelge 7.8’ de verilmiştir. Sonuç olarak hücresele yapı elemanlı model duvar için çekme gerilmesi-deplasman ilişkilerinden elde edilen denklem (“Hücresele Yapı Elemanlarının Çekme Gerilmesi-Deplasman Davranışı Modeli” adlı bölümde Eşitlik 6.10’a veya Eşitlik 7.20’ e bakınız) ile hesaplanan yanal duvar hareketi deneysel olarak belirlenen duvar hareketleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 7.30). Şekilde Eşitlik 7.20 yardımı ile hesaplanan yanal duvar deplasmanlarının deneysel olarak elde edilen deplasmanlarla uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.8. Duvar derinliğince uygulanan yüklere göre hesaplanan yanal deplasmanlar

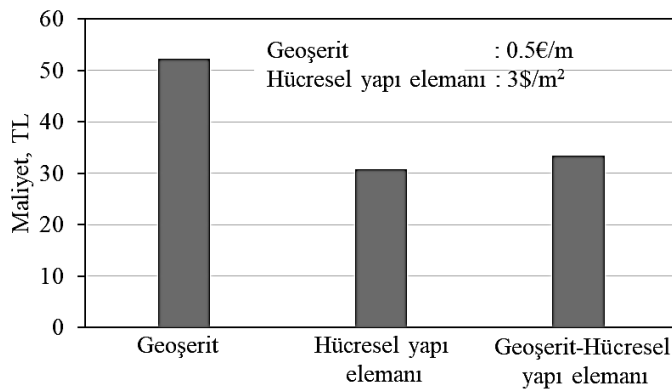
Derinlik, z (m)	Konfigürasyon	Hesaplanan deplasmanlar (mm)			
		S _{(maks)10} kN	S _{(maks)20} kN	S _{(maks)30} kN	S _{(maks)40} kN
0.125	1x2	2.39	4.29	6.08	7.76
0.375	1x3	2.84	4.31	5.74	7.12
0.625	1x3	2.82	3.70	4.56	5.42
0.875	1x5	3.04	3.60	4.15	4.70



Şekil 7.30. Ölçülen ve hesaplanan yanal duvar hareketleri

7.7. Maliyet Analizi

Boyutları 1x1 m olan ve farklı tür geosentetik donatı elemanlar kullanılarak oluşturulan model duvarlarda üzerinde bir maliyet analizi yapılmıştır. Bir metre kare donatılı duvar modelleri için Şekil 7.31 'de görüldüğü üzere güncel olarak piyasadan elde edilen fiyatlar üzerinde yapılan maliyet analizinde en ucuz maliyet hücreli yapı elemanlı model duvarda olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla hem yükler altında performansı hem de mali açıdan uygunluğu bakımından birlikte düşünülecek olursa hücreli yapı elemanlı duvarlar oldukça uygun çözüm sunmaktadır.



Şekil 7.31. Donatı türlerine göre oluşturulan 1 m² model duvarların maliyet analizi

7.8. Sonuçlar ve Bulgular

Bu alışma kapsamında laboratuvarda donatı elemanı olarak geoşerit, hücresel yapı elemanı ve geoşerit-hücresel yapı elemanı kullanılarak oluşturulan model duvar deneyi üzerinde şerit temel ile yükleme deneyleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Model duvar deneylerinde hem şerit temelin yapacağı oturmalar hem de yüklemeden dolayı oluşacak yanal duvar hareketleri dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda yapılan model deneylerinden elde edilen bulgular neticesinde temelde meydana gelen oturma miktarları hücresel yapı elemanlı model duvar deneylerinde daha düşük değerlerde olduğu grlmştir. Bu bakımdan hücresel yapı elemanlarının yük-oturma performansının daha iyi olduğu sonucuna varılabilir. Ancak yanal duvar hareketleri açısından incelediğimizde hücresel yapı elemanlı duvar modellerinde derinlikçe oluşan deplasmanların daha fazla olduğu görülmektedir. Geoşerit ve hücresel yapı elemanına ait malzeme çekme deney sonuçlarına göre, geoşerit malzemesinin hücresel yapı elemanına oranla çok daha rijit olduğu ve elastisite modülünün daha büyük olduğu açıkça görülmektedir (şekil 7.10). Dolayısıyla duvar model deneylerinde yüklemeden dolayı hücresel yapı elemanları çekme ve serbest bölgede geoşerit donatı elemanlarına göre daha fazla deformasyona uğramaktadır. Bu da hücresel yapı elemanları ile güçlendirilen model duvar deneylerinde daha fazla yanal hareketin oluşmasına sebep olmaktadır.

Yukarıda da belirtildiği gibi hücresel yapı elemanlı duvar modellerinin geoşerit donatılı duvar modellerine göre yük-oturma performansının iyi fakat yanal duvar hareketleri performansının kötü olduğu belirlenmiştir. Hem yük-oturma hem de yanal duvar hareketi performansı açısından geoşerit-hücresel yapı elemanlı duvar modelleri diğerlerine göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla bu çalışma neticesinde oluşan sonuca göre çekme bölgesinde hücresel yapı elemanı serbest bölgede ise geoşerit kullanılarak oluşturulan duvar modellerinin daha iyi performans gösterdiği açık bir şekilde görülmektedir. Sonuç olarak malzeme rijitliğinin yanal duvar hareketini, malzeme şeklinin ve yapısının da yük-oturma performansını etkilediği söylenebilir. Bu doğrultuda geosentetik donatılı istinat duvarı tasarımında yük-oturma kriteri için yük-oturma performansı daha iyi olan malzeme, yanal duvar hareketi kriteri için ise donatı elemanı daha rijit olan malzeme kullanılmalıdır. Geosentetik donatılı istinat duvarlarında hem çekme hem de serbest bölgede farklı malzemeler kullanılarak duvar performansının artırılacağı grlmştir. Bu şekilde

oluşturulan istinat duvarlarının hem davranış özellikleri iyileştirilmiş olacak hem de maliyet açısından daha ekonomik tasarımlar yapılabilecektir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, zemin ortamında çekme yüklerine maruz kalan hücresel yapı elemanlarının sürtünme davranışları laboratuvarında yapılan toplam 55 adet çekme deneyleri ile belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, 10.12, 18.10 ve 31.40 kPa düşey gerilme altında boyutları (uzunluk, genişlik ve yükseklik) ve yerleşim konfigürasyonları farklı olan hücresel yapı elemanları kullanılmıştır. Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri eleman boyutlarına, yerleşim konfigürasyonuna ve rijitliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla toplam 55 adet yapılan çekme deneyleri sonunda hücresel yapı elemanların çekme kapasiteleri düşey gerilmeye, eleman boyutlarına, elemanların yerleşim konfigürasyonlarına ve eleman rijitliğine bağlı değişimleri incelenmiş ve elde edilen bulgular aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- Tüm deney numunelerinin çekme kuvveti-deplasman eğrilerinde, çekme kuvveti değeri belirgin bir pik değer göstermemiştir. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemelerden üretilen hücresel yapı elemanlarının rijitliği düşük olduğu için maksimum çekme kuvveti pik davranış göstermemiştir.
- Aynı eleman boyutlarına sahip deney numunelerinin çekme kapasiteleri artan düşey gerilme ile artmaktadır. Düşey gerilmenin artması ile artan sürtünme ve pasif dirençlerin çekme kuvvetinin de artmasına neden olduğu görülmüştür.
- Aynı hücre genişliğine sahip fakat eleman boyları farklı olan numunelerin çekme kapasiteleri artan eleman boyu ile artmaktadır. Fakat eleman boyu 510 mm ve daha uzun olan hücresel yapı elemanlarında malzeme çekme dayanımına ulaştığı için çekme kapasitelerinde değişim gözlenmemiştir. Dolayısıyla malzeme çekme dayanımı çekme kapasitesi üzerinde etkisi oldukça önemli olduğu görülmüştür.
- Aynı eleman boylarına sahip hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri artan eleman genişliği ile artmaktadır. Çekme kapasitesindeki bu artışlar, eleman boyunun çekme kuvvetine etkisine benzer olarak artan sürtünme ve pasif direnç alanlarının etkisi ile oluşmaktadır.
- Aynı konfigürasyonlara sahip tüm deney numunelerinde, artan eleman yüksekliği ile elemanlar üzerinde oluşan sürtünme ve pasif direnç alanları da artıracığından çekme kapasiteleri de artmaktadır.

- Çekme kapasitesi düşük düzey gerilmeler altında eleman boyunca çekme yönündeki hücre sayısı üçten fazla olduğu durumlarda değişmemektedir. Bu durum yüksek düzey gerilmeler altında gözlenmiş ve elemanlar üzerinde kopmalar ve aşırı deformasyonlardan kaynaklı akmalar meydana gelmiştir.
- Aynı hücre sayısına eşit fakat eleman boyu yüksek olan deney numunelerinin çekme kapasitelerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri büyük ölçüde eleman boyuna bağlı olarak değişmektedir.
- Aynı deney koşulları altında ve aynı numune boyutlarında hazırlanan fakat iki farklı eleman rijitliğine sahip olan hücresel yapı elemanlarının çekme kuvveti-deplasman ilişkileri farklı olmaktadır. Rijitliği yüksek olan deney elemanları pik çekme kuvvetlerine rijitliği düşük olan deney elemanlarına göre daha düşük deplasman değerlerinde ulaştığı görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, çekme yüklerine maruz kalan hücresel yapı elemanları ile yapılacak donatılı yapı tasarımlarında pratik amaçlar doğrultusunda, çekme kapasiteleri ve hücresel yapı elemanları üzerinde oluşan çekme kuvvetleri teorik olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda geliştirilen teorik denklem yardımı ile hesaplanan çekme kapasitesi deneysel olarak ölçülen çekme kapasitesi ile karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- Çekme deney düzeneği, kullanılan ölçüm cihazları (gerinim pulları, yük hücreleri, deplasman ölçerler vb.) ile hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen sürtünme ve pasif dirençler belirlenmiştir.
- Hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen sürtünme direnci kutu ön yüzüne yakın bölgelerde yüksek değerlere ulaşmakta olup eleman boyunca göreceli olarak azalmaktadır.
- Hücresel yapı elemanlarının çekme kapasiteleri hücresel yapı elemanına ait malzeme çekme dayanımına bağlı olduğu belirlenmiştir. Bu bakımdan teorik olarak hesaplanan çekme kapasitesi, malzemenin çekme dayanımını aşamayacak şekilde sınırlandırılmıştır.

- Geliştirilen teorik denklem yardımı ile hesaplanan çekme kapasiteleri ile deneysel olarak ölçülen çekme kapasiteleri karşılaştırılmış ve geliştirilen teorik denklemlerin oldukça uyumlu sonuç verdiği görülmüştür. Bu bakımdan çekme yüklerine maruz kalan hücresel yapı elemanları için geliştirilen teorik denklemin faydalı olacağı düşünülmektedir.

Ayrıca bu çalışma kapsamında, hücresel yapı elemanları ile zemin arasındaki sürtünme davranışını modelleyebilmek ve genelleştirilebilecek şekilde ifade edebilmek amacıyla, çekme gerilmesi- deplasmanı ilişkileri kullanılarak bir ara yüzey sürtünme davranışı modeli geliştirilmiştir. Zemin ortamı ile hücresel yapı elemanı arasındaki ara yüzey etkileşim mekanizması ile hücresel yapı elemanı üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri, birim deformasyonlar yardımı ile belirlenmiştir. Belirlenen çekme gerilmeleri maksimum değerlerine deney kutusu önyüzüne yakın bölgelerde ulaşmıştır. Maksimum çekme gerilmeleri eleman boyutları ve düşey gerilmenin artması ile artmıştır.

Çekme gerilmesi- deplasmanı grafiklerinden elde edilen maksimum çekme gerilmeleri ve maksimum çekme gerilmesi düzeyindeki deplasmanlar hücresel yapı deney elemanı boyutları ile zemin ortamına uygulanan düşey gerilmeye bağlı olarak önemli bir şekilde farklılık göstermektedir. Maksimum çekme gerilmesi ve deplasman değerlerinin hesaplanabilmesi için analitik olarak bağıntılar geliştirilmiş ve geliştirilen bağıntılar kullanılarak hesaplanan değerler ile deneysel olarak ölçülen değerler karşılaştırılmıştır. Hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen maksimum çekme gerilmesi ve deplasman değerlerinin birbirleri ile uyumlu oldukları görülmüştür. Sonuç olarak zemin ortamına gömülü hücresel yapı elemanlarının çekme gerilmesi-deplasmanı davranışı genelleştirilmiş ve tasarımcılar tarafından kullanılabilir genel bir ara yüzey sürtünme davranışı modeli önerilmiştir. Önerilen ara yüzey sürtünme davranışı modeli, hücresel yapı elemanlarının boyutlarına (genişlik, yükseklik ve boy), rijitliğine ve uygulanan düşey gerilmeye bağlı olarak geliştirilmiştir. Bu nedenle geliştirilen modelin zemin özelliklerinden bağımsız olarak sadece hücresel yapı elemanı özelliklerine ve uygulanan düşey gerilmeye bağlı olarak uygun çözümler sunacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu modelinin tasarım aşamasında ve sonlu eleman modellemelerinde kullanılabileceği ve literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Son olarak çekme kapasiteleri ve ara yüzey sürtünme davranışı belirlenen hücresel yapı elemanlarının bir istinat duvarı üzerinde donatı elemanı olarak performansının belirlenmesi

amacıyla laboratuvarında model duvar deneyleri yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında hücresel yapı elemanının performansı, model duvar üzerinde geoşerit ve geoşerit-hücresel yapı elemanları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Tasarlanan model duvar düzenekleri üzerinde şerit temel ile yükleme deneyleri yapılarak elde edilen bulgular tartışılmıştır. Model duvar deneylerinde şerit temel üzerine yapılan yüklemeler sonucu temelde meydana gelen oturmalar ve duvar yüzeyinde oluşan yanal hareketler kullanılan donatı elemanlarına göre karşılaştırılmıştır. Model duvar deneylerine göre şerit temelde meydana gelen oturma miktarları hücresel yapı elemanlı model duvar deneylerinde daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Bu bakımdan hücresel yapı elemanların yük-oturma performansının daha iyi olduğu sonucuna varılabilir. Fakat yanal duvar hareketlerini incelediğimizde hücresel yapı elemanlı duvar modellerinde derinlikçe oluşan deplasmanların daha fazla olduğu belirlenmiştir. Malzeme çekme dayanımına göre daha rijit olan geoşerit donatılı model duvar deneyinde yanal duvar hareketi hücresel yapı elemanına göre daha düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir. Bu durum yüklemeden dolayı hücresel yapı elemanlarının çekme ve serbest bölgede geoşerit donatı elemanlarına göre daha fazla deformasyona uğramasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak hücresel yapı elemanlı duvar modellerinin geoşerit donatılı duvar modellerine göre yük-oturma performansının iyi fakat yanal duvar hareketleri açısından performansının kötü olduğu belirlenmiştir.

Geoşerit-hücresel yapı elemanlı duvar modellerinde ise hem yük-oturma hem de yanal duvar hareketi açısından diğerlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla çekme bölgesinde çekme kapasitesi yüksek olan hücresel yapı elemanı, serbest bölgede ise çekme dayanımı yüksek olan geoşerit donatı elemanı kullanılarak oluşturulan duvar modellerinin daha iyi performans gösterdiği açık bir şekilde görülmüştür. Sonuç olarak kullanılan donatı elemanı rijitliğinin yanal duvar hareketini, donatı elemanı şeklinin ve yapısının da yük-oturma performansını etkilediği görülmüştür. Bu doğrultuda geosentetik donatılı istinat duvarlarında hem çekme hem de serbest bölgede farklı donatı elemanları kullanılarak duvar performansının iyileştirileceği görülmüştür. Bu şekilde tasarlanan geosentetik donatılı istinat duvarları davranış özellikleri ve maliyet açısından uygun çözümler sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdel-Rahman, A.H., Ibrahim, M.A., Ashmawy, A.K. (2007). Utilization of a large-scale testing apparatus in investigating and formulating the soil/geogrid interface characteristics in reinforced soils. *Australian Journal of Basic Applied Science*, 1 (4), 415–430.
- Abdi, M.R., Zandieh, A.R. (2014). Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material. *Geotextiles and Geomembranes*. 42(5), 494-504.
- Abu-Hejleh, N., Wang, T., Zornberg, J.G.. (2000). Performance of geosyntheticreinforced walls supporting bridge and approaching roadway structures. *In: ASCE Geotechnical Special Publication No. 103*. ASCE, Reston, VA, United States, 218-243.
- Adams, M.T. (1997). Performance of prestrained geosynthetic reinforced soil bridge piers. *Mechanically Stabilized Backfill*. A.A. Balkema Publisher, Rotterdam, 35-53.
- Allen, T. M., Christopher, B. R., and Holtz, R. D. (1992). *Performance of a 12.6 m high geotextile wall in Seattle, Washington*. Paper presented at the Proceedings International Symposium on Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 81–100.
- Alfaro, M.C., Hayashi, S., Miura, N., Watanabe, K. (1995a). Pullout interaction mechanism of geogrid strip reinforcement. *Geosynthetics International*. 2(4), 679–698.
- Alfaro, M.C., Pathak, Y.P., 2005. Dilatant stresses at the interface of granular fills and geogrid strip reinforcements. *Geosynthetics International*, 12 (5), 239–252.
- Al-Qadi, I. L., Dessouky, S. H., Kwon, J., and Tutumluer, E. (2008). Geogrid in flexible pavements: Validated mechanism, *Transportation Research Board*, Washington, DC, 102–109.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2016). *Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table*. ASTM D4254–16.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2001). *Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil*. ASTM D6706-01.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2011). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM D2487–11.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM D854–14.

- Bergado, D.T., Chai, J.C. (1994). Pullout force–displacement relationship of extensible grid reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*, 13(5), 295–316.
- Bergado, D.T., Chai, J.C., Miura, N. (1996). Prediction of pullout resistance and pullout forcedisplacement relationship for inextensible grid reinforcements. *Soils and Foundations*, 36 (4), 11-22.
- Bergado, D.T., Teerawattanasuk, C. (2001). Analytical models for predicting the pullout capacity and interaction between hexagonal wire mesh and silty sand backfill. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 4(4), 227–238.
- Bolt, A.F., Duszynska, A. (2000). *Pull-out testing of geogrid reinforcement*. Paper presented at the Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference-EUROGEO 2000, Bologna, Italy, 939–943.
- Cancelli, A., Rimoldi, A., Montanelli, F. (1993). Index and performance tests for geocells in different applications. *Geosynth. Soil Test. Proced. ASTM STP 1190*, 64–75.
- Chen, H.-T., Hung, W.-Y., Chang, C.-C., Chen, Y.-J., Lee, C.-J. (2007). Centrifuge modeling test of a geotextile-reinforced wall with a very wet clayey backfill. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (6), 346–359.
- Chang, J.C., Hannon, J.B., Forsyth, R.A. (1977). Pullout Resistance and Interaction of Earthwork Reinforcement and Soil. *Transportation Research Record*, National Research Council, Washington, DC, 1–7.
- Chang, D.T.T., Chang, F.C., Yang, G.S., Yan, C.Y. (2000). The influence factors study for geogrid pullout test. In: *Stevenson, P.E. (Ed.), Grips, Clamps, Clamping Techniques, and Strain Measurement for Testing of Geosynthetics, ASTM STP 1379*. American Society for Testing and Materials, 129–142.
- Cuelho, E.V. (1998). *Determination of Geosynthetic Constitutive Parameters and Soil/Geosynthetic Interactions by In-Air and In-Soil Experiments*, MS Thesis. Montana State University, MT.
- Das, B.M. (2007). *Principles of Foundation Engineering*, sixth ed. PWS; Pacific Grove, California.
- Dyer, M.R. (1985). *Observations of the stress distribution in crushed glass with applications to soil reinforcement*. D.Phil. Thesis, University of Oxford, Oxford, UK.
- El Sawwaf, M.A. (2007). Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (1), 50-60.
- Elias, V., Christopher, B. R., and Berg, R. R. (2001). *Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes—design and construction guidelines*. FHWA-NHI-00-043, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

- Ezzein, Fawzy M., Bathurst, Richard J. (2014). A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(3), 246–255
- Fannin, R.J., Raju, D.M. (1993). On the pullout resistance of geosynthetics. *Canadian Geotechnical Journal*, 30 (3), 409–417.
- Farrag, K., Acar, Y.B., Juran, I. (1993). Pull-out resistance of geogrid reinforcements. *Geotextiles and Geomembranes*, 12 (2), 133–159.
- Giroud, J. P., and Han, J. (2004a). Design method for geogrid-reinforced unpaved roads—II: Calibration and verification. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 787–797.
- Giroud, J. P., and Han, J. (2004b). Design method for geogrid-reinforced unpaved roads—Part I: Theoretical development. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 776–786.
- Han, B., Ling, J., Shu, X., Gong, H., Huang, B. (2018b). Laboratory investigation of particle size effects on the shear behavior of aggregate-geogrid interface. *Construction and Buildings Materials*, 158, 1015–1025.
- Han X., Kiyota T., Tatsuoka F. (2013). Interaction mechanism between geocell reinforcement and gravelly soil by pullout tests. *Institute of Industrial Science, University of Tokyo*, Bulletin of ERS, No. 46.
- Han, Xinye. (2014). *Development of a New Type of Geocell as Tensile Reinforcement for GRS RWs*, Doctor of Philosophy, Department of Civil Engineering University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- Hanumasagar, S.S., Roodi, G.H., Zornberg, J.G. (2014). *Pullout characterization of geogrids embedded in blends of dredged material and steel slag fines*. Paper presented at the Proceedings of the 10th ICG Conference, Berlin, Germany.
- Haussner, C., Kiyota, T., Xu, Z. (2016). *Effect of spacing of transverse members on pullout resistance of a square-shaped geocell embedded in sandy and gravelly backfill materials*. Paper presented at the The 6th Japan-Korea Geotechnical Workshop. 109-114.
- Hayashi, S., Alfaro, M. C. & Watanabe, K. (1996). *Dilatancy effects of granular soil on the pullout resistance of strip reinforcement*. Paper presented at the Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, Fukuoka, pp. 39–44.
- Hayashi, S., Shahu, J. T. & Watanabe, K. (1999). Changes in interface stresses during pullout tests on geogrid strip reinforcement. *Geotechnical Testing Journal*, 32, 32–38.
- Holtz, R.D, Kovacs, W.D., Sheahan, C.T.(2015). *An Introduction to Geotechnical Engineering*, 2nd Edition, Pearson Co., Upper Saddle River, NJ.

- Horpibulsuk, S., Niramitkornburee, A. (2010). Pullout resistance of bearing reinforcement embedded in sand. *Soils and Foundations*, 50 (2), 215-226.
- Ingold, T.S. (1982). *Reinforced earth*, Thomas Telford, Inc., London.
- Isik, A., Gurbuz, A. (2018). *Assessment of behavior of soil-geocell pullout capacity*. Paper presented at the 11th International Conference on Geosynthetics, 16-21 September, Seoul, Korea.
- Isik, A., Gurbuz, A. (2020). Pullout behavior of geocell reinforcement in cohesionless soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(1), 71-81.
- Isik, A., Gurbuz, A., Anil, O. (2020). Assessment of soil-geocell interaction behavior by laboratory pullout tests. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 27-38.
- Jayawickrama, P.W., Lawson, W.D., Wood, T.A., Surles, J.G. (2014). *Pullout behavior of welded grid reinforcements embedded in coarse granular backfill*. Paper presented at the ASCE Geo-Congress, Atlanta, GA, February 2014.
- Jewell, R., Milligan, G., Dubois, D. (1984). *Interaction between soil and geogrids*. In Polymer Grid Reinforcement, Ford, S. H., Editor, Thomas Telford Publishing, London, UK, 18–30.
- Jewell, R.A. (1996). Soil reinforcement with geotextiles. *Ciria Special Publication*, 123, Thomas Telford Ltd., UK, 332.
- Jewell, R.A. (1990). Reinforcement bond capacity. *Geotechnique*, 40 (3), 513–518.
- Jewell, R.A., Milligan, G.W.E., Sarsby, R.W., Dubois, D. (1985). *Interaction between Soil and Geogrids*. Paper presented at the Proceedings of Conference on Polymer Grid Reinforcement, London, 18–29.
- Khedkar, M.S., Mandal, J.N. (2009). Pullout behaviour of cellular reinforcements. *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (4), 262–271.
- Kiyota, T., Soma, R., Munoz, H., Kuroda, T., Ohta, J., Harata, M., and Tatsuoka, F. (2009). Pullout behaviour of geo-cell placed as reinforcement in backfill, *Geosynthetics Engineering Journal*, 24(0), 75-82.
- Koerner, R.M., Wayne, M.H., and Carroll, R.G., Jr. (1989). *Analytic Behavior of Geogrid Anchorage*. Paper presented at the Proceedings of the Geosynthetics'89 Conference, San Diego, CA, IFAI, 525–536.
- Koerner, J., Soong, T.-Y., Koerner, R.M. (1998). *Earth Retaining Wall Costs in the USA*. Geosynthetic Institute, Folsom, PA.
- Koerner, R.M. (2005). *Designing with Geosynthetics*, 5th edition, Pearson Prentice Hall.

- Ladeira, M.A.S.A. (1995). *Estudo dos Fenômenos de Interação Solo-Geossintético Através de Ensaio de Arranque*. (In Portuguese), MS Thesis, University of Porto, Portugal.
- Lee, K.L., Adams, B.D., Vagneron, J.M.J. (1973). Reinforced earth retaining walls. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE 99(SM10), 745–764.
- Leshchinsky, D., Kaliakin, V., Bose, P., & Collin, J. (1994). Failure Mechanism in Geogrid-Reinforced Segmental walls: Experimental Implications. *Soils & Foundations, Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 34(4):33-41.
- Leshchinsky, B. (2014). Limit analysis optimization of design factors for mechanically stabilized earth wall-supported footings. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1, 111-128.
- Lin, Y.L., Li, X.X., Zhang, M.X. (2014). Effect of reinforcement form on the pullout resistance of reinforced sand. *Ground Improvement and Geosynthetics*, GSP238, 380–388.
- Lopes, M. L. C. (1992). *Walls Reinforced with Geosynthetics*, Ph.D. Thesis, University of Porto, Porto, PT.
- Lopes, M.L., Ladeira, M. (1996). Role of specimen geometry, soil height and sleeve length on the pull-out behaviour of geogrids. *Geosynthetics International*, 3 (6), 701–719.
- Lopes, M.J., Lopes, M.L. (1999). Soil-geosynthetic interaction—influence of soil particle size and geosynthetic structure. *Geosynthetics International*, 6 (4), 261–282.
- Manju G. S. ve Latha G.M. (2013). *Interfacial friction properties of geocell reinforced sand*. Paper presented at the Proceedings of International Conference on Energy and Environment, 25-31.
- Marques, J.M.M.C. (2005). In: Onate, E., Owen, D.R. (Eds.), *Finite Element Modelling of the Pull-Out Test of Geosynthetics*. Paper presented at the VIII International Conference on Computation Plasticity.
- Mehrjardi, G.T., Motarjemi, F. (2018). Interfacial properties of geocell-reinforced granular soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 46 (4), 384-395.
- Meyer, N., Nernheim, A., Emersleben, A. (2003). *Influence of normal pressure, soil density and types of geogrids on soil-geogrid interaction coefficient*. Paper presented at the E-conference "Modern Trends in Foundation Engineering: Geotechnical Challenges and Solutions. IITM, India.
- Milligan, G. W. E., Tei, K. (1998). The pull-out resistance of soil nails. *Soils and Foundations*, 38(2), 179–190.
- Mitchell, J.K. and Christopher, B.R. (1990). *North American Practice in Reinforced Soil Systems*. Paper presented at the Proceedings of the ASCE Conference on Design and

- Performance of Earth Retaining Structures. Lambe, P.C. and Hansen, L.A., Editors, Cornell University, Ithaca, New York, 322-346.
- Mohidin, N. & Alfaro, M., C. (2011). *Soil-geocell reinforcement interaction by pullout and direct shear tests*, Paper presented at the 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, Toronto, Ontario, Canada.
- Moraci, N. and Gioffre, D. (2006). A Simple Method to Evaluate the Pullout Resistance of Embedded in a Compacted Granular Soil Extruded Geogrids. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 24, No. 2, 116–128.
- Moracia, N., Recalcatti, P. (2006). Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 24 (4), 220-242.
- Morsy, A.M., Leshchinsky, D., and Zornberg, J.G. (2017a). *Effect of Reinforcement Spacing on the Behavior of Geosynthetic-Reinforced Soil*, Paper presented at the In Proceedings of Geotechnical Frontiers 2017, American Society of Civil Engineers (ASCE), March 12-15, Orlando, Florida, USA, 112-125.
- Morsy, A.M; Zornberg, J.G., Han.J., Leshchinsky, D. (2019). A new generation of soil-geosynthetic interaction experimentation. *Geotextiles and Geomembrane*, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.04.001>.
- Moraci, N., Gioffre, D. (2006). A simple method to evaluate the pullout resistance of embedded in a compacted granular soil extruded geogrids. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(2), 116–128.
- Mosallanezhad, M., Taghavi, S. H. S., Hataf, N., and Alfaro, M. C. (2016). Experimental and numerical studies of the performance of the new reinforcement system under pull-out conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(1), 70–80.
- Ochiai, H., Otani, J., Hayashi, S., Hirai, T. (1996). The pull-out resistance of geogrids in reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 14(1), 19–42.
- O'Rourke, T. D., Druschel, S. J., Netravali, A. N. (1990). Shear strength characteristics of sand-polymer interfaces. *J. Geotech. Eng.*, 116 (3), 451–469.
- Palmeira, E. M. (1987). *The study of soil reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests*. Doktora Tezi
- Palmeira, E.M., Milligan, G.W.E. (1989). Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand. *Geotechnique*, 39 (3), 511–524.
- Palmeira, E.M. (2004). Bearing force mobilisation in pull-out tests on geogrids. *Geotextiles and Geomembranes*, 22 (6), 481–509.
- Palmeira, E.M. (2009). Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 368-390.

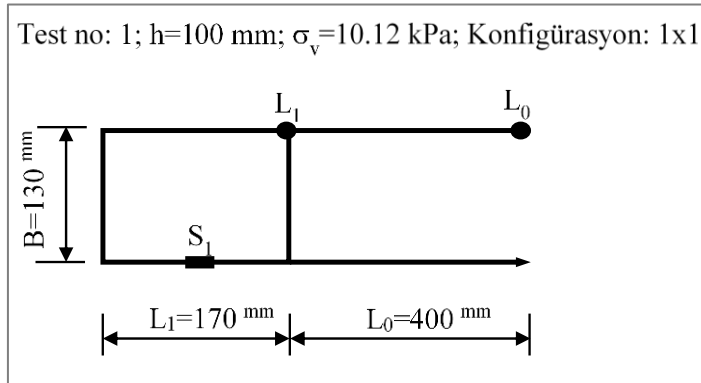
- Perkins, S.W., Cuelho, E.V. (1999). Soil–geosynthetic interface strength and stiffness relationships from pullout tests. *Geosynthetics International*, 6 (5), 321–346.
- Perkins, S. W. (2002). *Evaluation of geosynthetic reinforced flexible pavement systems using two pavement test facilities*. Rep. FHWA/MT-02-008/20040, Montana DOT, Helena, MT.
- Pokharel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L., Halahm, I. (2010). Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (6), 570e578.
- Raju, D.M. (1995). *Monotonic and Cyclic Pullout Resistance of Geosynthetic*. Ph.D. thesis, University of British Columbia, Canada
- Roodi, G. H., and Zornberg, J. G. (2012). *Effect of geosynthetic reinforcements on mitigation of environmentally induced cracks in pavements*. Paper presented at the 5th European Geosynthetics Congress, R. B. Servicios Editoriales, Spain, 611–616.
- Roodi, G. H. (2016). *Analytical, experimental, and field evaluations of soil-geosynthetic interaction under small displacements*. Ph.D.dissertation, Univ. of Texas, Austin, TX.
- Roodi, G.H., Zornberg, J.G. (2017). Stiffness of soil-geosynthetic composite under small displacements. II: experimental evaluation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143 (10) ASCE.
- Roodi, G. H., Morsy, A. M., and Zornberg J. G. (2018). Soil–Geosynthetic Interface Shear in Different Testing Scales. *Transportation Research Record*, 2672(52), 29-141.
- Shen, P., Han, J., Zornberg, J.G., Morsy, A.M., Leshchinsky, D., Tanyu, B.F., Xu, C., June, (2019). Two- and three-dimensional numerical analyses of geosynthetic-reinforced soil (GRS) piers. *Geotextiles and Geomembranes*, 47 (3), 352–368.
- Shekarian, S., Ghanbari, A., Farhadi, A. (2008). New seismic parameters in the analysis of retaining walls with reinforced backfill. *Geotextiles and Geomembranes*, 26 (4), 350–356.
- Sugimoto, M., Alagiyawanna, A.M.N., Kadoguchi, K. (2001). Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 19 (5), 257–277.
- Sugimoto, M., Alagiyawanna, A.M.N. (2003). Pullout behavior of geogrid by test and numerical analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(4), 361–371.
- Stadler, A.T. (2001). *Geogrid Reinforcement of Piedmont Residual Soil*. Report No. HWY-2001-02. North Carolina Department of Transportation, Raleigh, NC.
- Taghavi, S.H., Mosallanezhad, M. (2017). Experimental analysis of large-scale pullout tests conducted on polyester anchored geogrid reinforcement systems. *Canadian Geotechnical Journal*, 54 (5), 621-630.

- Tatliso, N., Edil, T.B., Benson, C.H. (1998). Interaction between reinforcing geosynthetics and soil–tire chip mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(11), 1109–1119.
- Teixeira, S.H.C. (2003). *Estudo da Interação Solo-Geogrelha em Testes de Arrancamento e a sua Aplicação na Análise e Dimensionamento de Maciços Reforçados. (In Portuguese)*. Ph.D. Thesis. School of Engineering, Univerity of São Paulo, São Carlos.
- Teixeira, S.H.C., Bueno, B.S. and Zornberg, J.G. (2007). Pullout Resistance of Individual Longitudinal and Transverse Geogrid Ribs. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, January, Vol. 133, No. 1, 37–50.
- Van Duijnen, P.G., Linthof, T., Brok, C.A.J.M., and Eekelen, S.J.M. (2012). *Measuring deformations of a 10 m high geosynthetic-reinforced earth retaining wall*. Paper presented at the Proceedings of the 5th European Geosynthetics Congress. Valencia, 2012. Proceedings Vol 5. Topic: Soil Improvement and Reinforcement, 157-161.
- Vangla, P., Latha Gali, M. (2016). Effect of particle size of sand and surface asperities of reinforcement on their interface shear behaviour. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), 254–268
- Wang, Z., Jacobs, F., Ziegler, M. (2016). Experimental and DEM investigation of geogridsoil interaction under pullout loads. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), 230–246.
- Wang, H.L., Chen, R.P., Liu, Q.W., Kang, X., and Wang, Y.W. (2019). Soil-geogrid interaction at various influencing factors by pullout tests with applications of FBG sensors. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(1), 04018342.
- Won, M.-S., Kim, Y.-S. (2007). Internal deformation behavior of geosynthetic-reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (6), 10–22.
- Yako, M.A., Christopher, B.R. (1988). *Polymerically Reinforced Retaining Walls and Slopes in North America*. In: Jarrett, P.M., McGown, A. (Eds.), *The Application of Polymeric Reinforcement in Soil Retaining Structures*. Kluwer Academic Publishers, Dordicht, 239–283.
- Yoo, C., Kim, S.B. (2008). Performance of a two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: full-scale load test and 3D finite element analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 26 (6), 460–472.
- Zhang, J., Yasufuku, N., Ochiai, H. (2007). A few considerations of pullout test characteristics of geogrid reinforced sand using DEM analysis. *Geosynthetic Engineering Journal*, 22,103-110.
- Zhang, M. X., Zhou, H., Javadi, A. A. and Wang, Z. W. (2008). Experimental and theoretical investigation of strength of soil reinforced with multi-layer horizontal – vertical orthogonal elements, *Geotextiles and Geomembranes*, 26(1), 1–13.

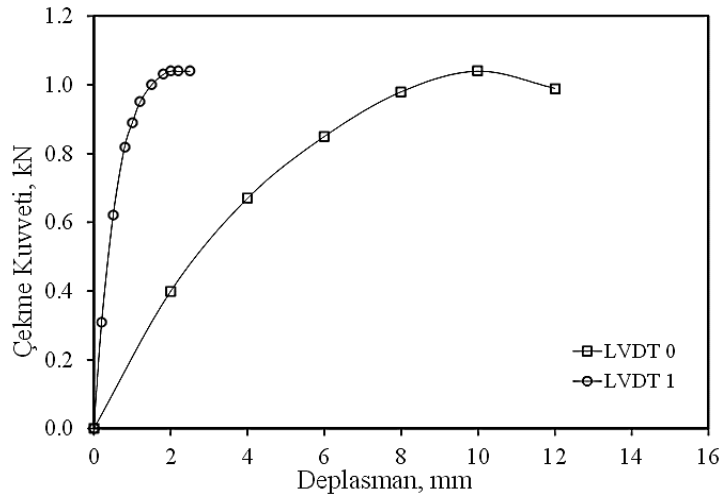
- Zhang, J., and Yasufuku, N. (2009). Evaluation of rainfall infiltration and compaction effect on soil-geogrid interaction behavior. *Geosynthetic Engineering Journal*, 24, 61–68
- Zhou, H., Wen, X. (2008). Model studies on geogrid- or geocell-reinforced sand cushion on soft soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 26, 231-238.
- Zornberg, J. G., Mitchell, J. K., and Sitar, N. (1997). Testing of reinforced soil slopes in a geotechnical centrifuge. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 20(4),470–480.
- Zornberg, J. G., and Arriaga, F. (2003). Strain distribution within geosynthetic-reinforced slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:1(32), 32–45.
- Zornberg, J.G., Ferreira, J.A.Z., Gupta, R.V., Joshi, R.V., Roodi, G.H. (2009). *Geosynthetic-Reinforced Unbound Base Courses: Quantification of the Reinforcement Benefits*. Center for Transportation Research (CTR), Report No. FHWA/TX-10/5-4829-1, Austin, Texas, December 2009. Revised February 2012, 170.
- Wilson-Fahmy, R.F., Koerner, R.M. (1993). Finite element modelling of soil-geogrid interaction with application to the behavior of geogrids in a pullout loading condition. *Geotextiles and Geomembranes*, 12, 479–501.
- Xiaoa, C., Han, J., Zhang, Z. (2016). Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 44 (1), 81-94.

EKLER

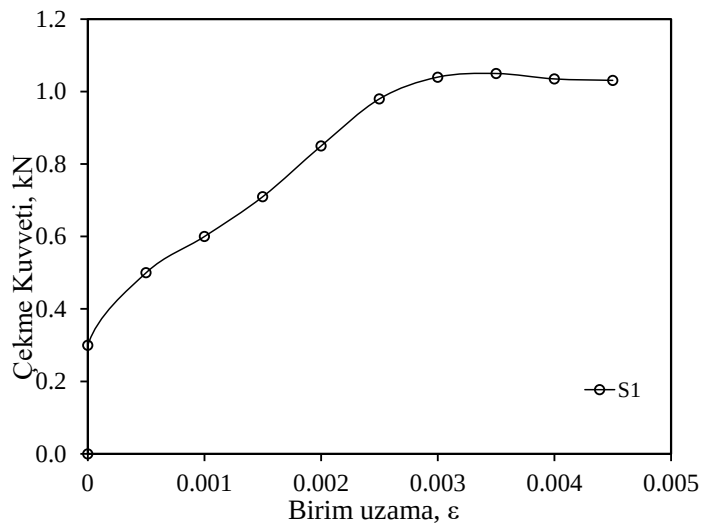
EK-1. Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.1. Test no: 1 deney elemanı için şematik gösterim

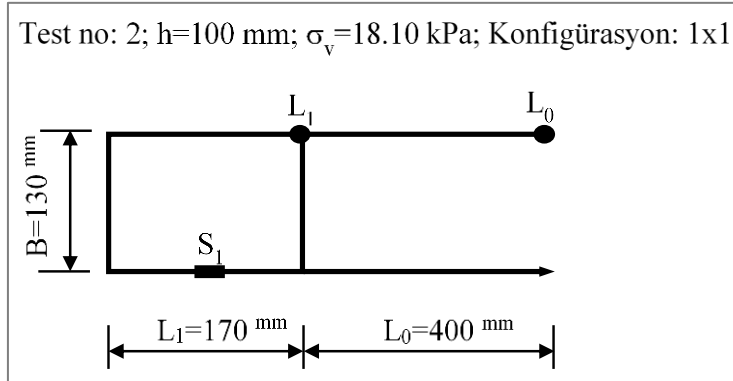


Şekil 1.2. Test no: 1 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

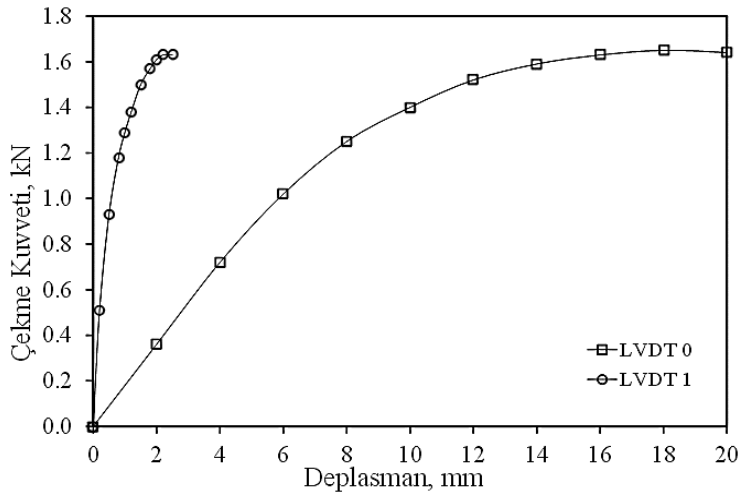


Şekil 1.3. Test no: 1 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

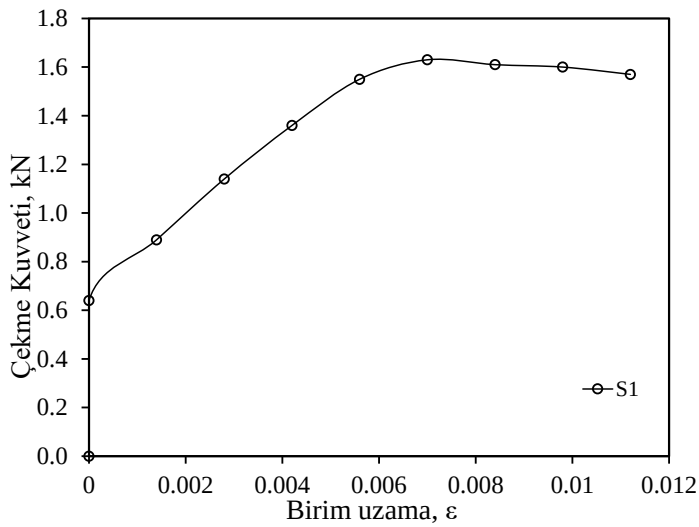
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.4. Test no: 2 deney elemanı için şematik gösterim

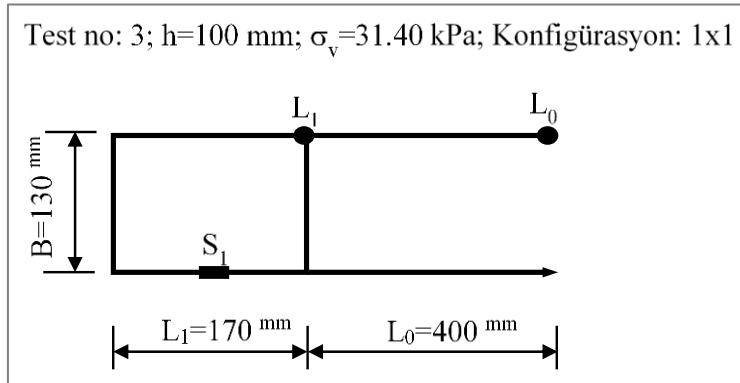


Şekil 1.5. Test no: 2 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

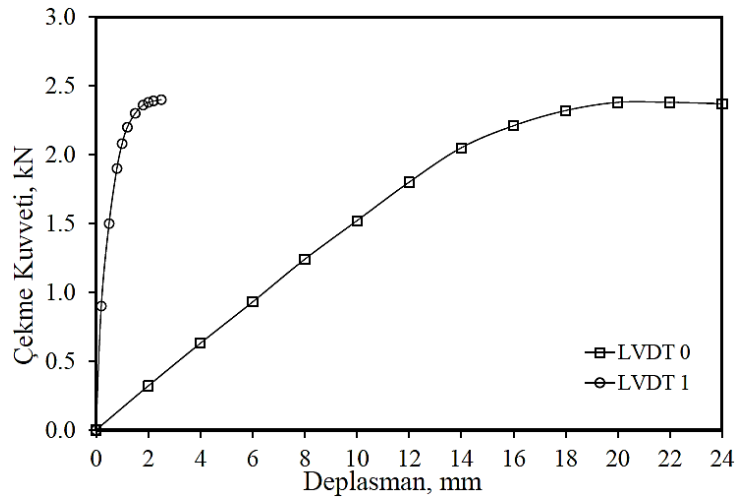


Şekil 1.6. Test no: 2 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

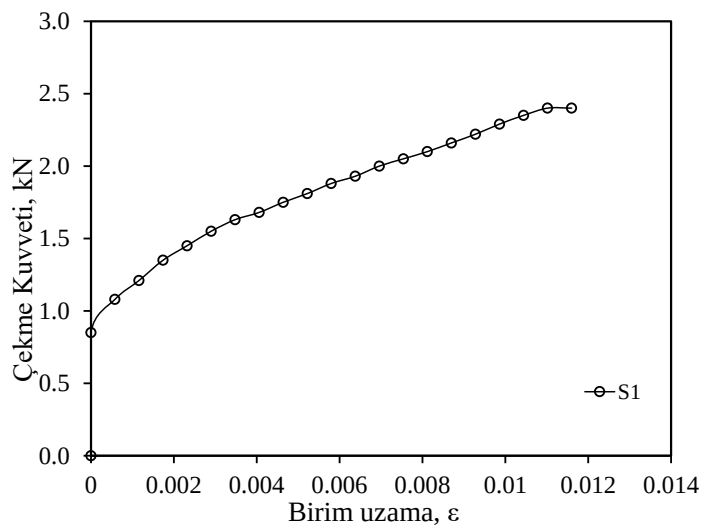
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.7. Test no: 3 deney elemanı için şematik gösterim

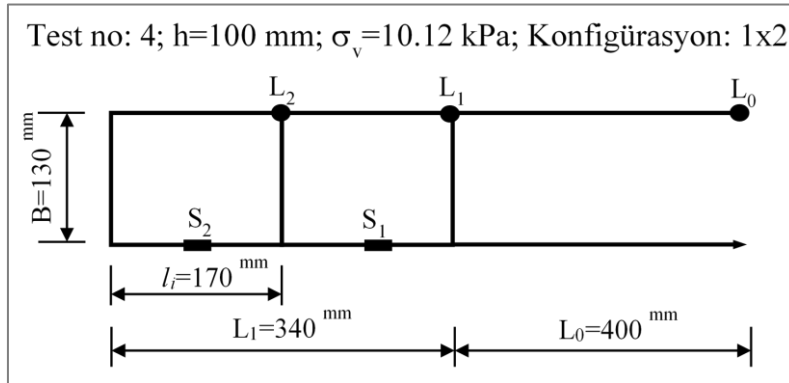


Şekil 1.8. Test no: 3 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

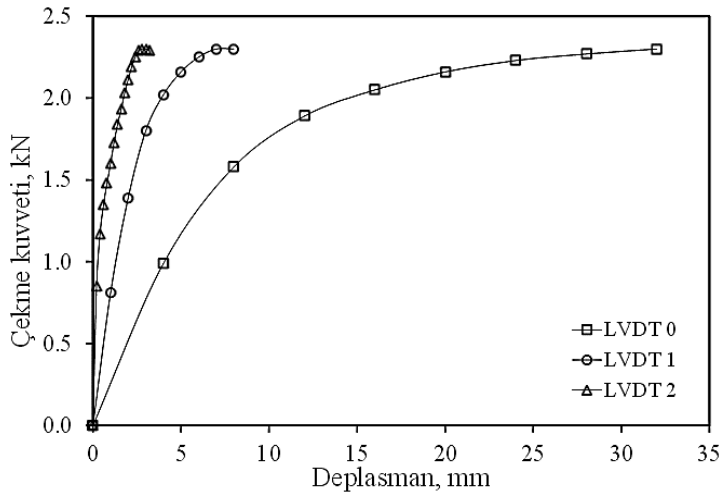


Şekil 1.9. Test no: 3 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

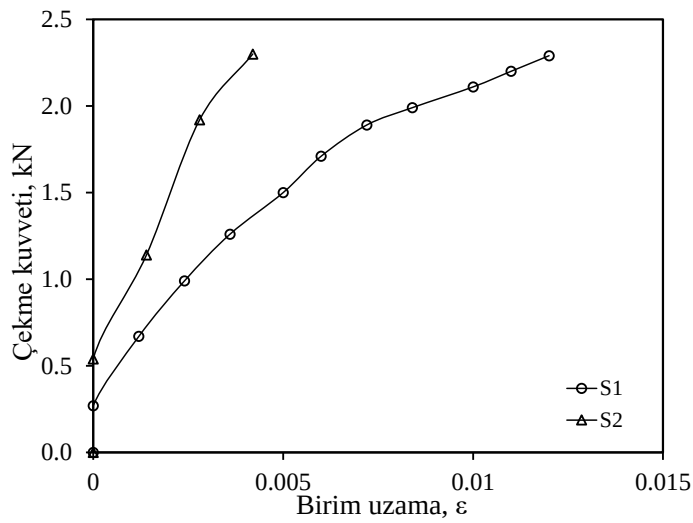
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.10. Test no: 4 deney elemanı için şematik gösterim

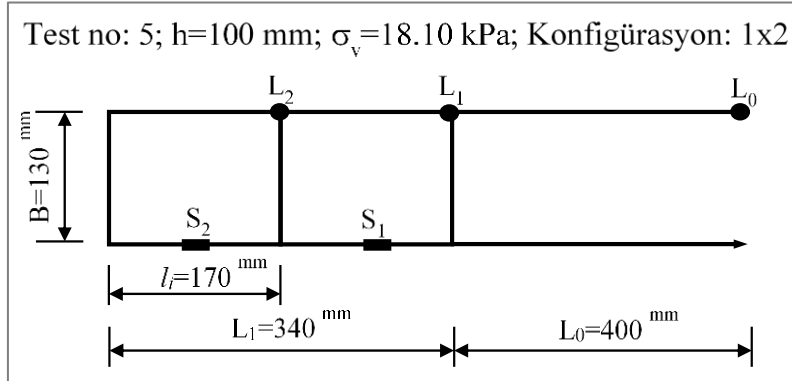


Şekil 1.11. Test no: 4 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

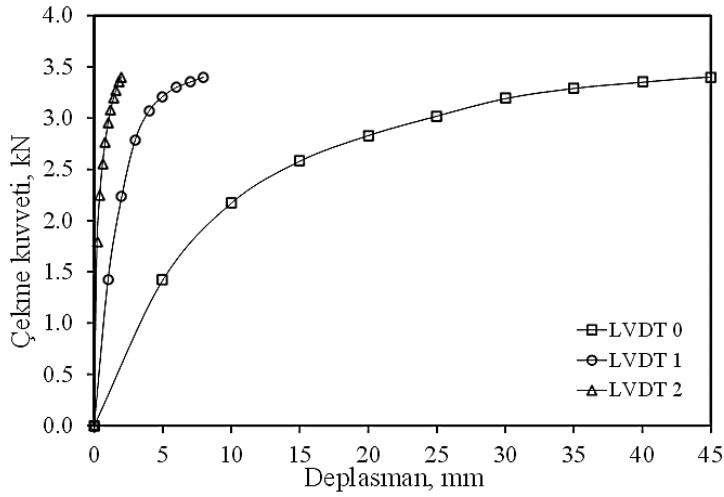


Şekil 1.12. Test no: 4 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

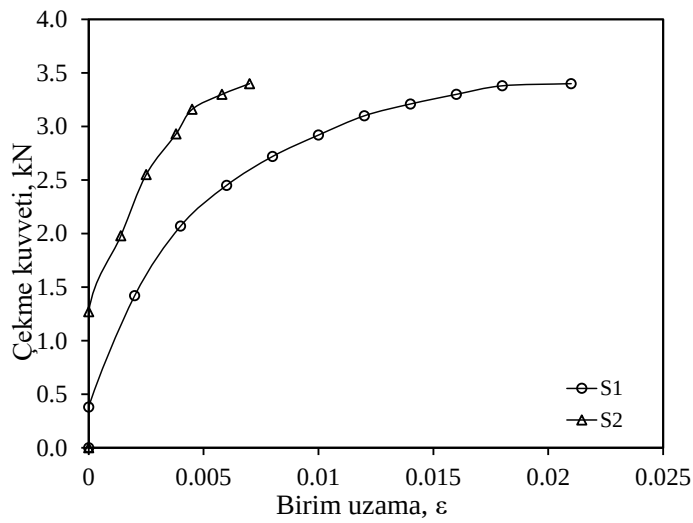
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.13. Test no: 5 deney elemanı için şematik gösterim

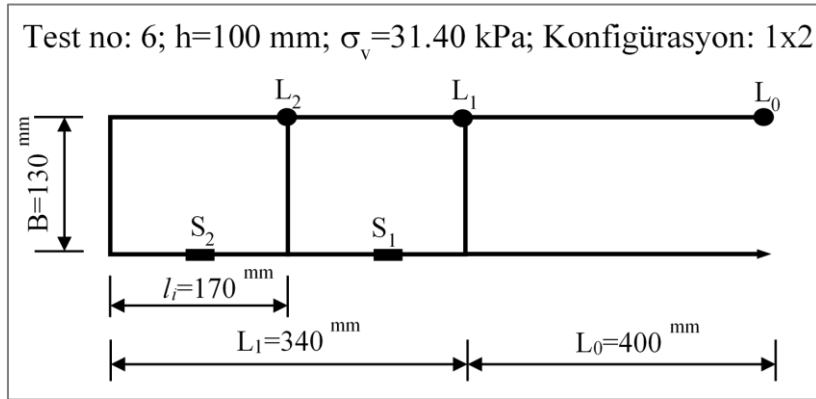


Şekil 1.14. Test no: 5 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

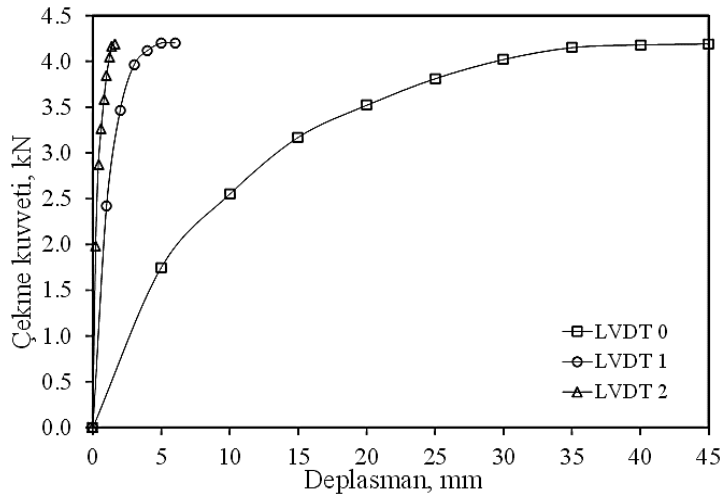


Şekil 1.15. Test no: 5 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

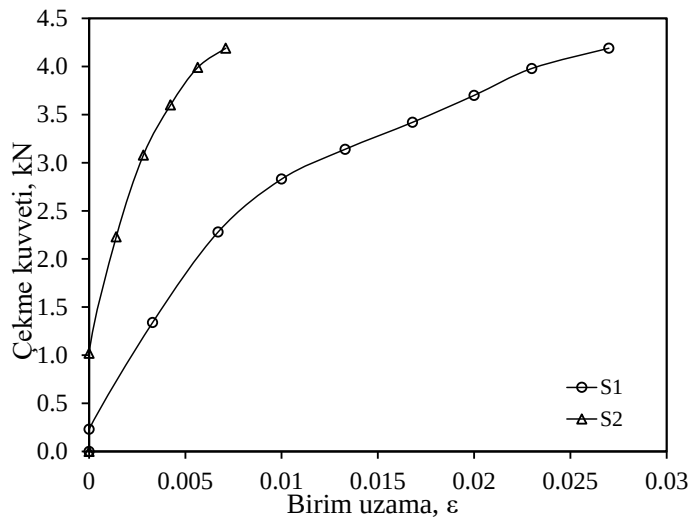
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.16. Test no: 6 deney elemanı için şematik gösterim

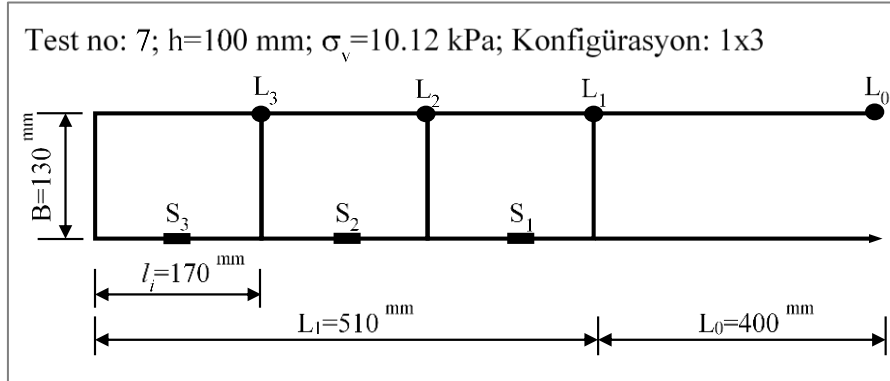


Şekil 1.17. Test no: 6 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

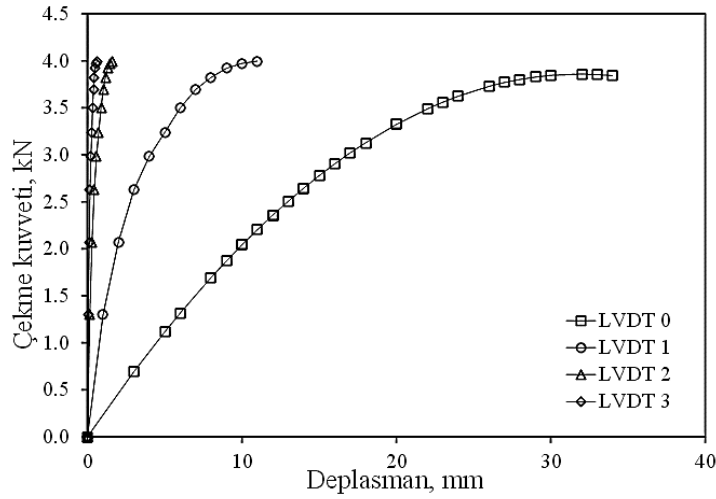


Şekil 1.18. Test no: 6 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

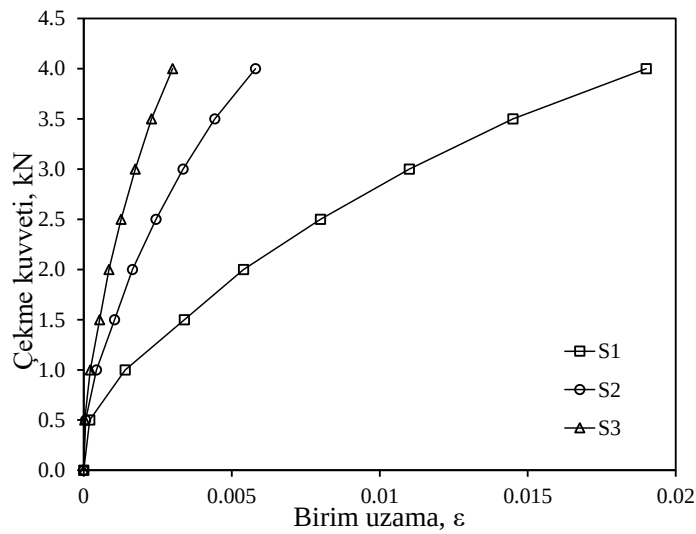
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.19. Test no: 7 deney elemanı için şematik gösterim

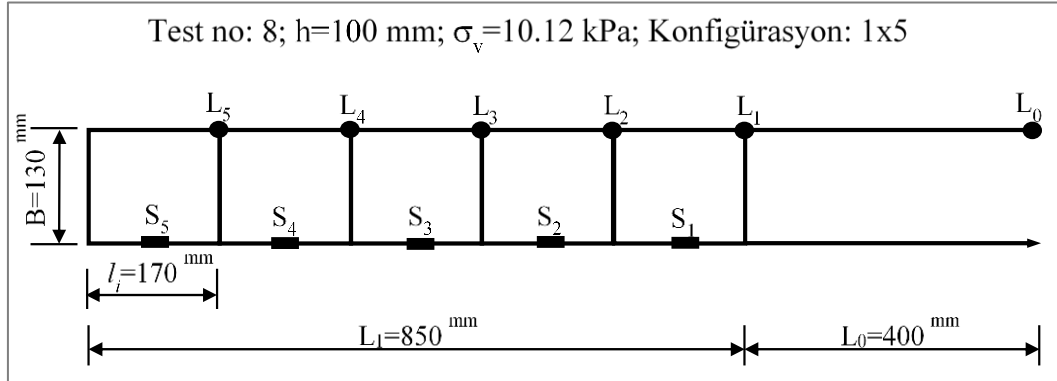


Şekil 1.20. Test no: 7 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

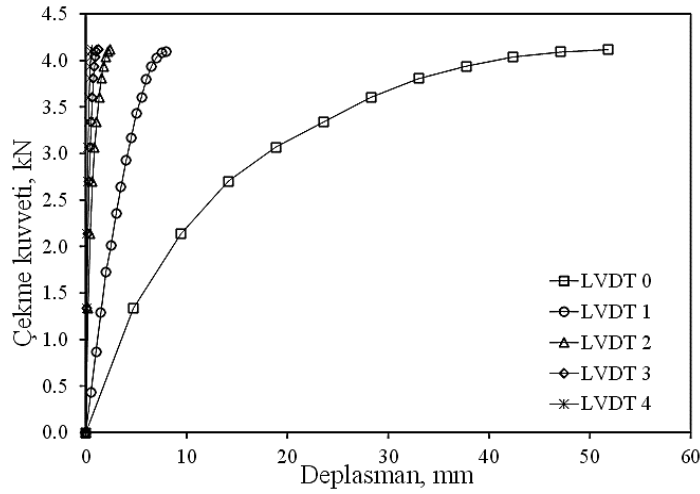


Şekil 1.21. Test no: 7 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

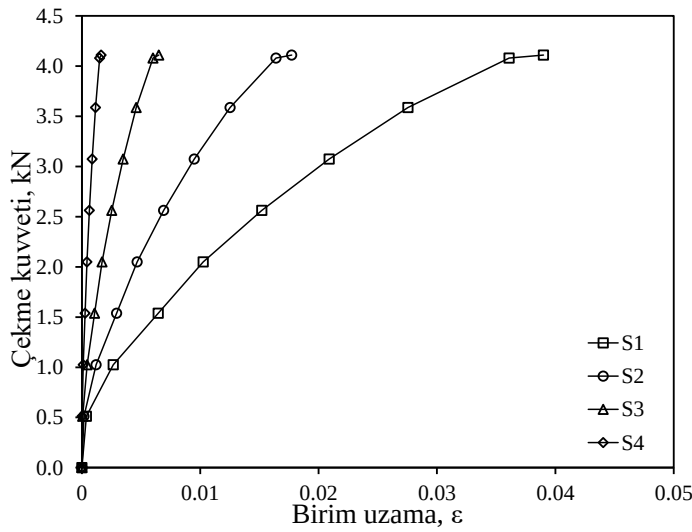
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.22. Test no: 8 deney elemanı için şematik gösterim

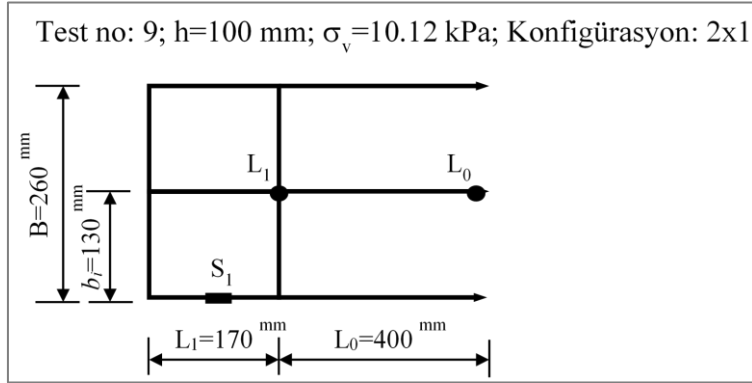


Şekil 1.23. Test no: 8 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

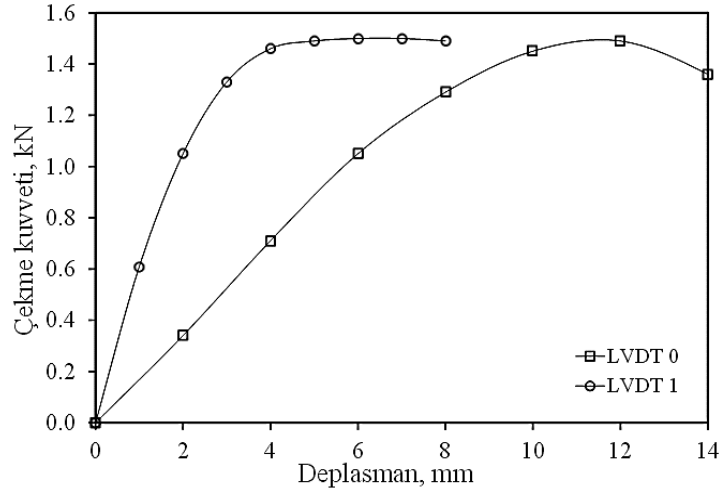


Şekil 1.24. Test no: 8 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

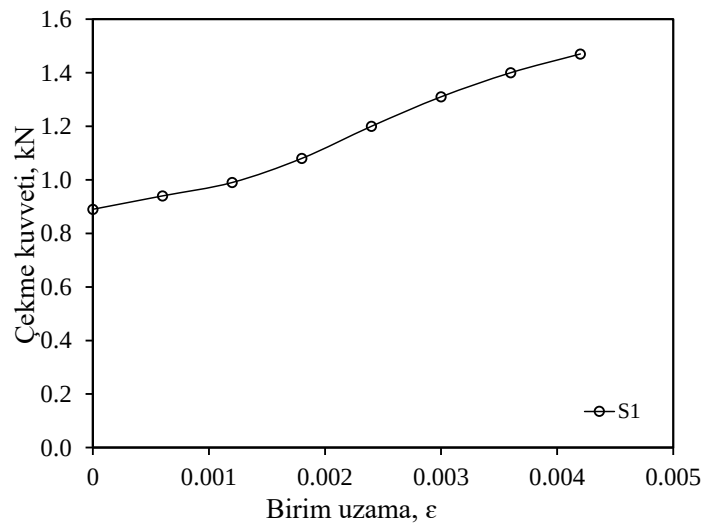
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.25. Test no: 9 deney elemanı için şematik gösterim

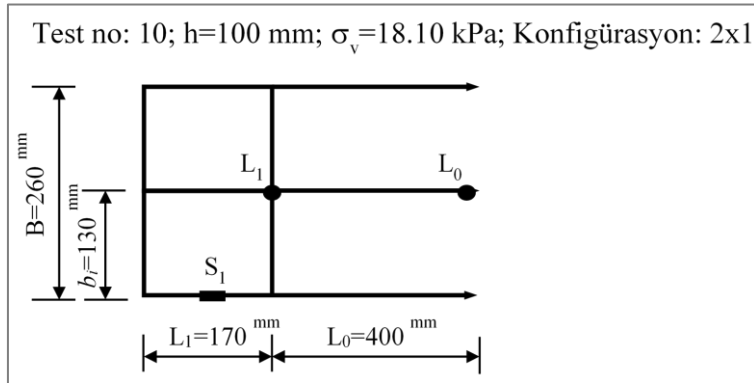


Şekil 1.26. Test no: 9 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

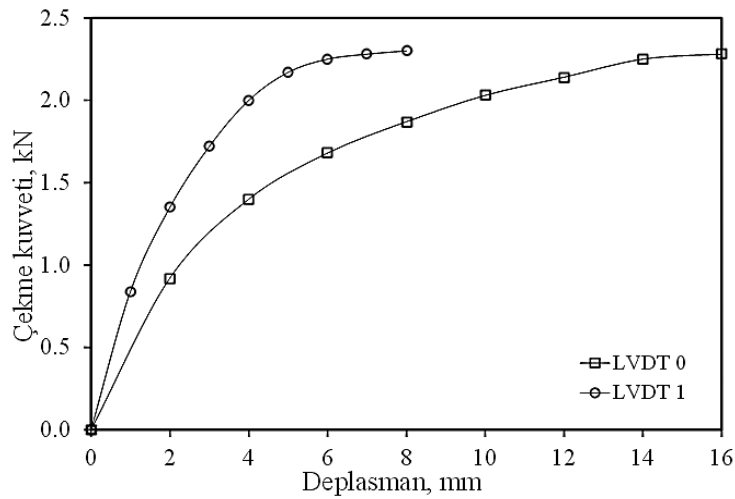


Şekil 1.27. Test no: 9 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

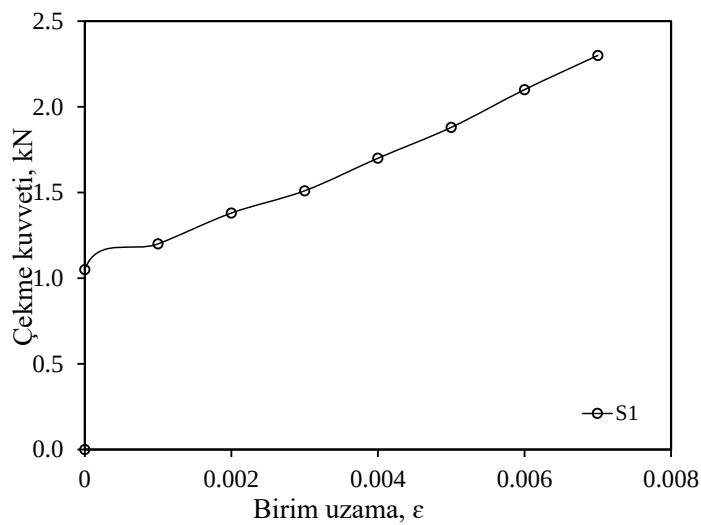
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.28. Test no: 10 deney elemanı için şematik gösterim

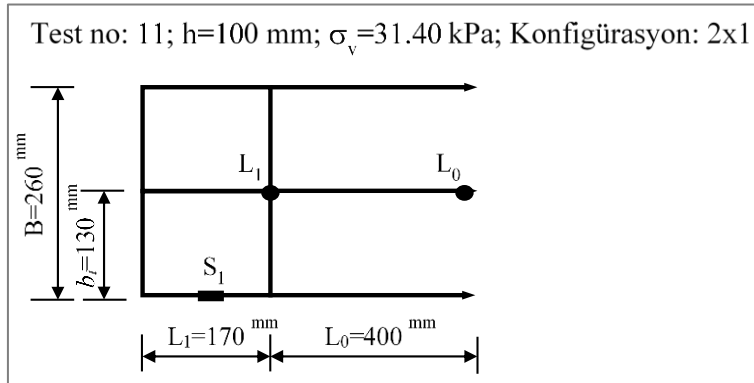


Şekil 1.29. Test no: 10 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

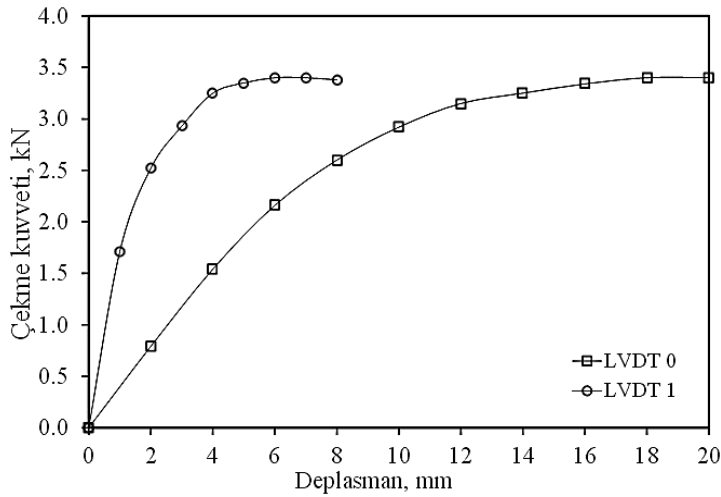


Şekil 1.30. Test no: 10 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

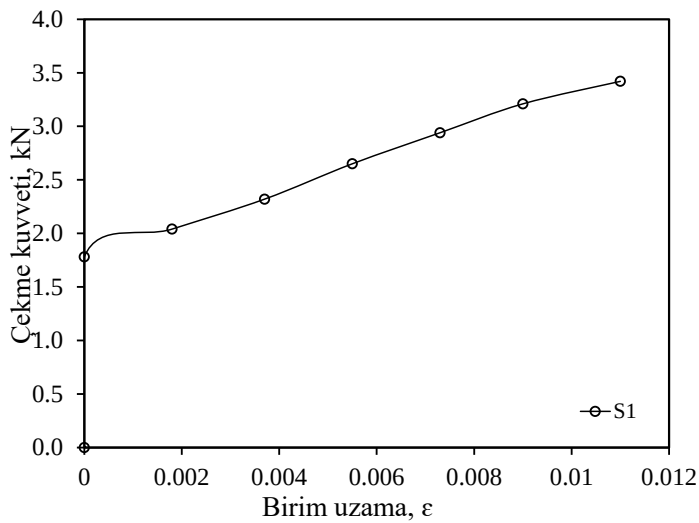
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.31. Test no: 11 deney elemanı için şematik gösterim

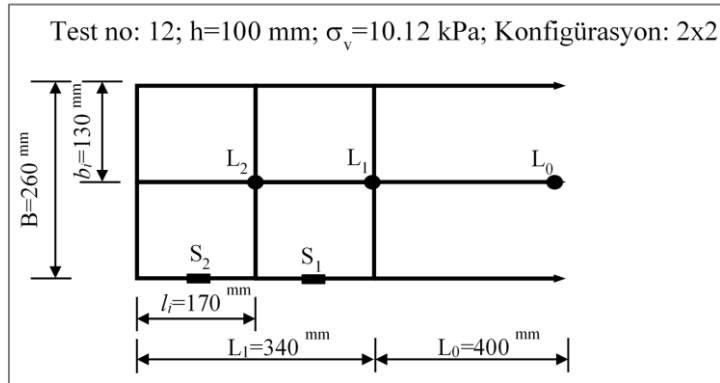


Şekil 1.32. Test no: 11 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

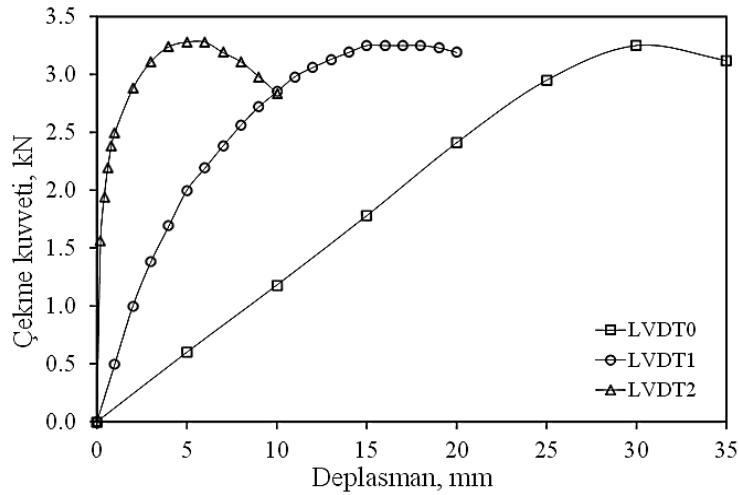


Şekil 1.33. Test no: 11 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

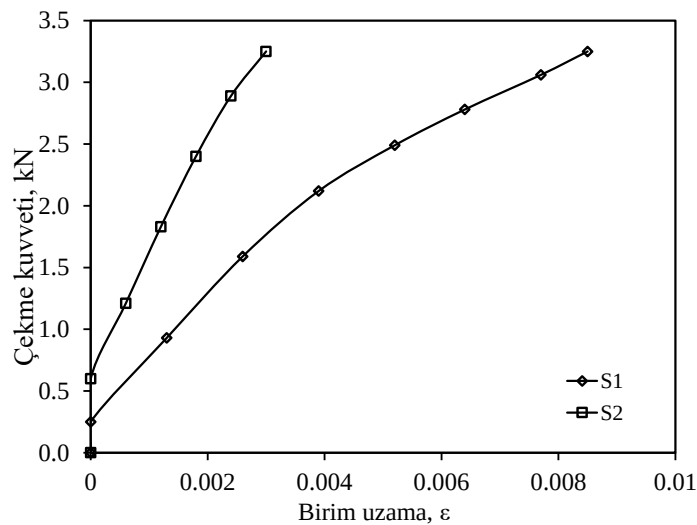
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.34. Test no: 12 deney elemanı için şematik gösterim

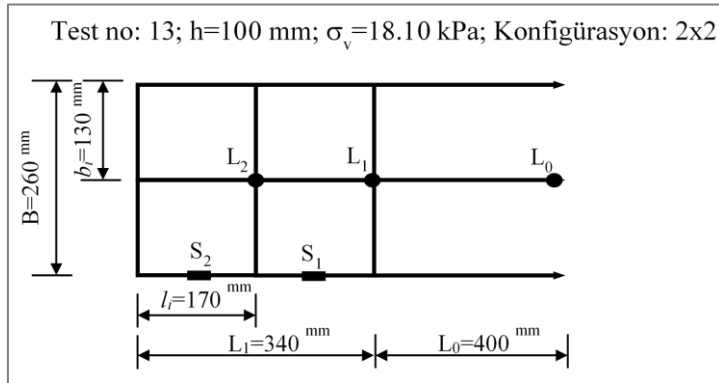


Şekil 1.35. Test no: 12 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

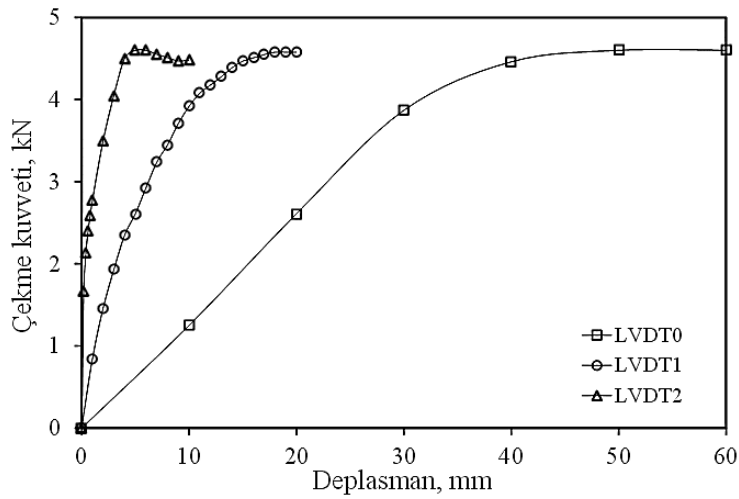


Şekil 1.36. Test no: 12 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

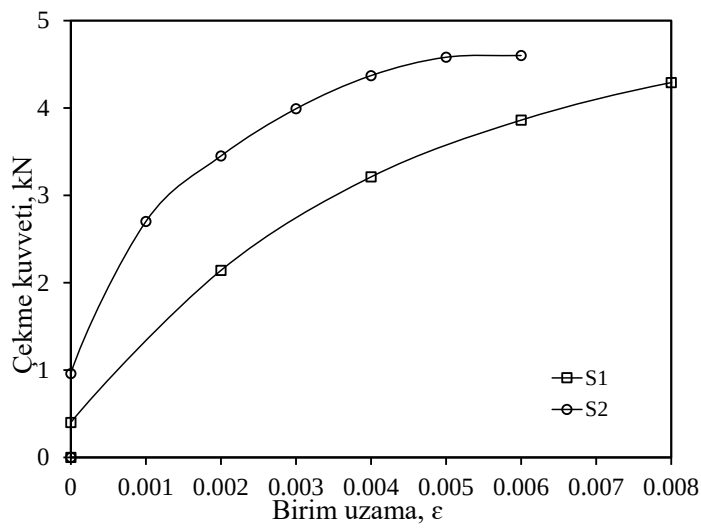
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.37. Test no: 13 deney elemanı için şematik gösterim

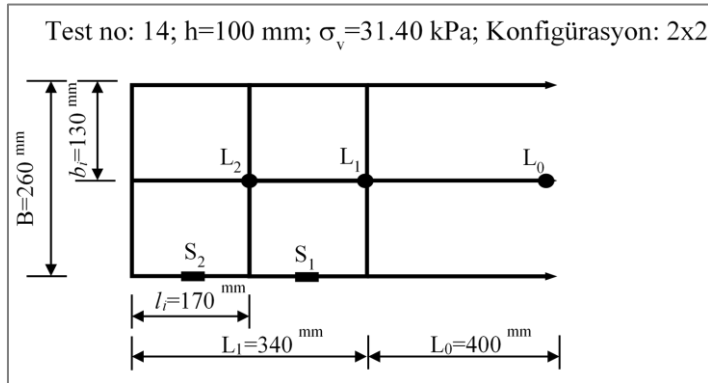


Şekil 1.38. Test no: 13 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

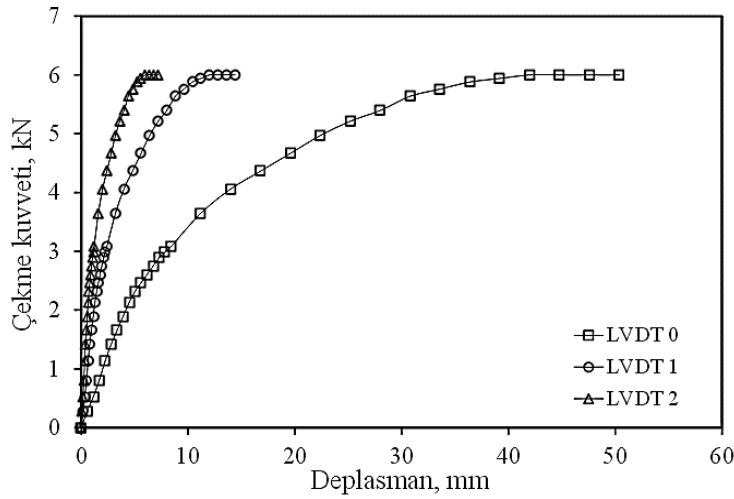


Şekil 1.39. Test no: 13 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

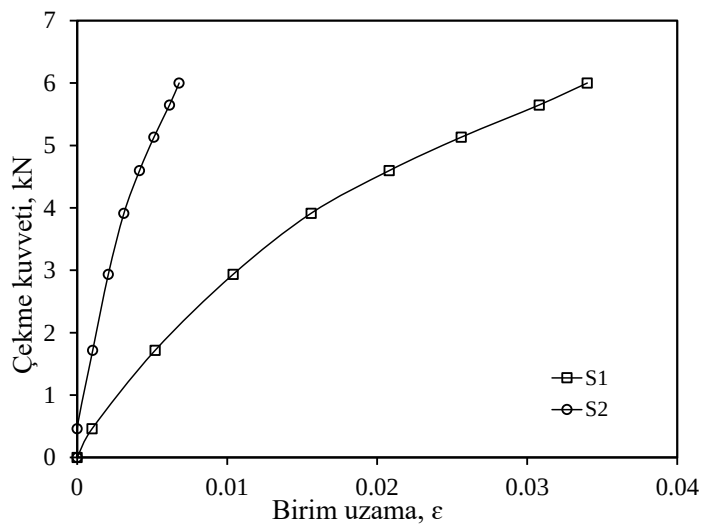
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.40. Test no: 14 deney elemanı için şematik gösterim

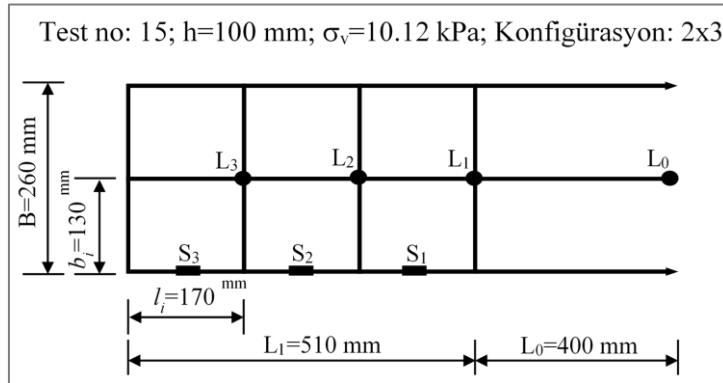


Şekil 1.41. Test no: 14 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

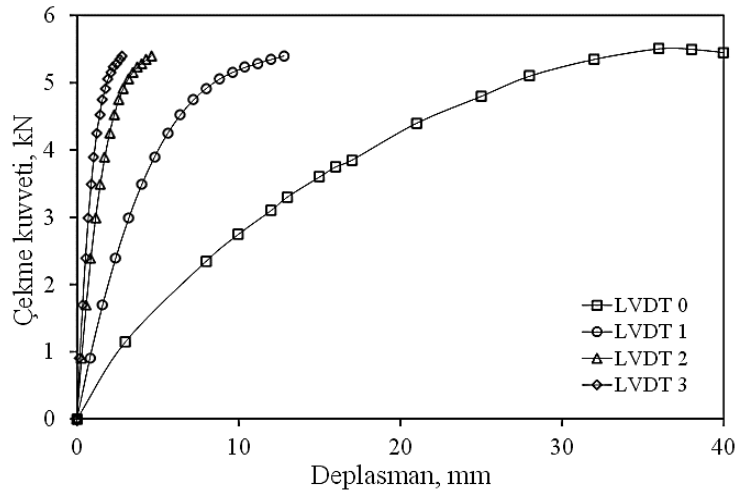


Şekil 1.42. Test no: 14 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

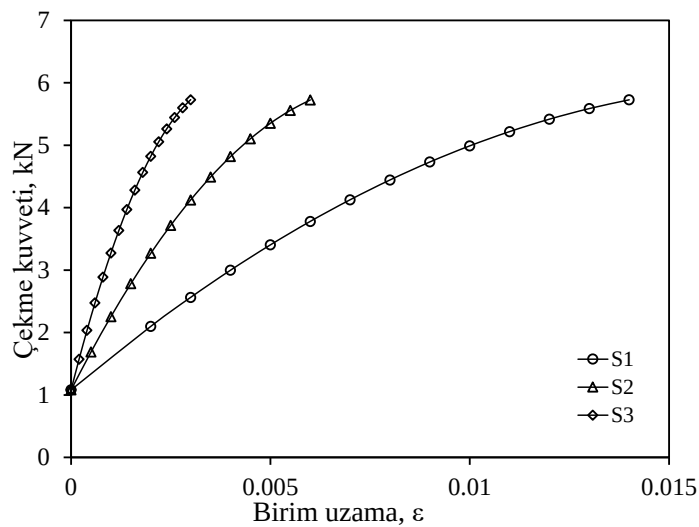
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.43. Test no: 15 deney elemanı için şematik gösterim

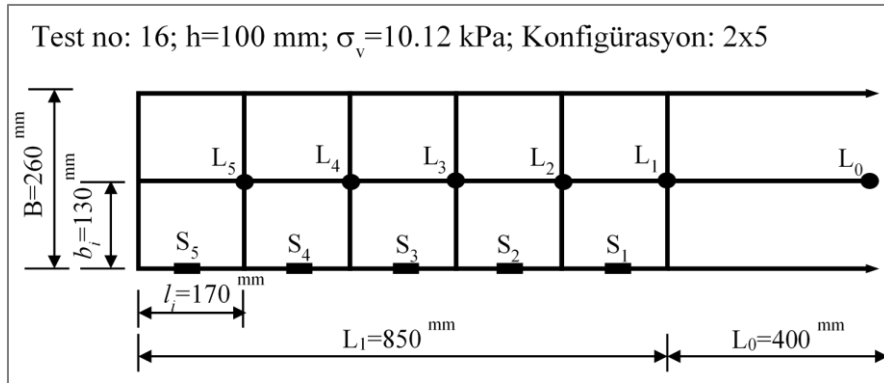


Şekil 1.44. Test no: 15 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

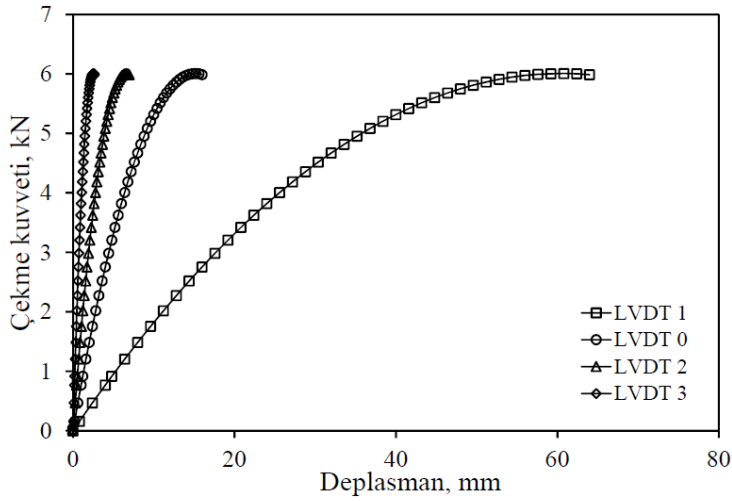


Şekil 1.45. Test no: 15 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

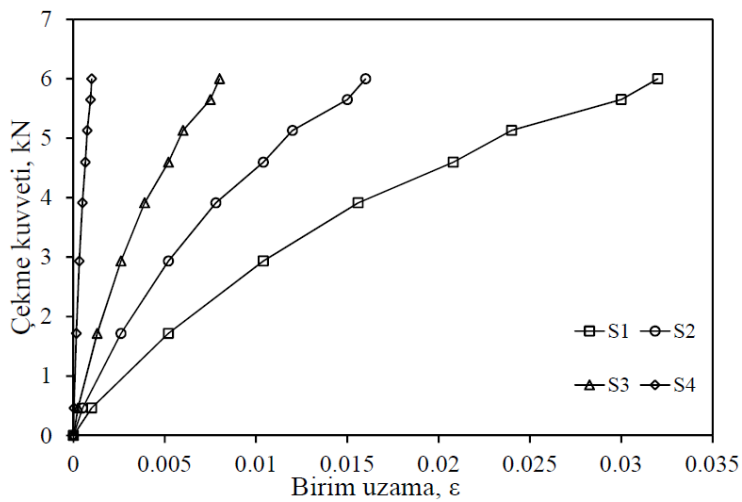
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.46. Test no: 16 deney elemanı için şematik gösterim

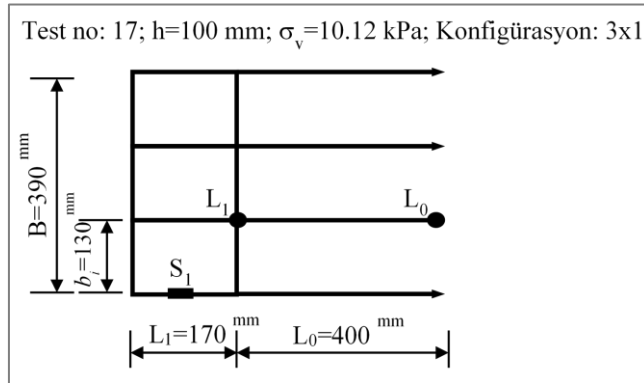


Şekil 1.47. Test no: 16 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

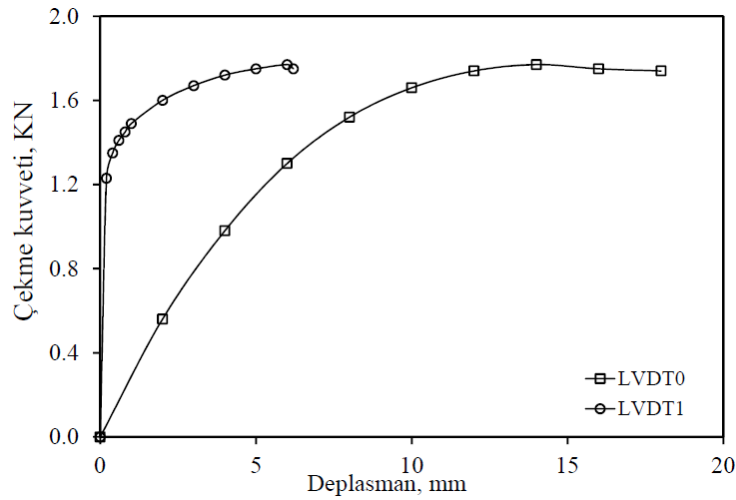


Şekil 1.48. Test no: 16 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

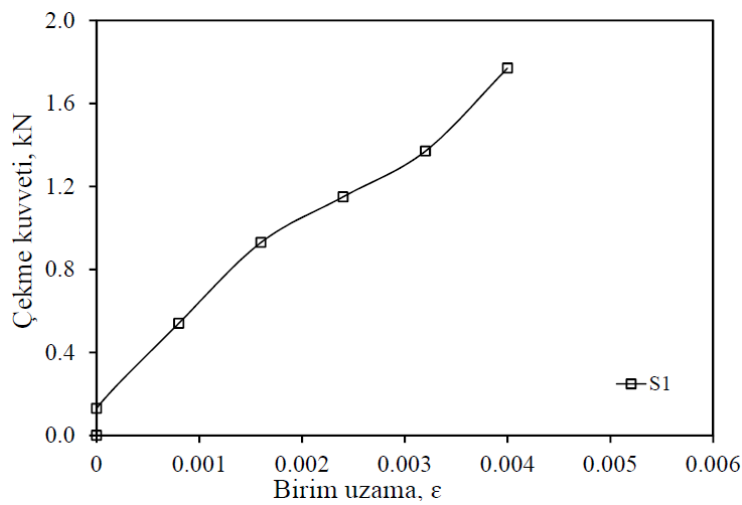
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.49. Test no: 17 deney elemanı için şematik gösterim

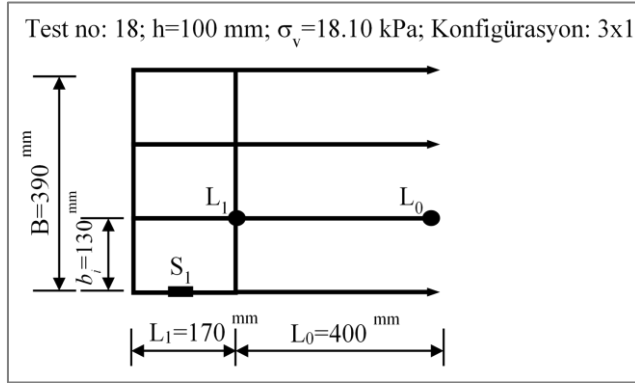


Şekil 1.50. Test no: 17 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

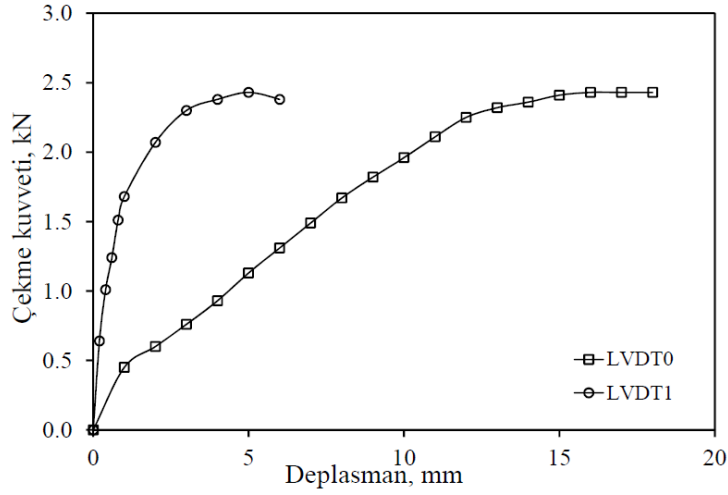


Şekil 1.51. Test no: 17 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

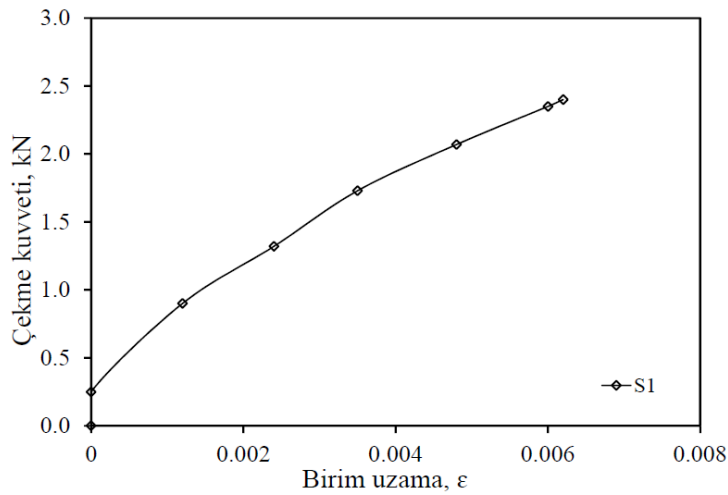
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.52. Test no: 18 deney elemanı için şematik gösterim

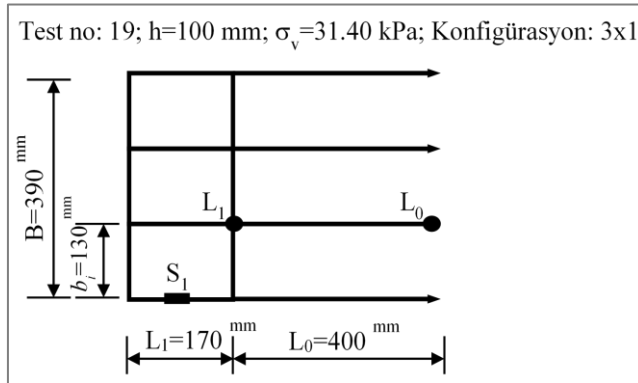


Şekil 1.53. Test no: 18 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

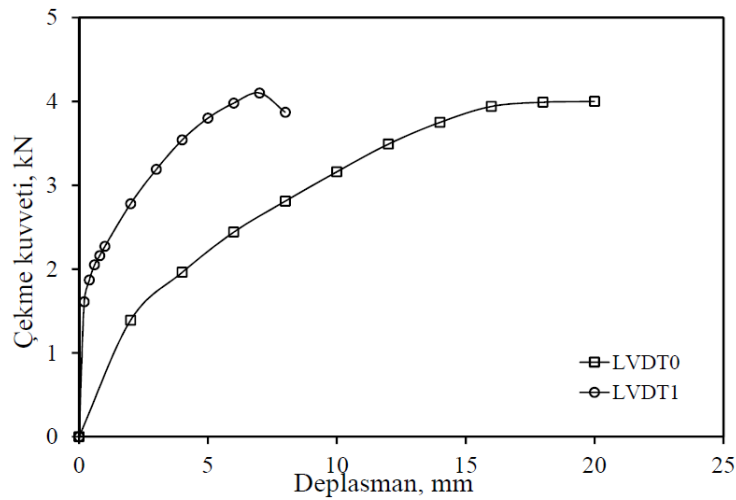


Şekil 1.54. Test no: 18 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

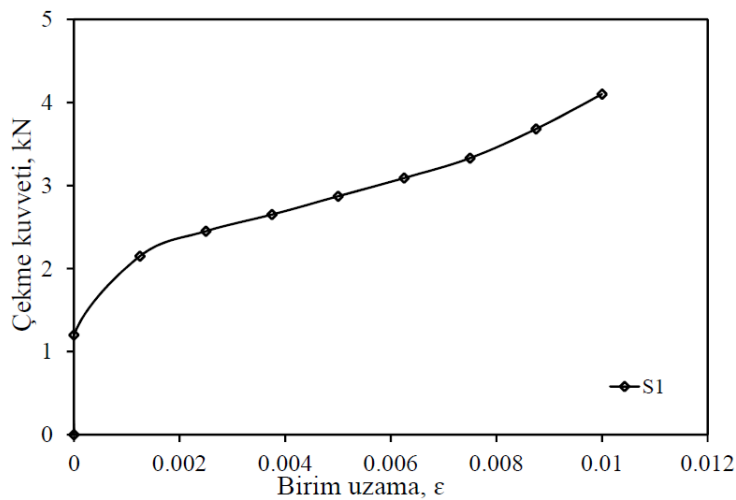
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.55. Test no: 19 deney elemanı için şematik gösterim

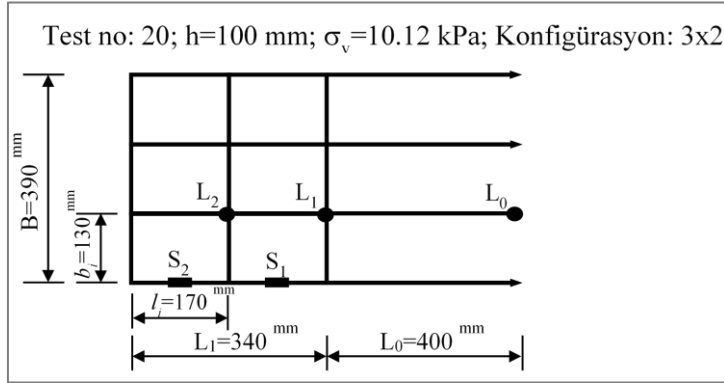


Şekil 1.56. Test no: 19 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

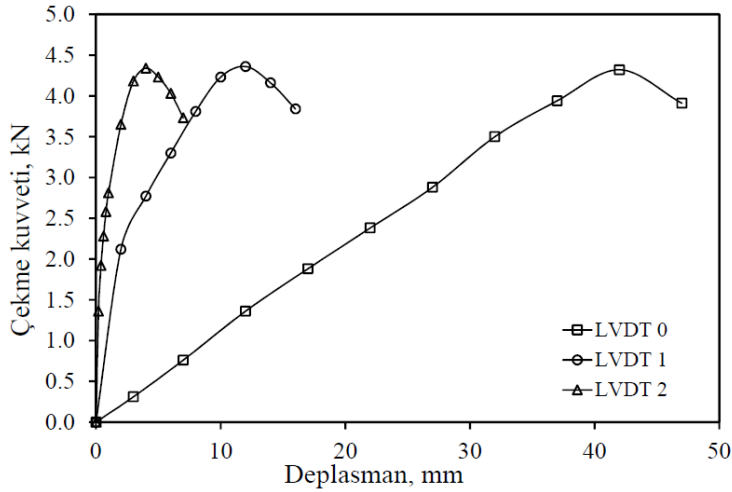


Şekil 1.57. Test no: 19 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

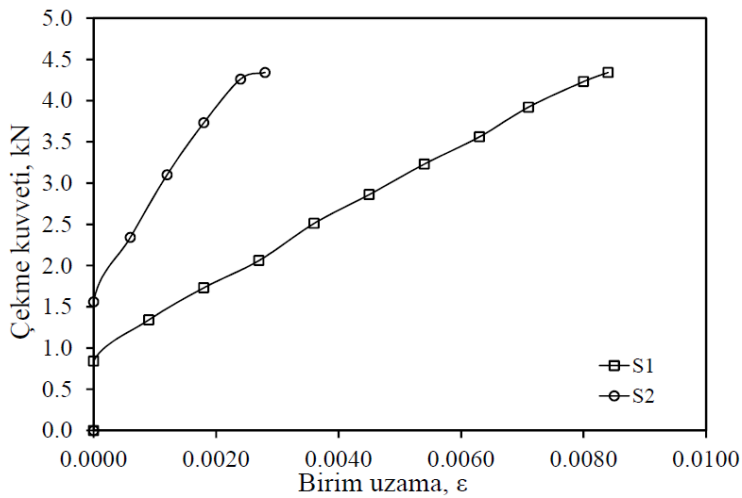
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.58. Test no: 20 deney elemanı için şematik gösterim

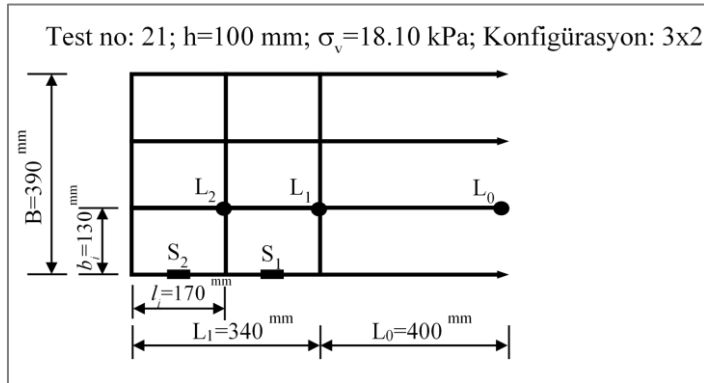


Şekil 1.59. Test no: 20 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

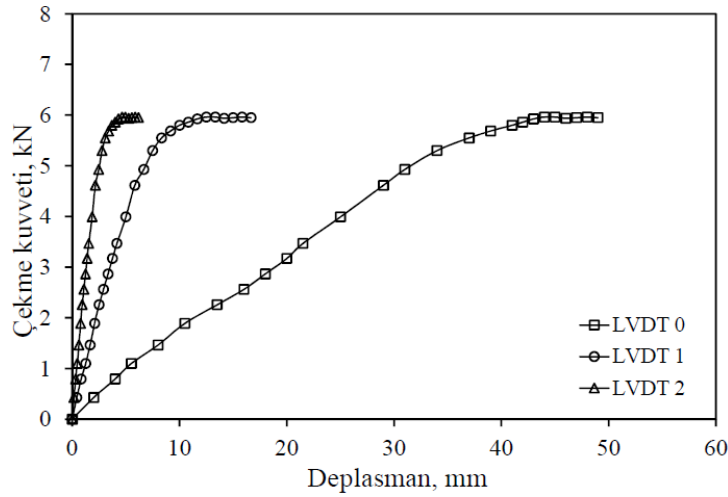


Şekil 1.60. Test no: 20 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

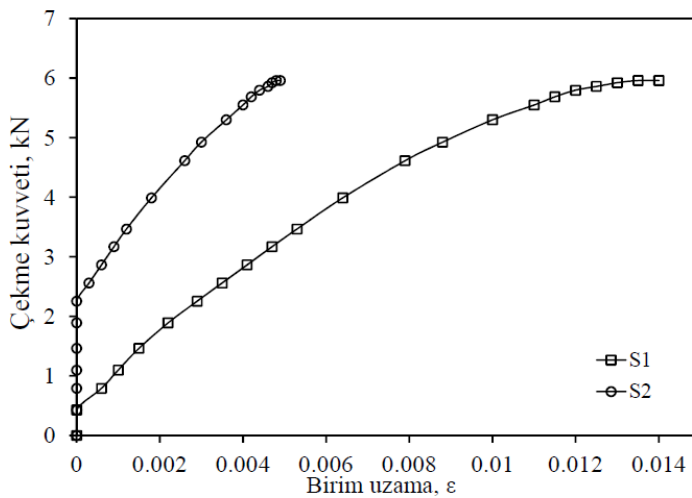
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.61. Test no: 21 deney elemanı için şematik gösterim

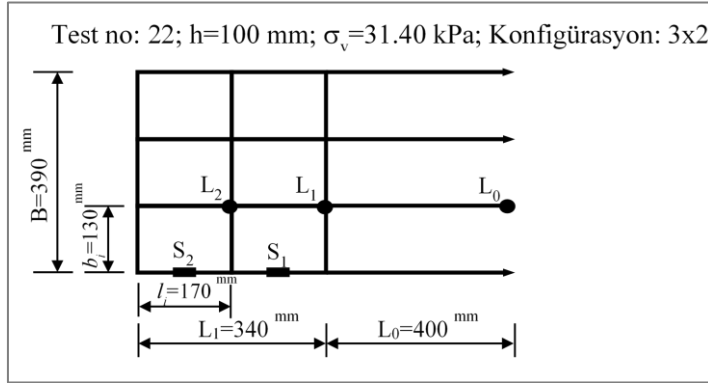


Şekil 1.62. Test no: 21 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

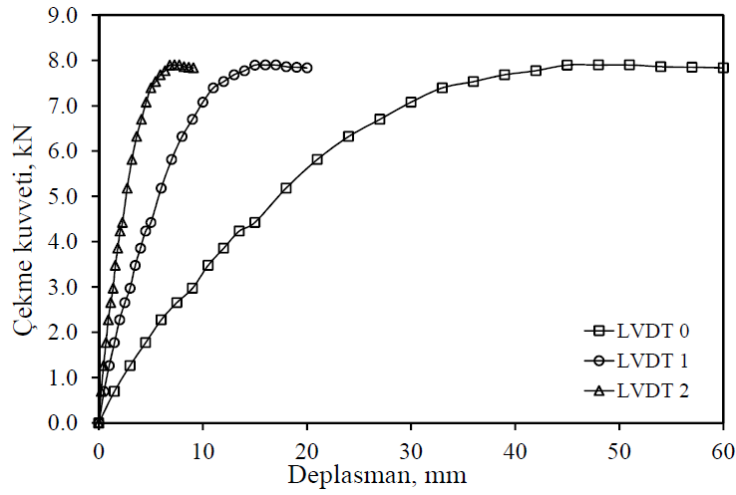


Şekil 1.63. Test no: 21 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

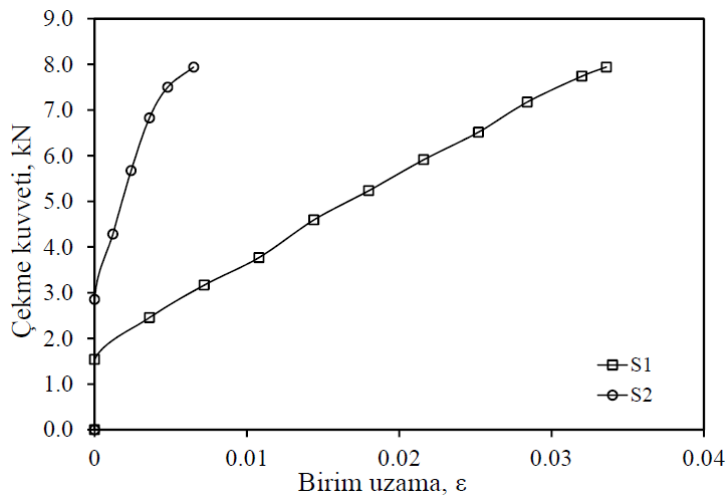
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.64. Test no: 22 deney elemanı için şematik gösterim

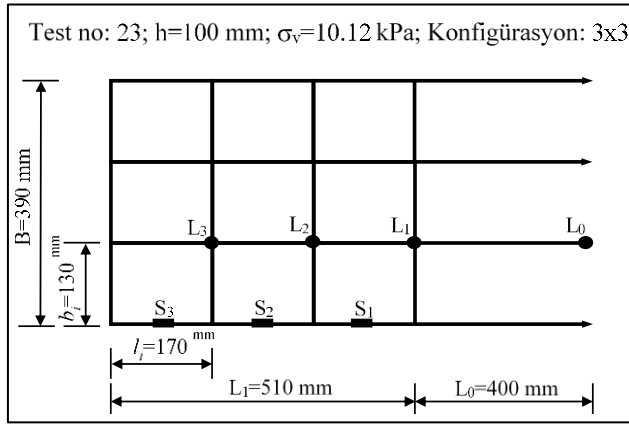


Şekil 1.65. Test no: 22 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

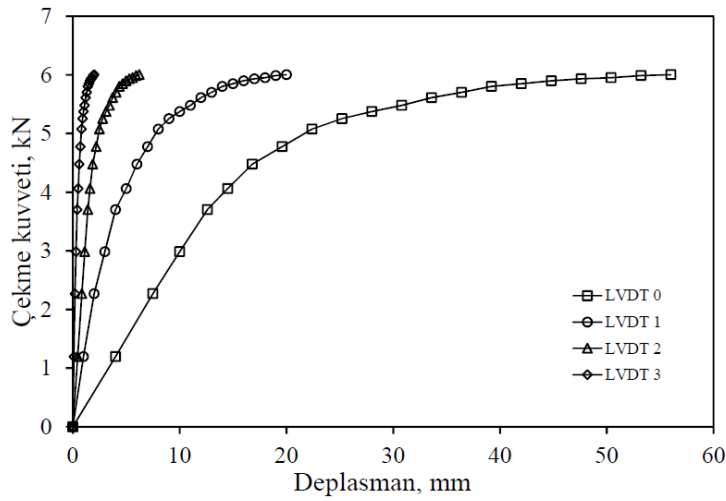


Şekil 1.66. Test no: 22 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

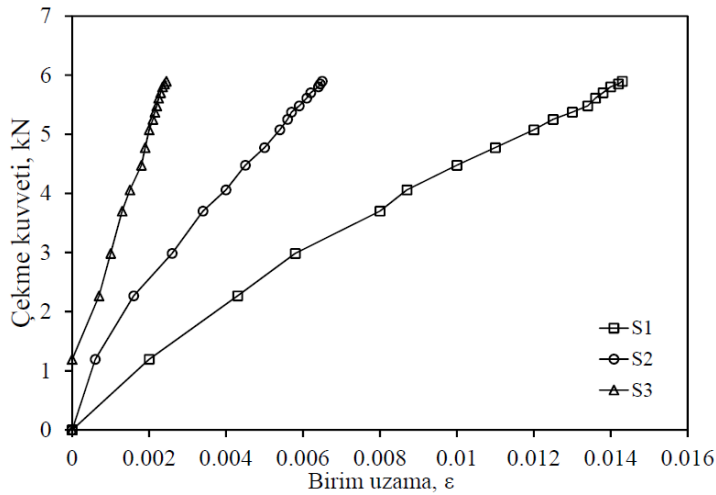
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.67. Test no: 23 deney elemanı için şematik gösterim

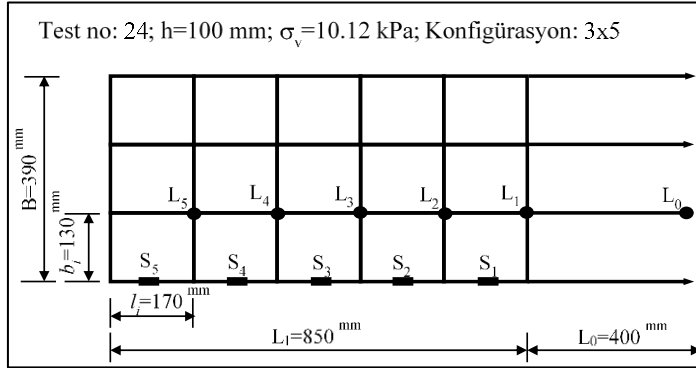


Şekil 1.68. Test no: 23 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

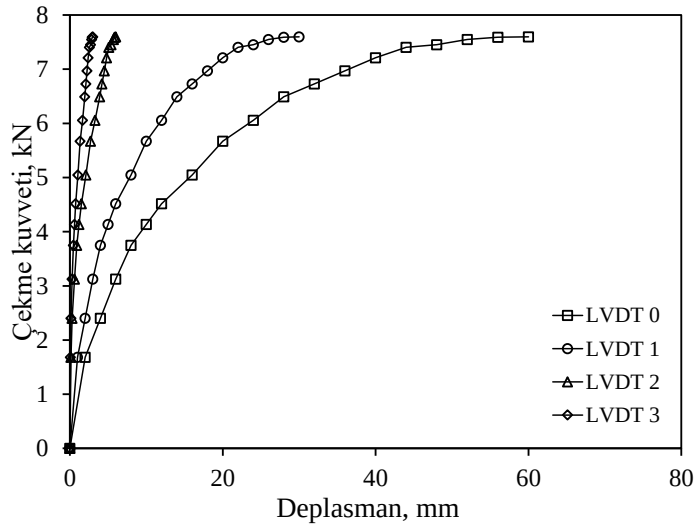


Şekil 1.69. Test no: 23 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

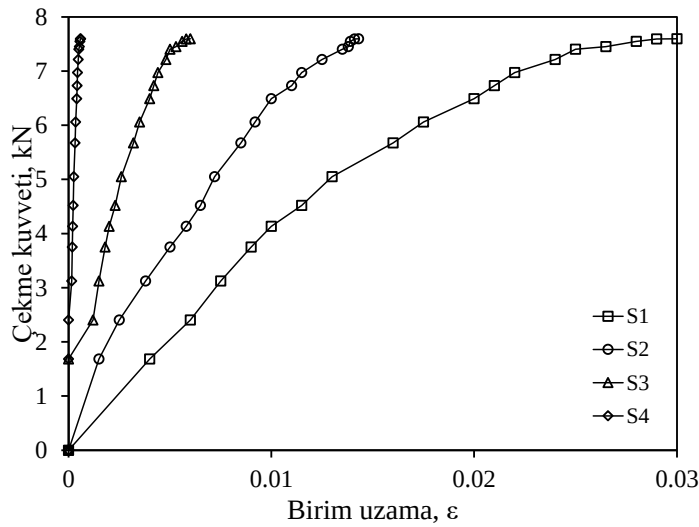
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.70. Test no: 24 deney elemanı için şematik gösterim

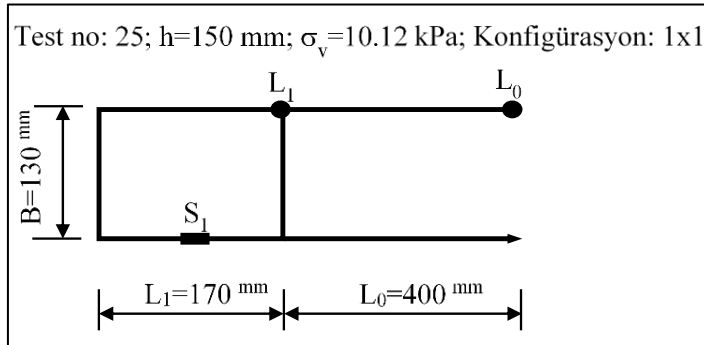


Şekil 1.71. Test no: 24 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

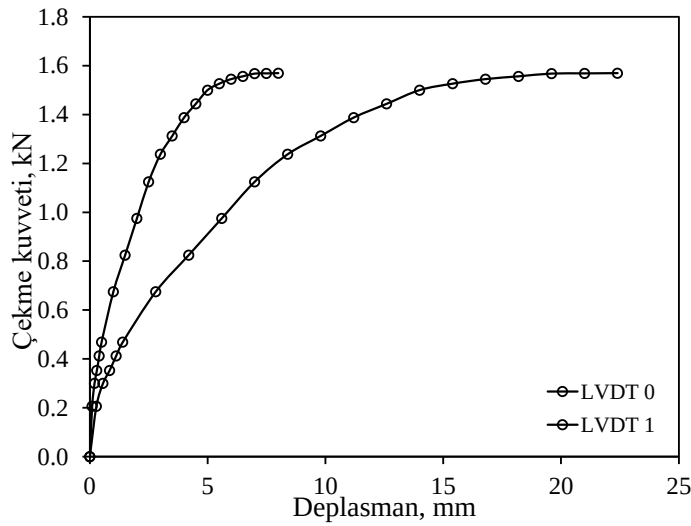


Şekil 1.72. Test no: 24 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

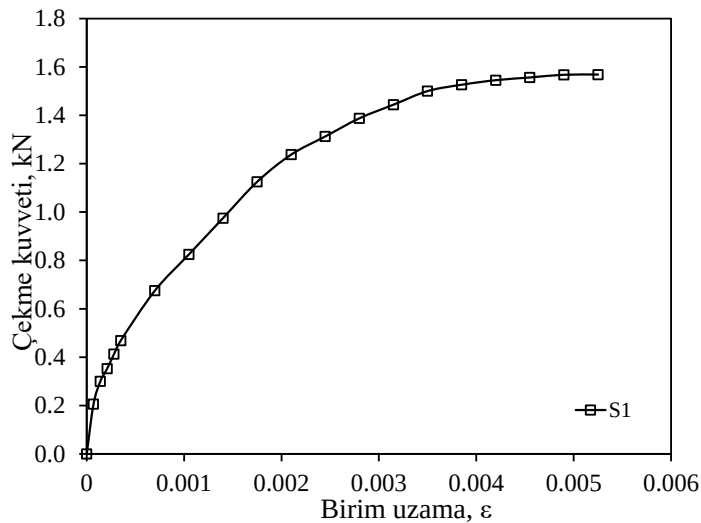
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.73. Test no: 25 deney elemanı için şematik gösterim

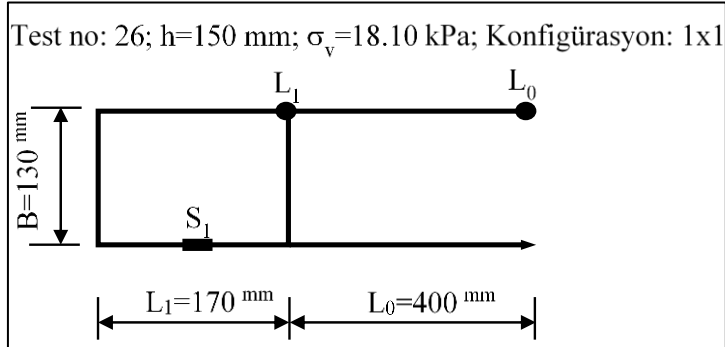


Şekil 1.74. Test no: 25 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

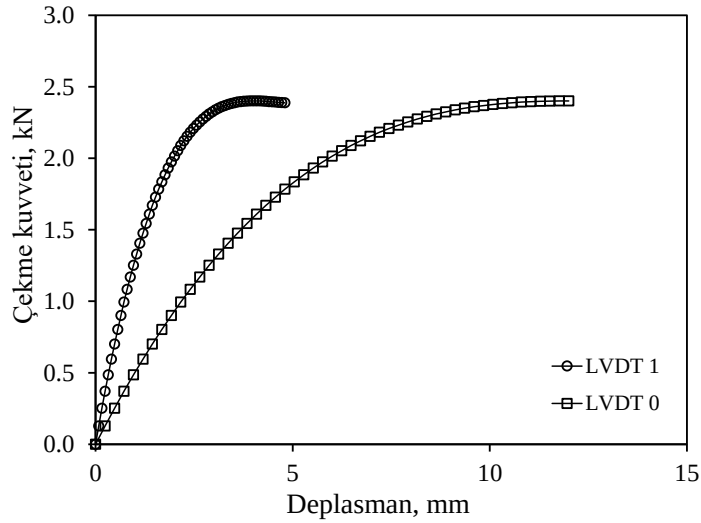


Şekil 1.75. Test no: 25 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

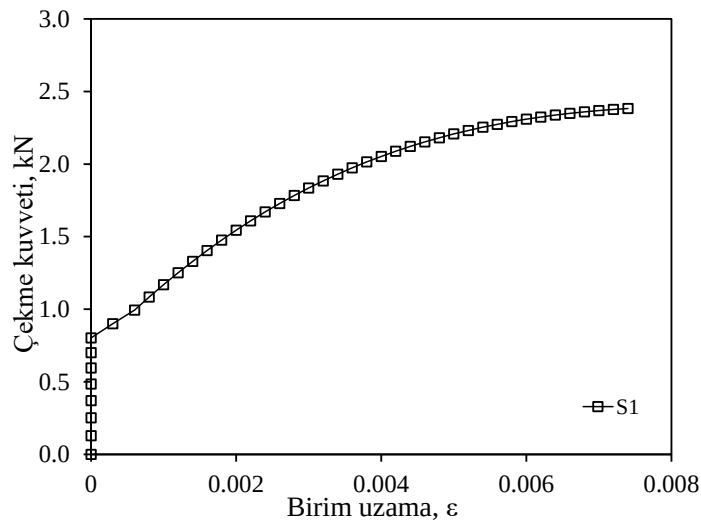
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.76. Test no: 26 deney elemanı için şematik gösterim

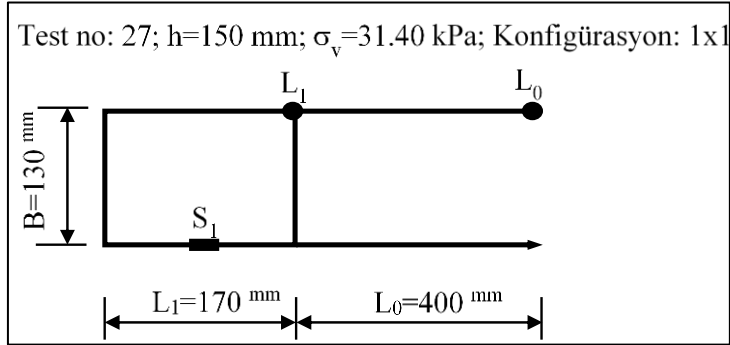


Şekil 1.77. Test no: 26 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

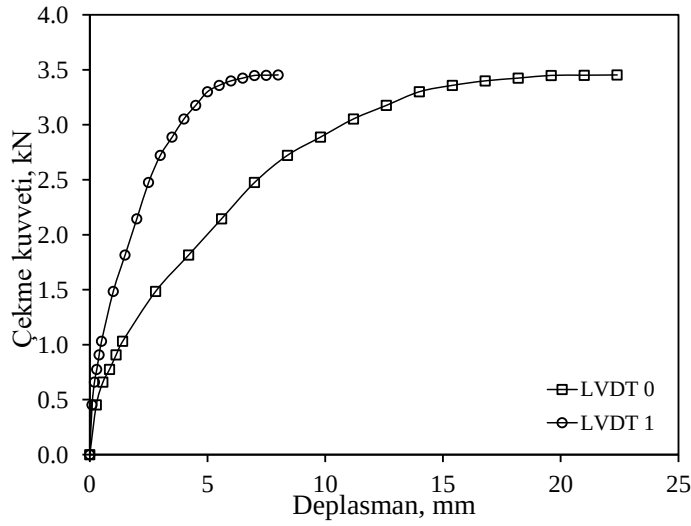


Şekil 1.78. Test no: 26 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

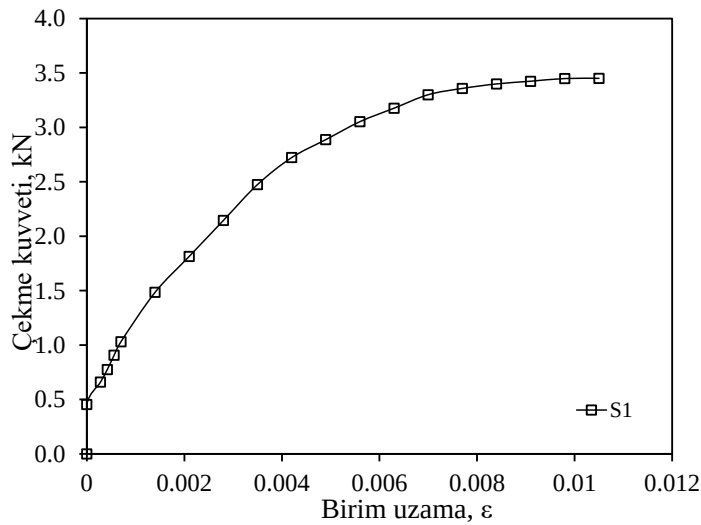
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.79. Test no: 27 deney elemanı için şematik gösterim



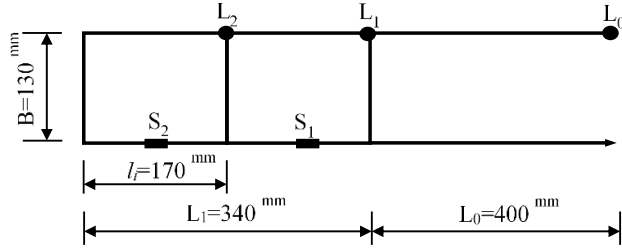
Şekil 1.80. Test no: 27 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi



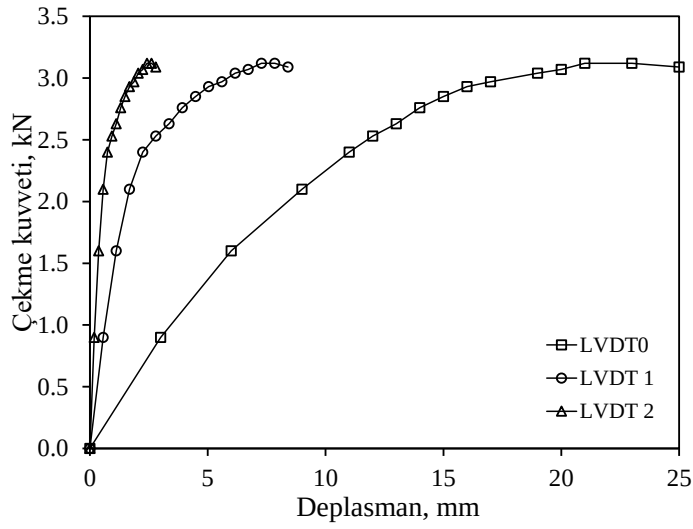
Şekil 1.81. Test no: 27 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri

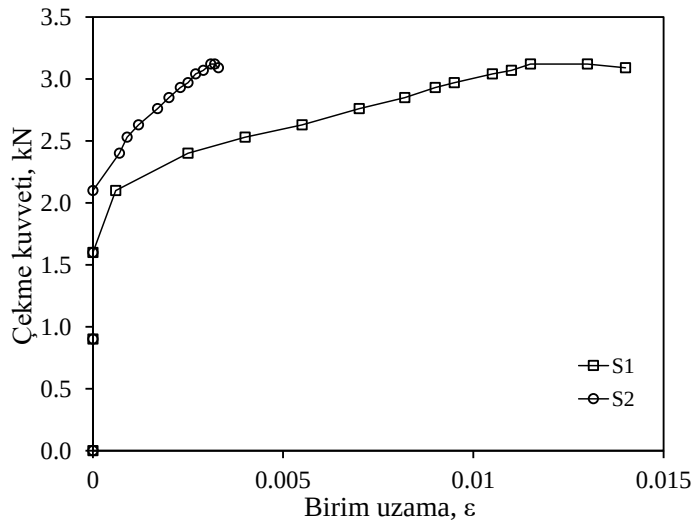
Test no: 28; $h=150$ mm; $\sigma_v=10.12$ kPa; Konfigürasyon: 1x2



Şekil 1.82. Test no: 28 deney elemanı için şematik gösterim

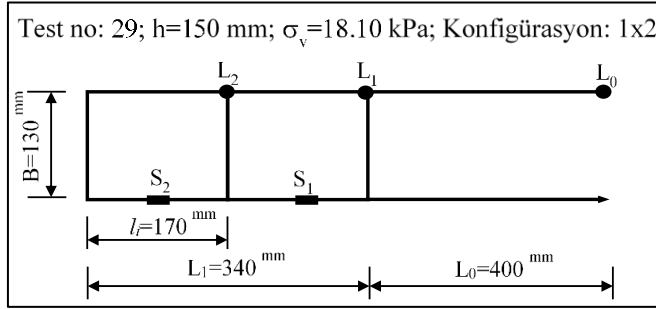


Şekil 1.83. Test no: 28 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

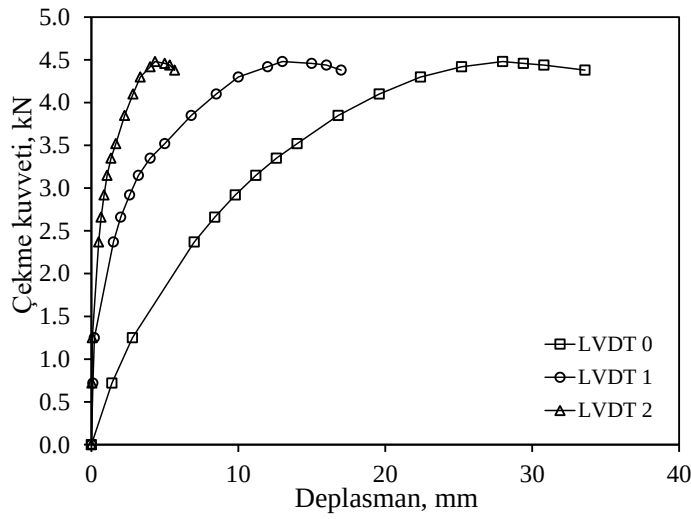


Şekil 1.84. Test no: 28 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

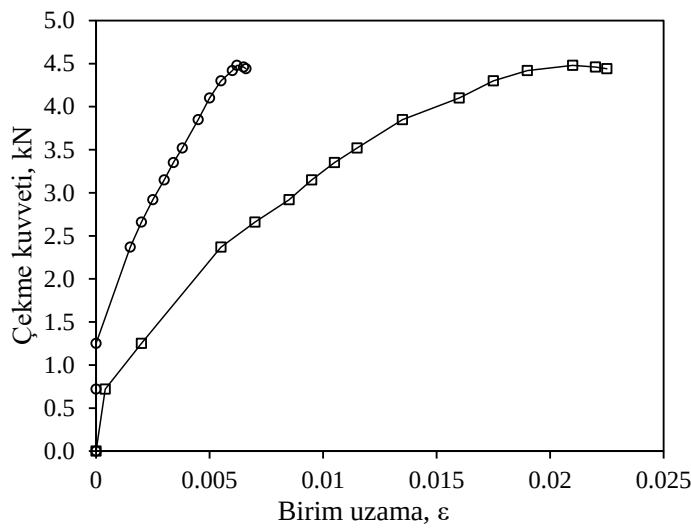
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.85. Test no: 29 deney elemanı için şematik gösterim

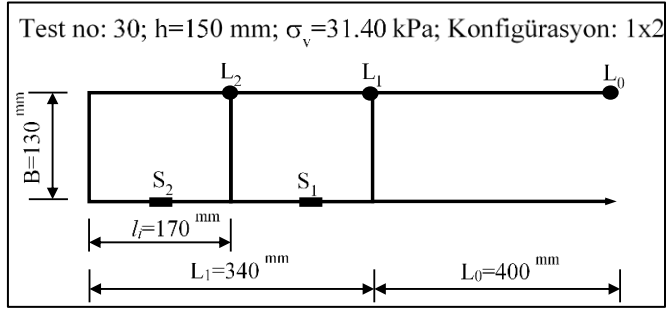


Şekil 1.86. Test no: 29 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

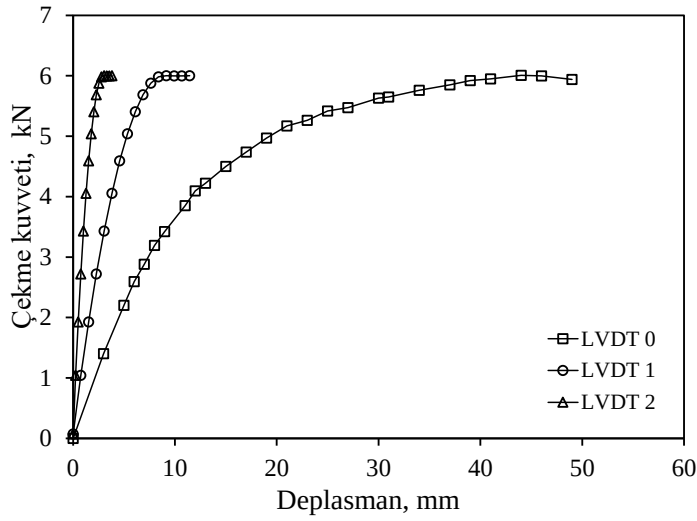


Şekil 1.87. Test no: 29 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

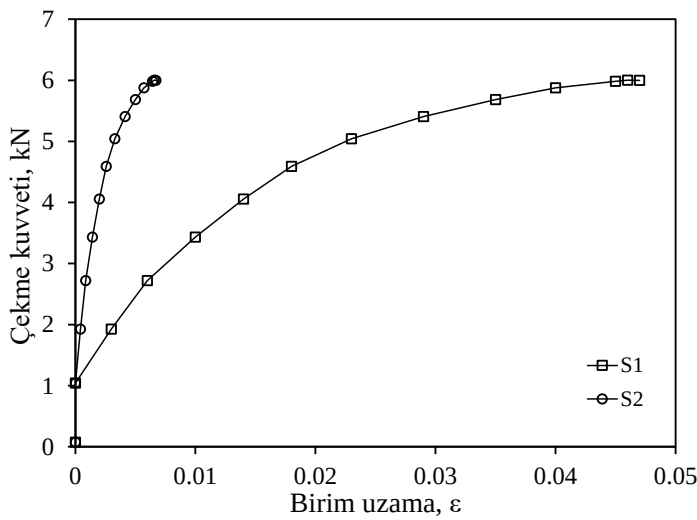
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.88. Test no: 30 deney elemanı için şematik gösterim

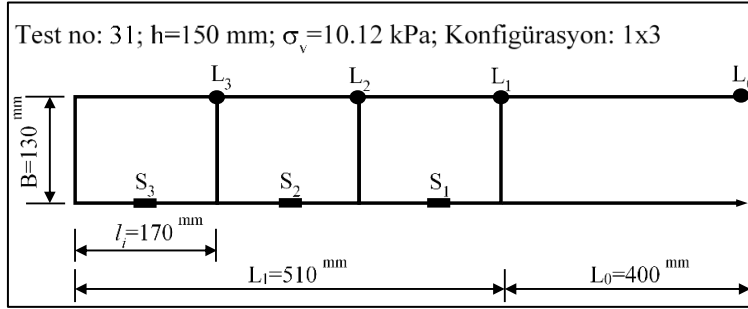


Şekil 1.89. Test no: 30 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

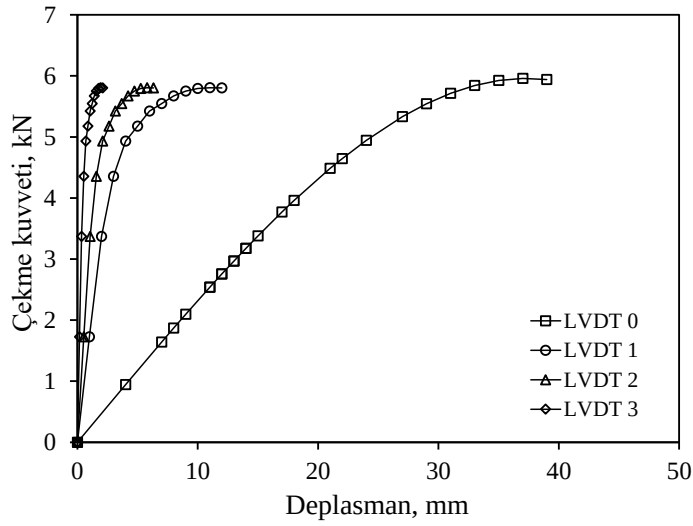


Şekil 1.90. Test no: 30 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

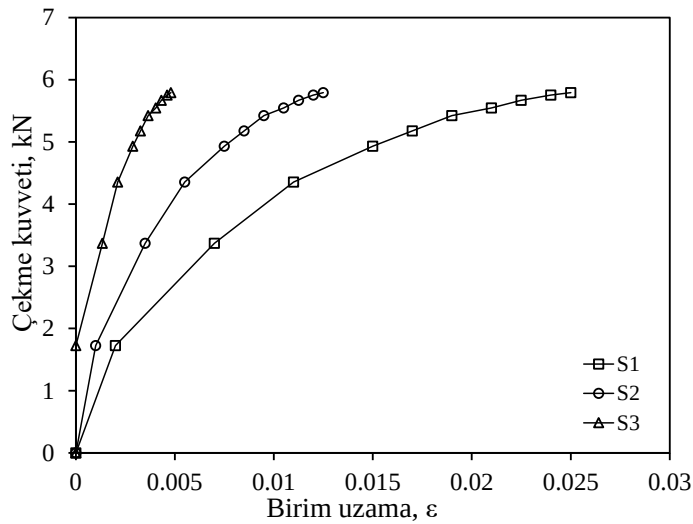
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.91. Test no: 31 deney elemanı için şematik gösterim

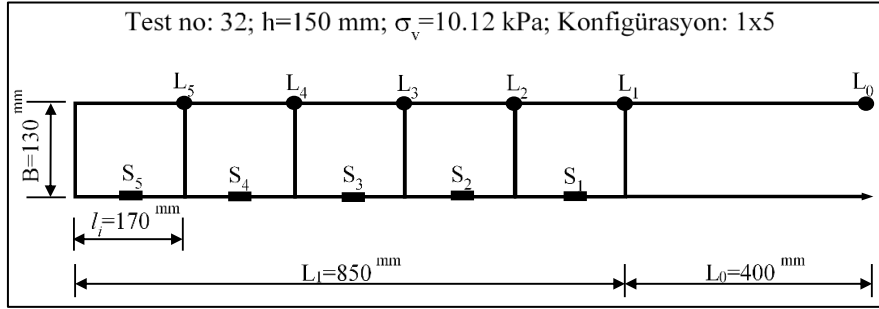


Şekil 1.92. Test no: 31 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

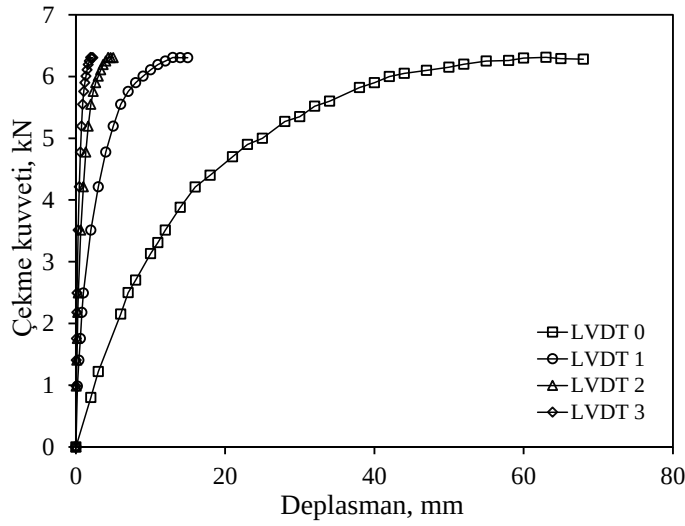


Şekil 1.93. Test no: 31 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

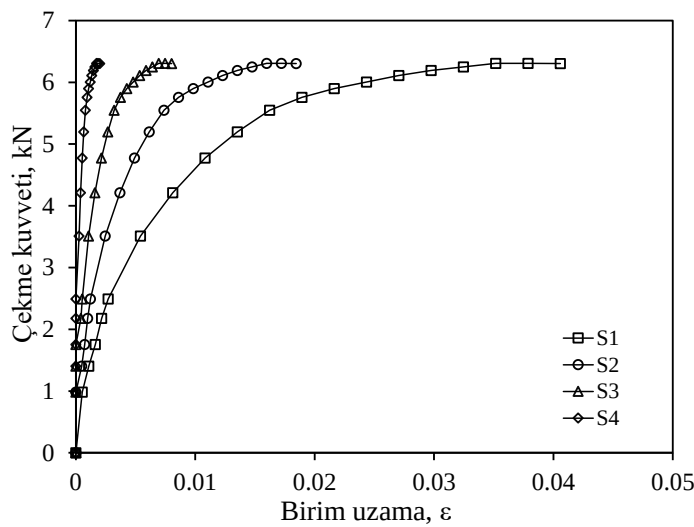
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.94. Test no: 32 deney elemanı için şematik gösterim

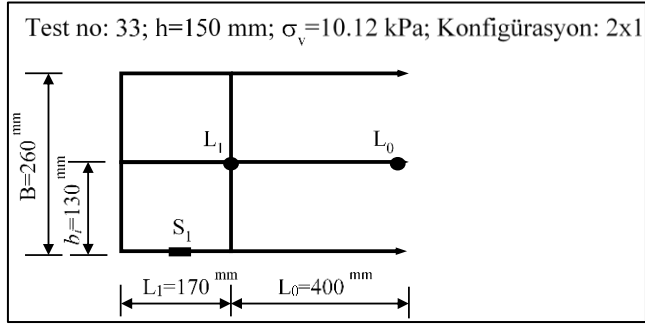


Şekil 1.95. Test no: 32 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

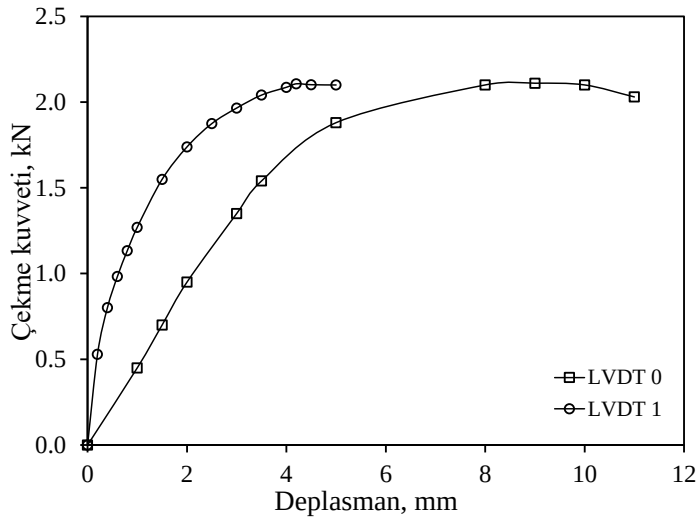


Şekil 1.96. Test no: 32 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

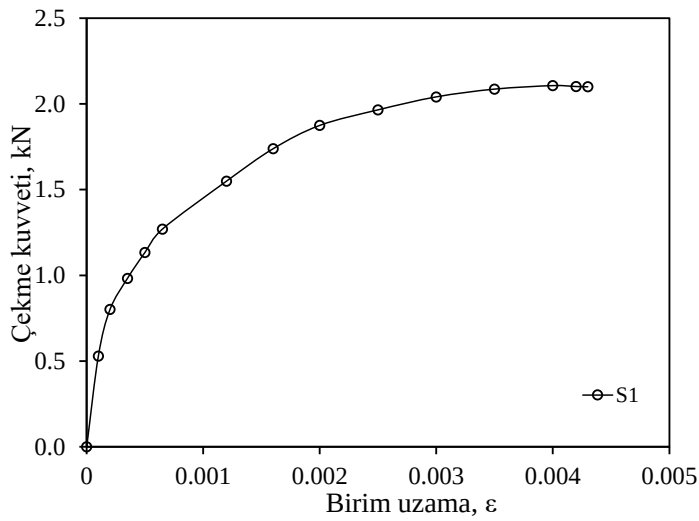
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.97. Test no: 33 deney elemanı için şematik gösterim

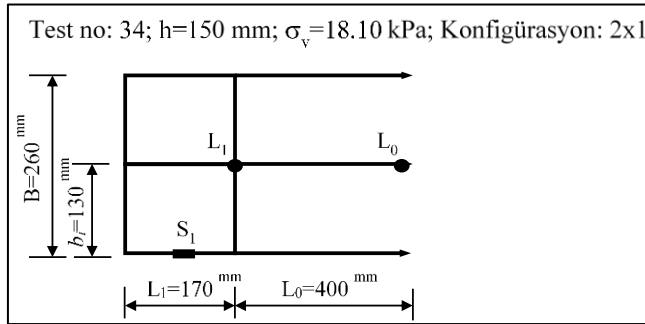


Şekil 1.98. Test no: 33 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

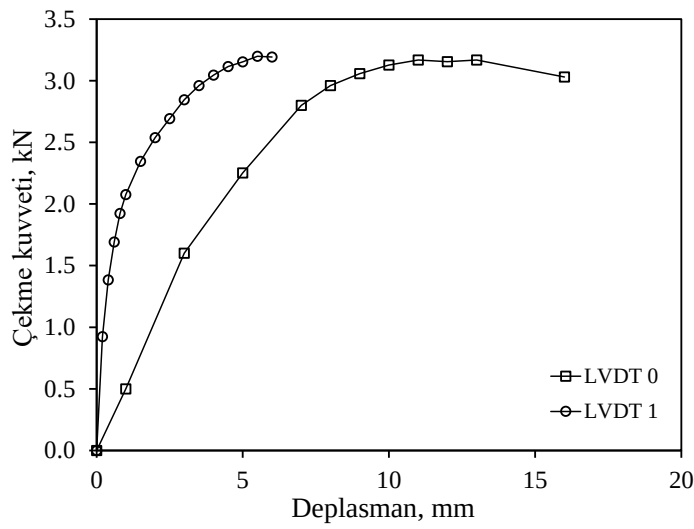


Şekil 1.99. Test no: 33 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

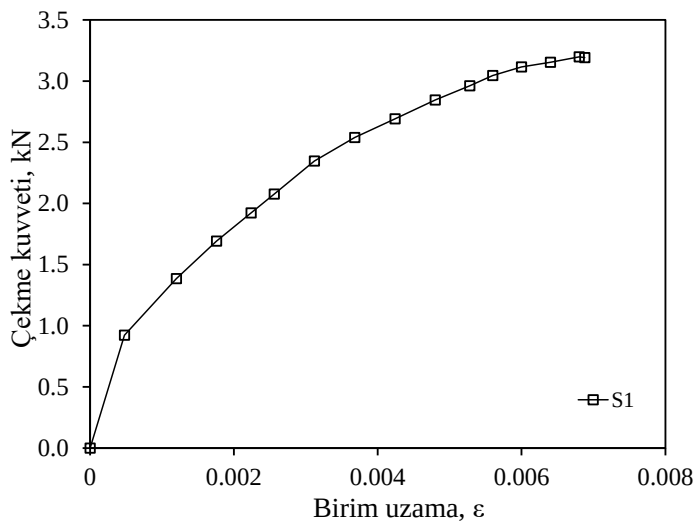
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.100. Test no: 34 deney elemanı için şematik gösterim

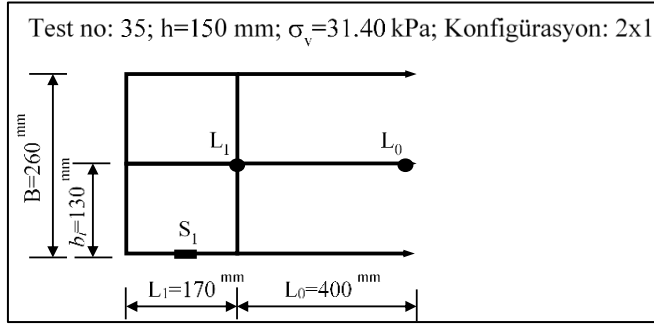


Şekil 1.101. Test no: 34 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

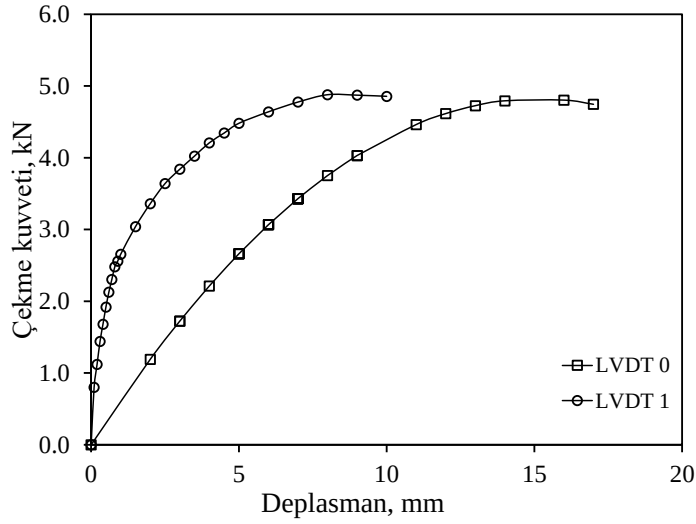


Şekil 1.102. Test no: 34 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

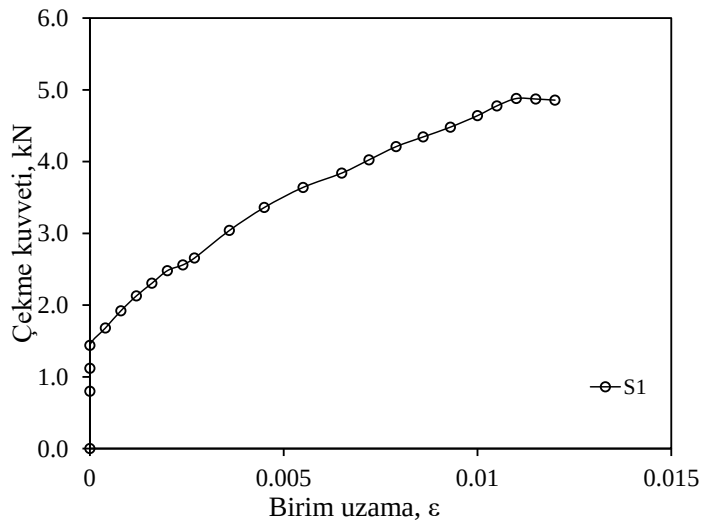
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.103. Test no: 35 deney elemanı için şematik gösterim

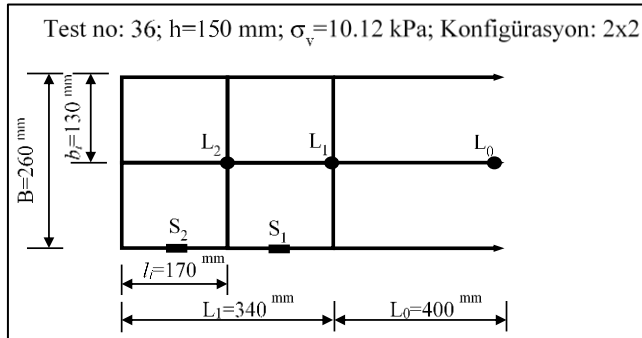


Şekil 1.104. Test no: 35 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

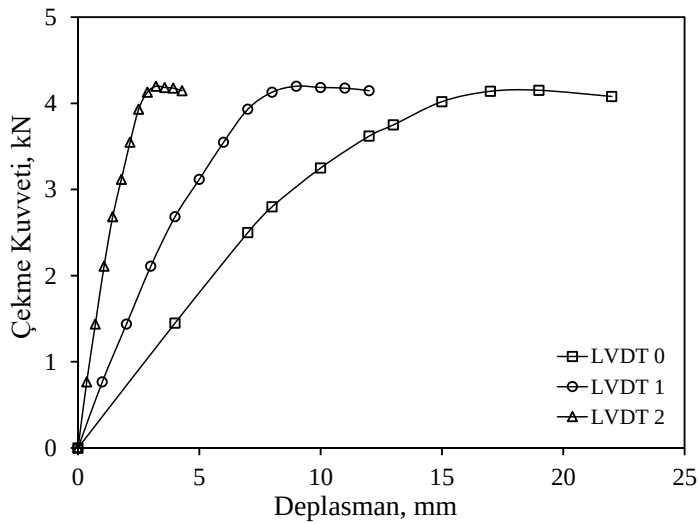


Şekil 1.105. Test no: 35 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

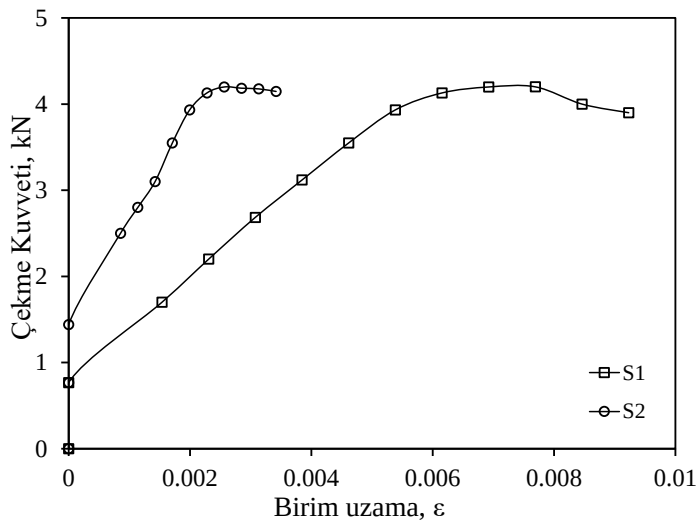
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.106. Test no: 36 deney elemanı için şematik gösterim

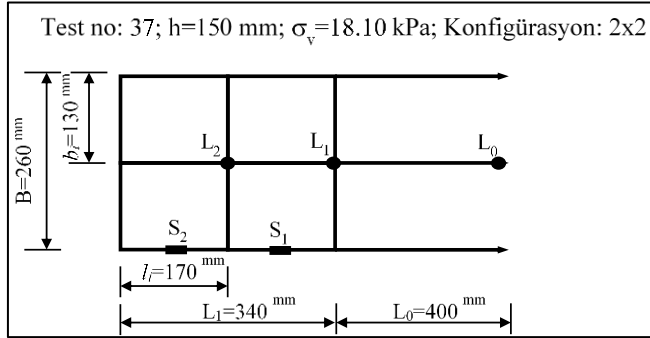


Şekil 1.107. Test no: 36 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

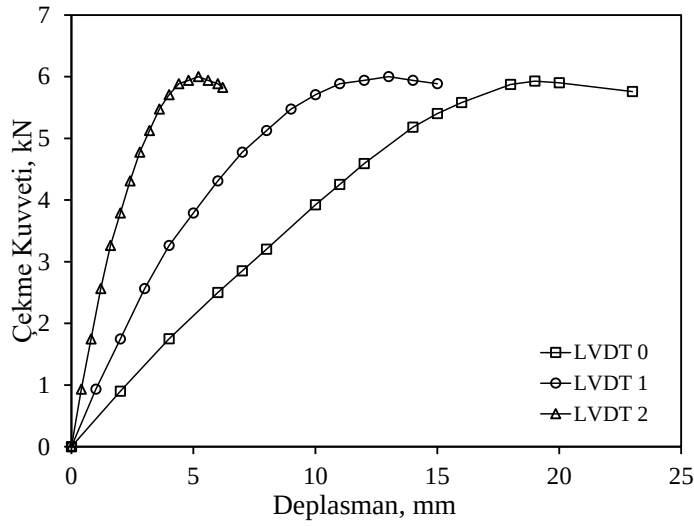


Şekil 1.108. Test no: 36 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

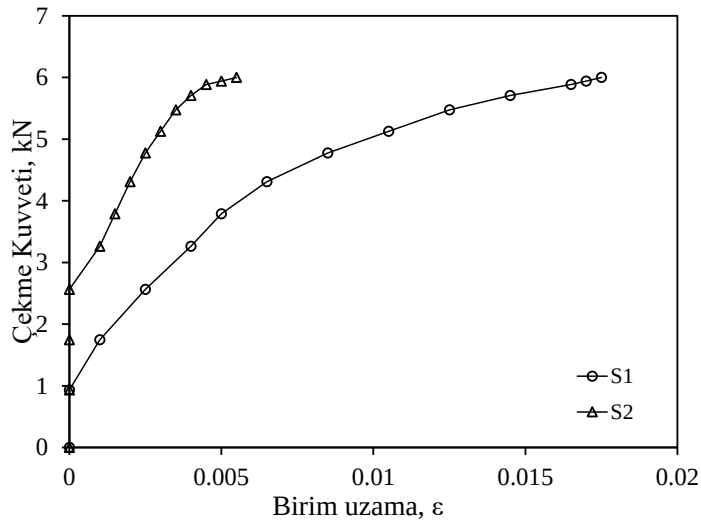
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.109. Test no: 37 deney elemanı için şematik gösterim

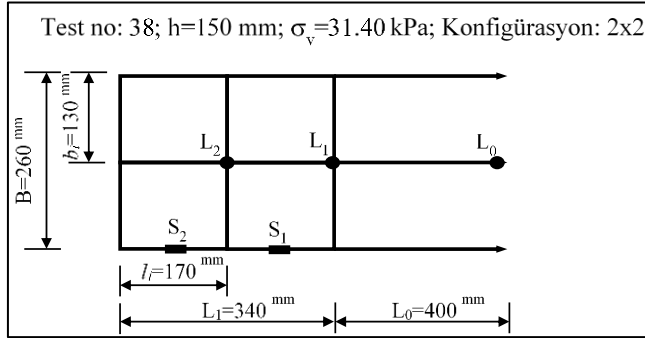


Şekil 1.110. Test no: 37 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

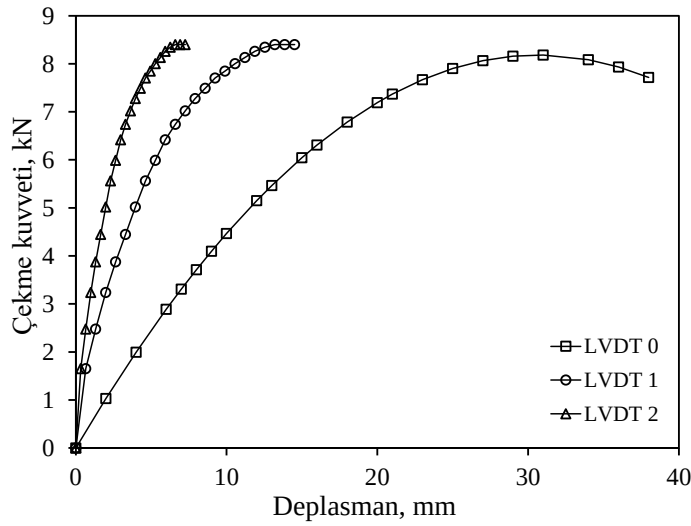


Şekil 1.111. Test no: 37 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

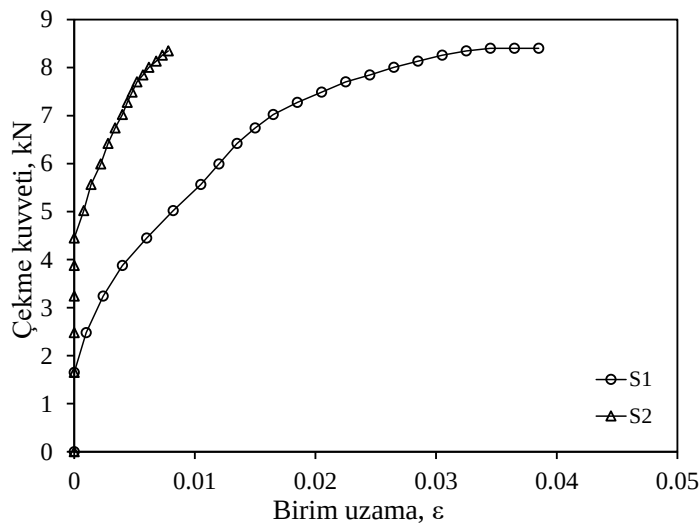
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.112. Test no: 38 deney elemanı için şematik gösterim

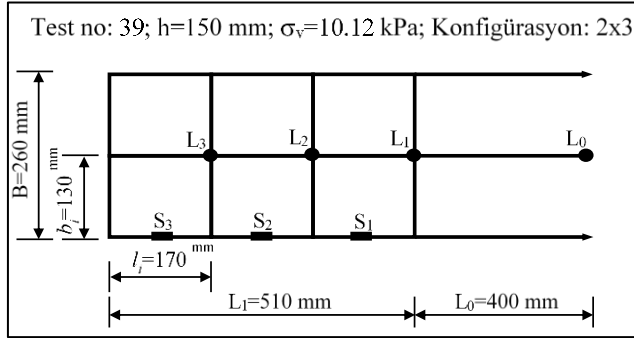


Şekil 1.113. Test no: 38 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

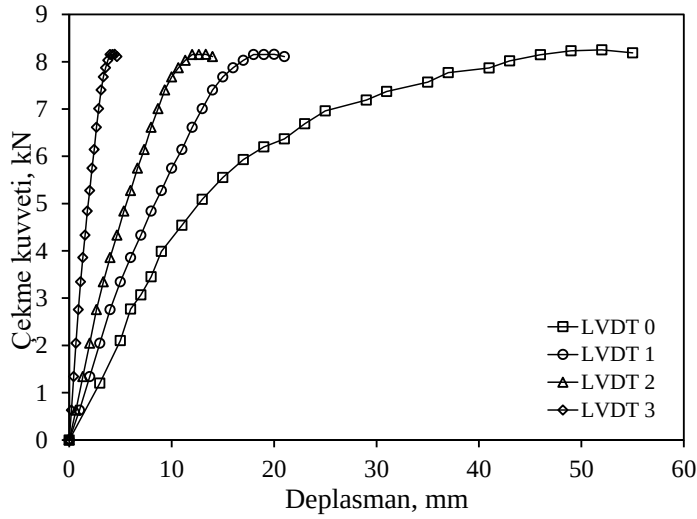


Şekil 1.114. Test no: 38 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

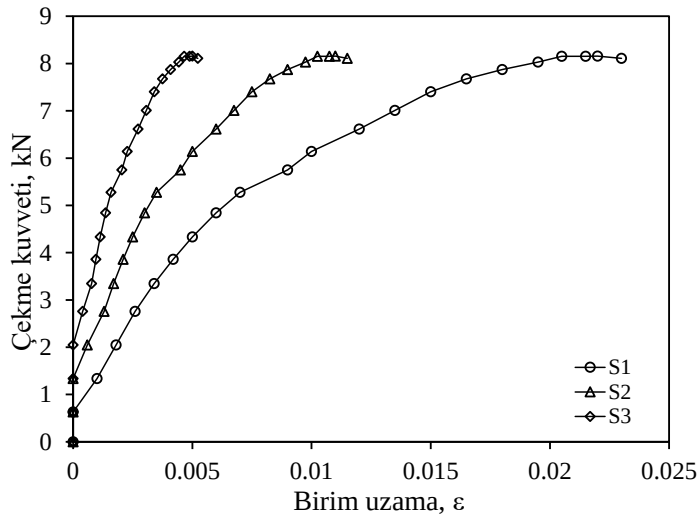
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.115. Test no: 39 deney elemanı için şematik gösterim

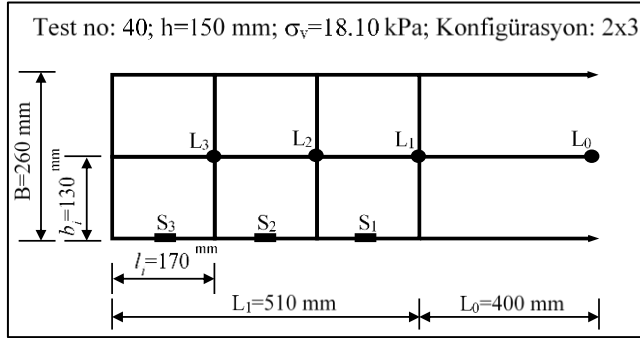


Şekil 1.116. Test no: 39 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

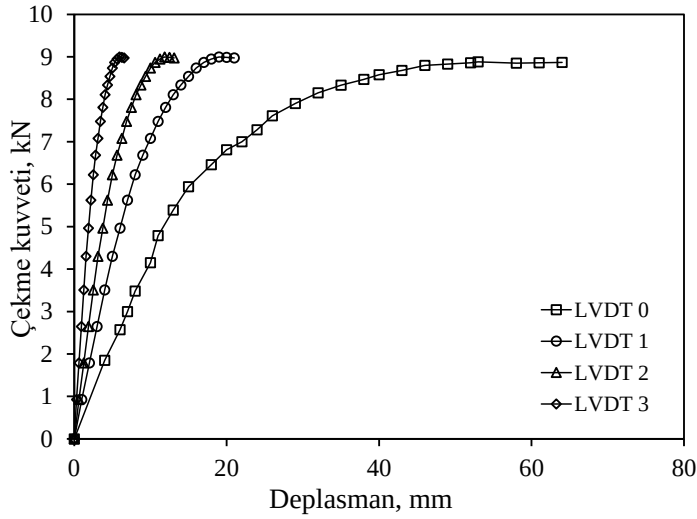


Şekil 1.117. Test no: 39 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

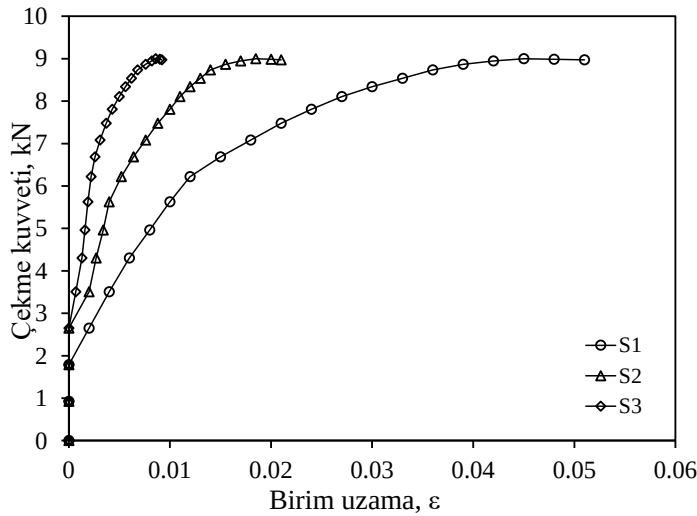
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.118. Test no: 40 deney elemanı için şematik gösterim

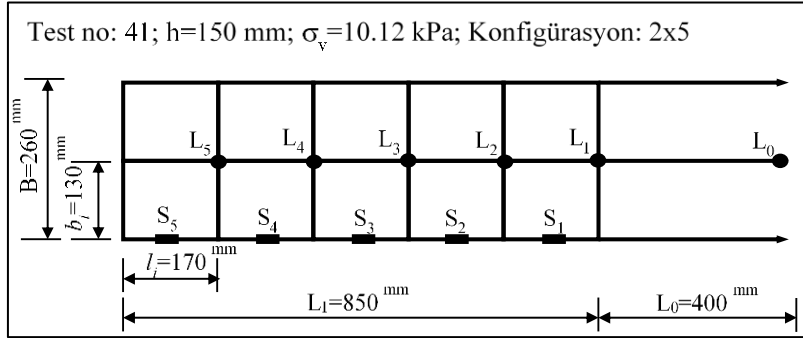


Şekil 1.119. Test no: 40 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

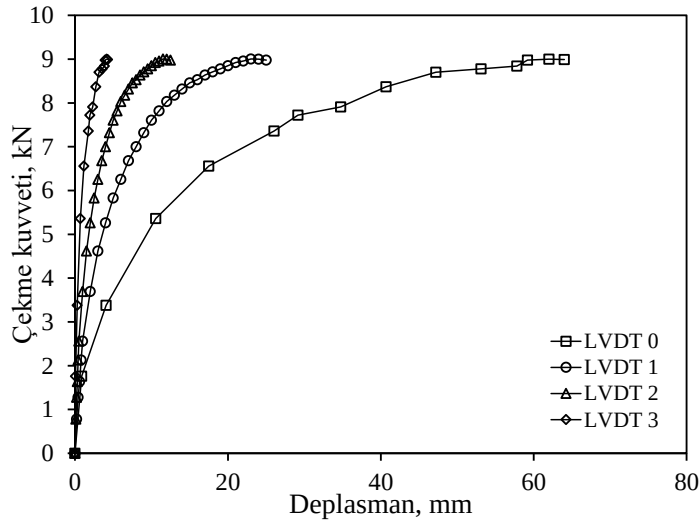


Şekil 1.120. Test no: 40 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

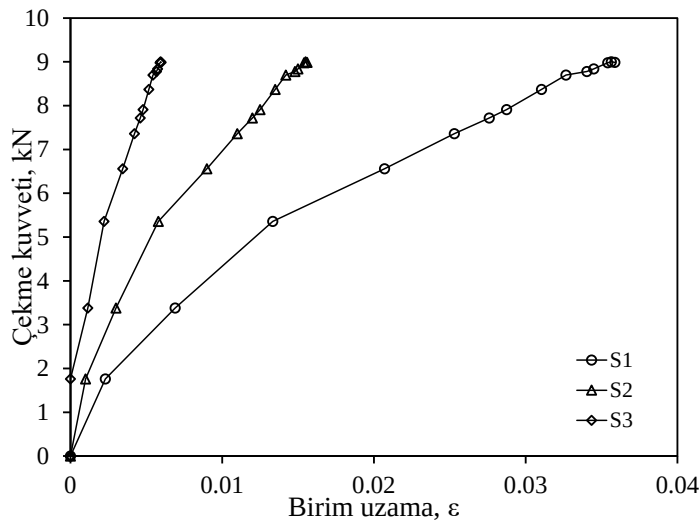
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.121. Test no: 41 deney elemanı için şematik gösterim

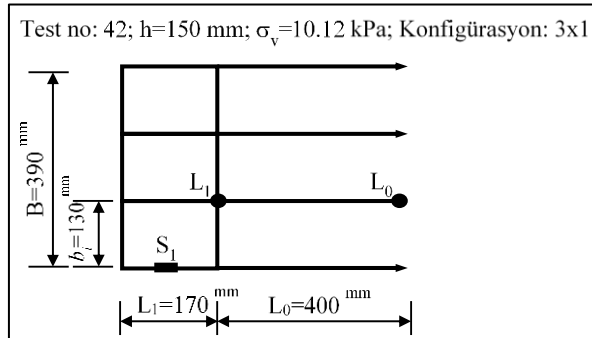


Şekil 1.122. Test no: 41 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

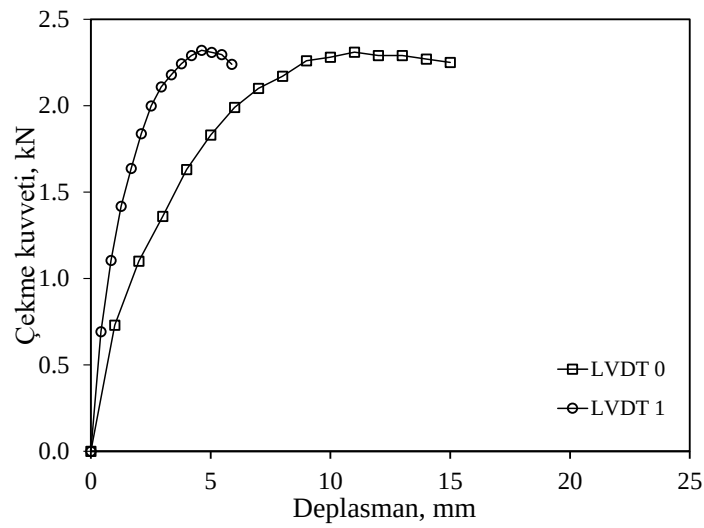


Şekil 1.123. Test no: 41 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

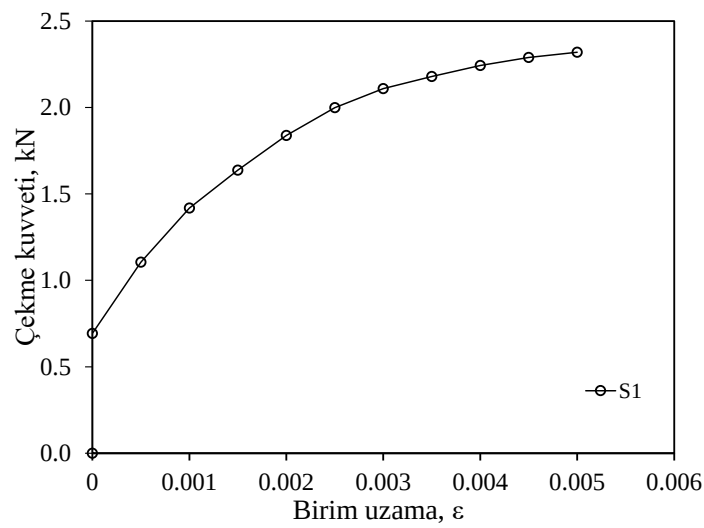
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.124. Test no: 42 deney elemanı için şematik gösterim

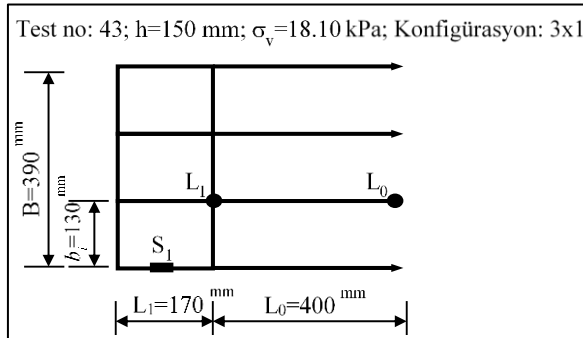


Şekil 1.125. Test no: 42 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

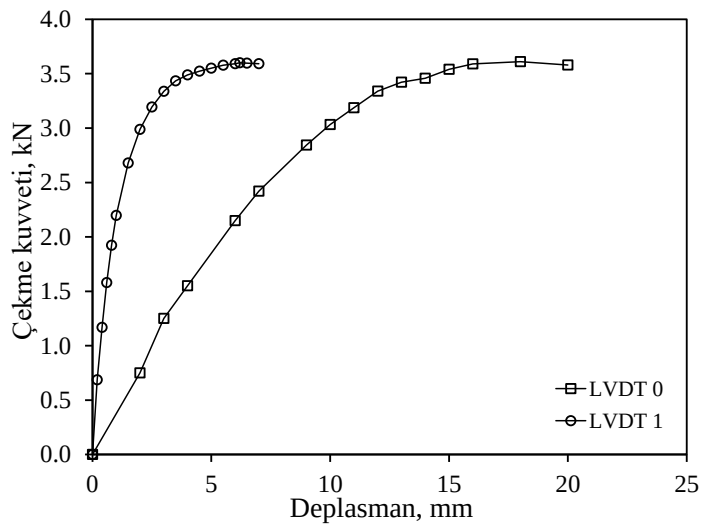


Şekil 1.126. Test no: 42 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

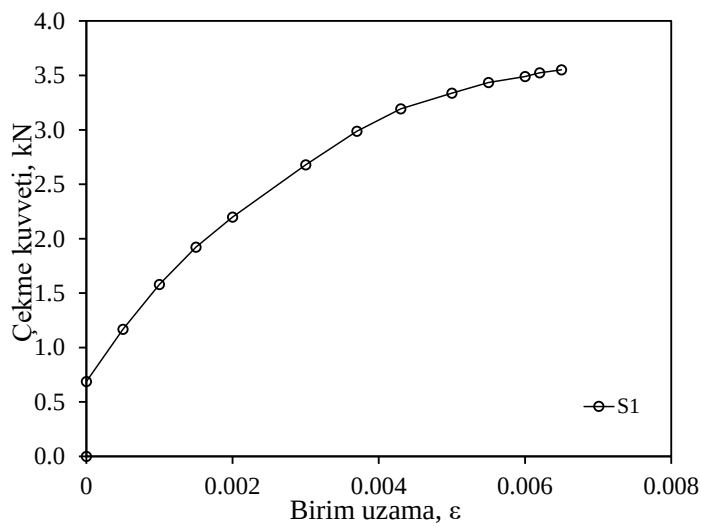
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.127. Test no: 43 deney elemanı için şematik gösterim

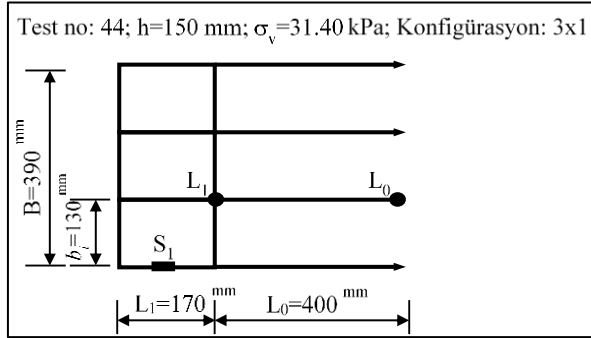


Şekil 1.128. Test no: 43 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

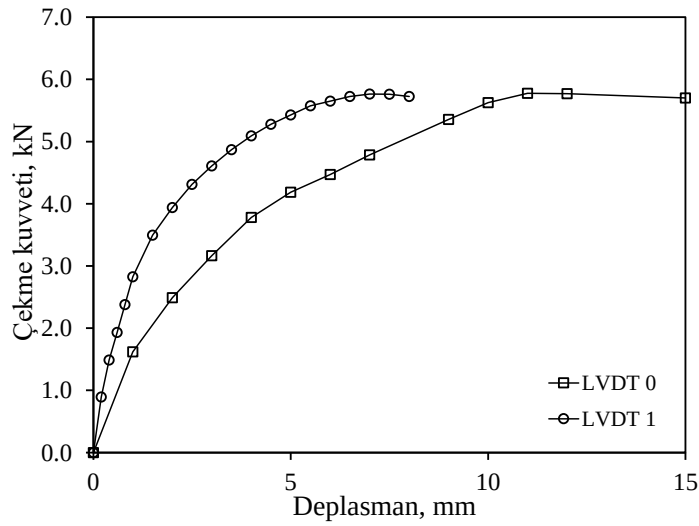


Şekil 1.129. Test no: 43 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

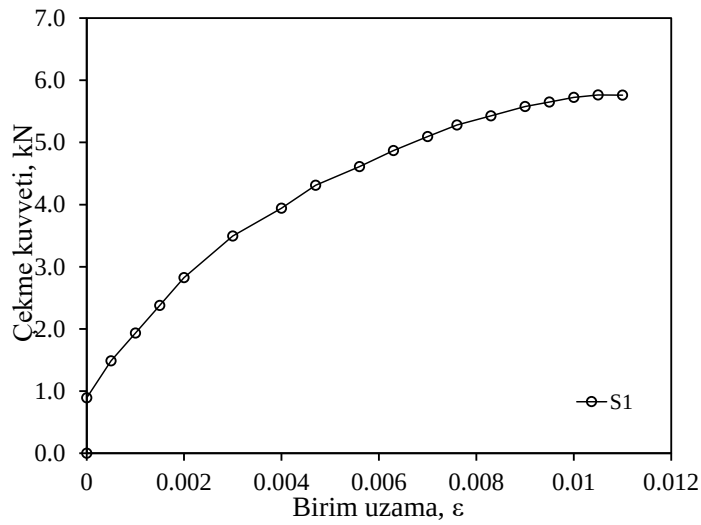
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.130. Test no: 44 deney elemanı için şematik gösterim

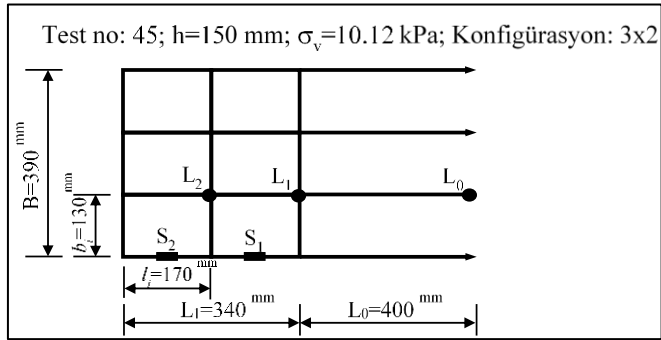


Şekil 1.131. Test no: 44 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

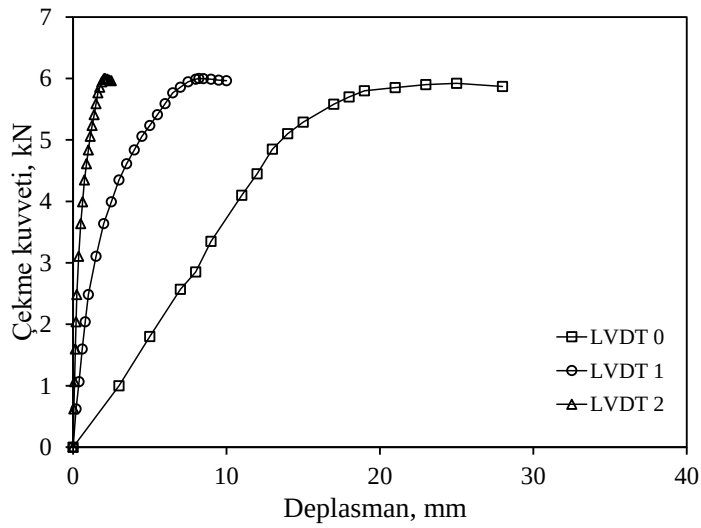


Şekil 1.132. Test no: 44 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

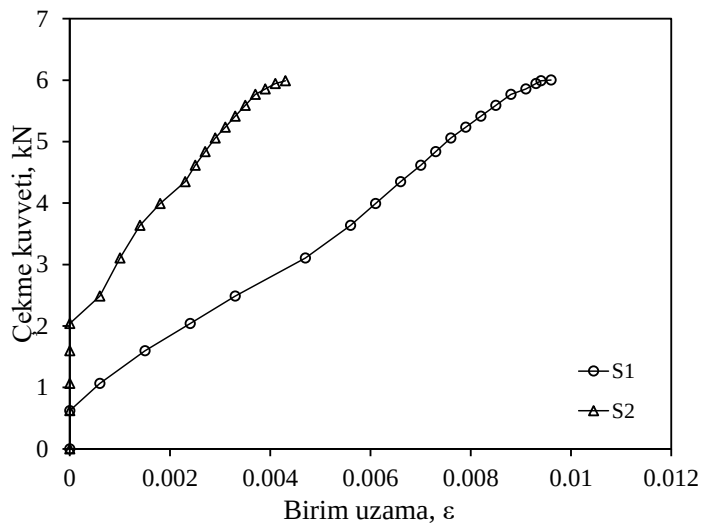
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.133. Test no: 45 deney elemanı için şematik gösterim

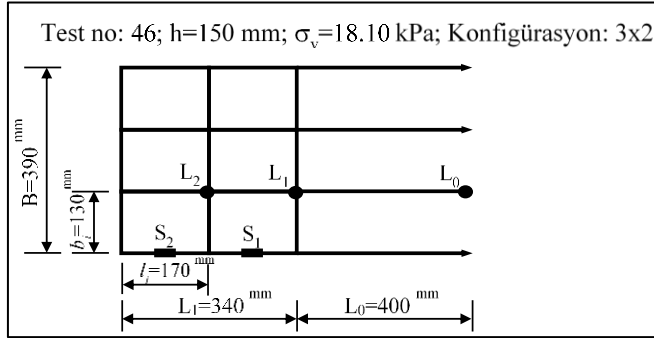


Şekil 1.134. Test no: 45 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

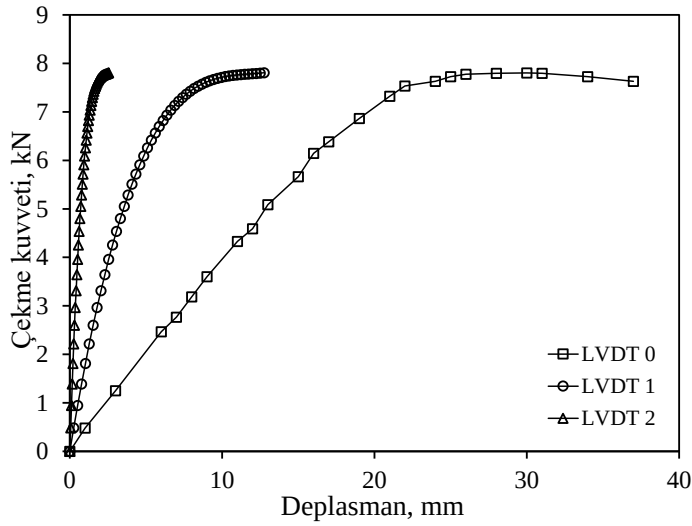


Şekil 1.135. Test no: 45 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

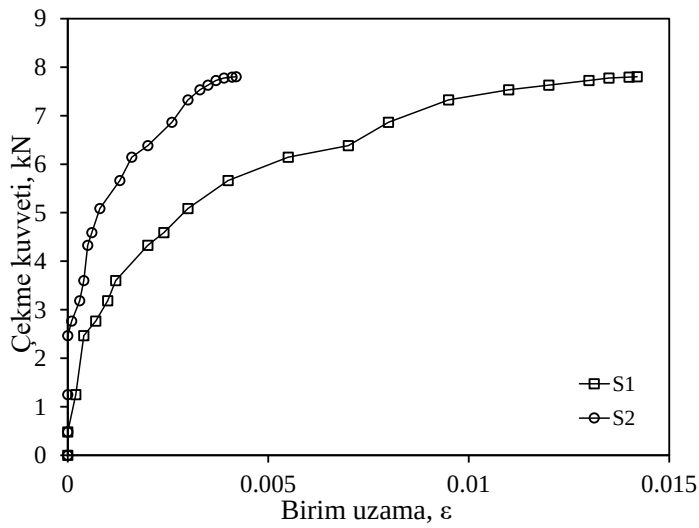
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.136. Test no: 46 deney elemanı için şematik gösterim

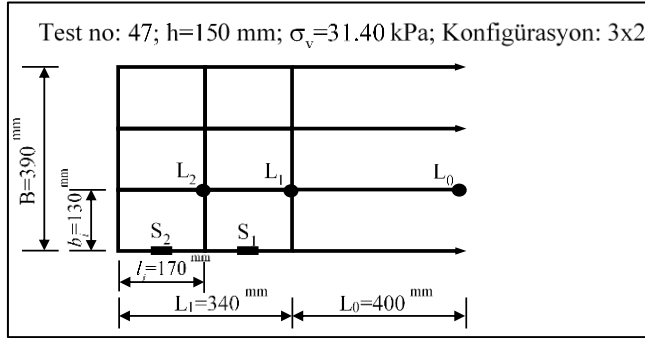


Şekil 1.137. Test no: 46 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

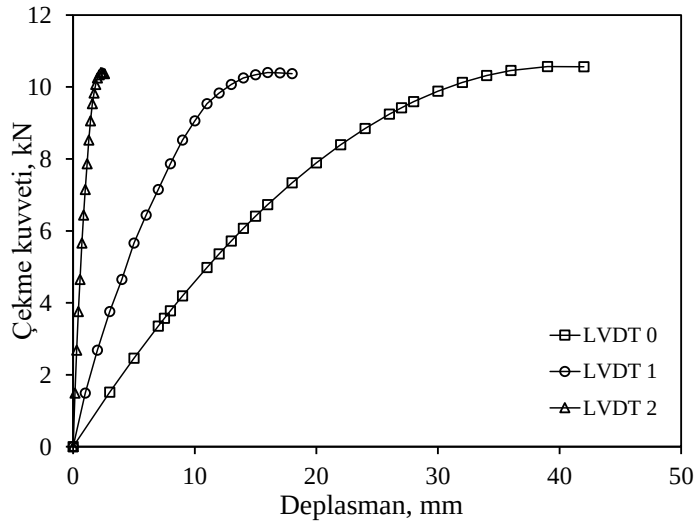


Şekil 1.138. Test no: 46 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

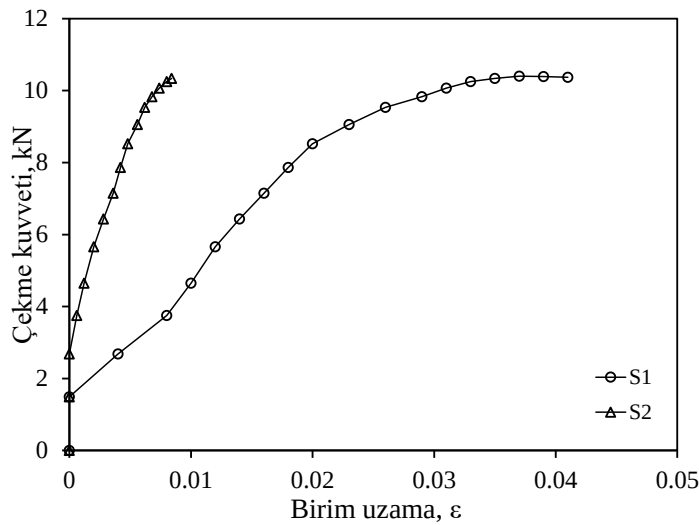
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.139. Test no: 47 deney elemanı için şematik gösterim

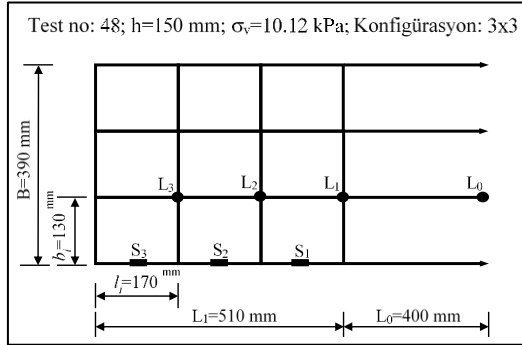


Şekil 1.140. Test no: 47 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

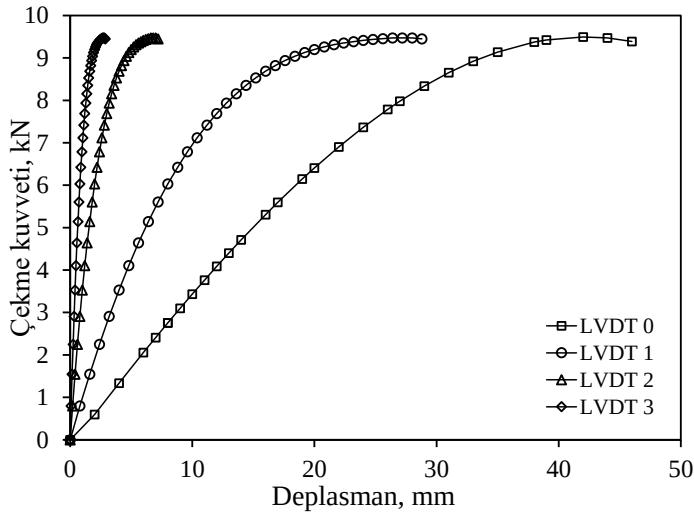


Şekil 1.141. Test no: 47 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

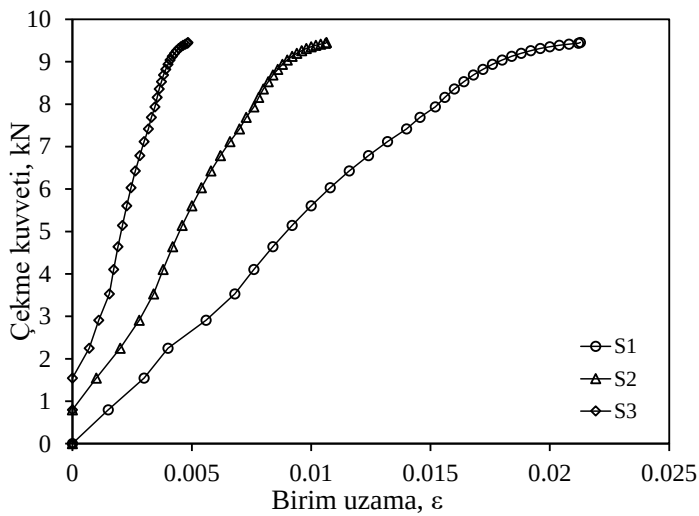
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.142. Test no: 48 deney elemanı için şematik gösterim

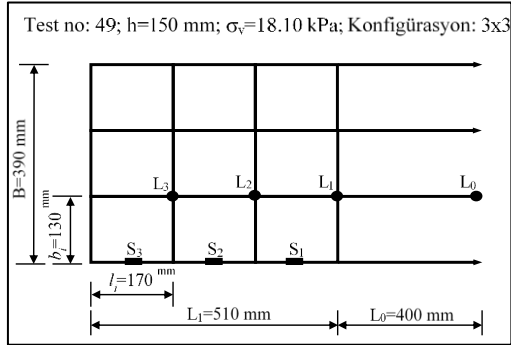


Şekil 1.143. Test no: 48 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

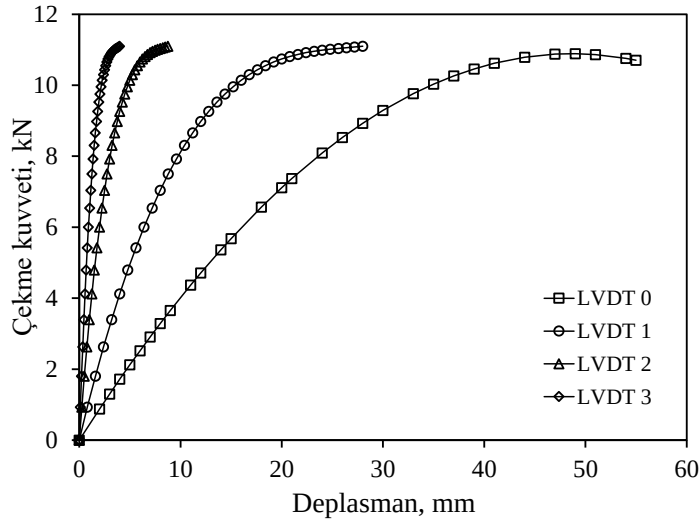


Şekil 1.144. Test no: 48 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

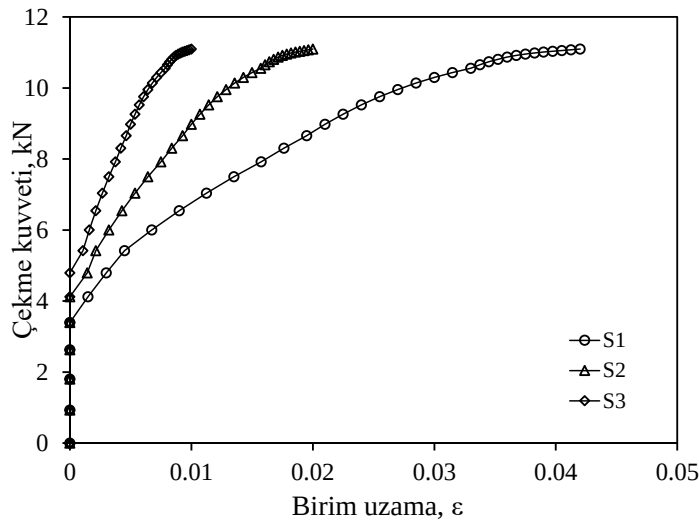
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.145. Test no: 49 deney elemanı için şematik gösterim

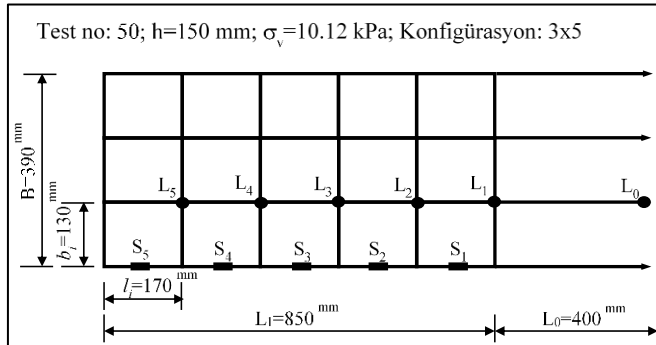


Şekil 1.146. Test no: 49 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

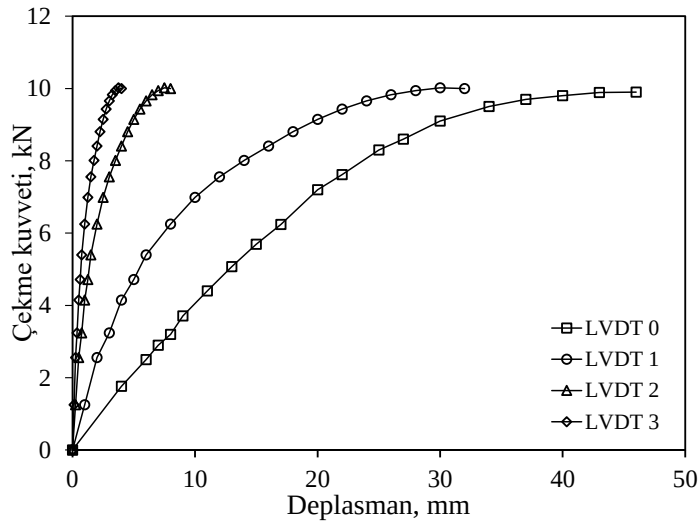


Şekil 1.147. Test no: 49 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

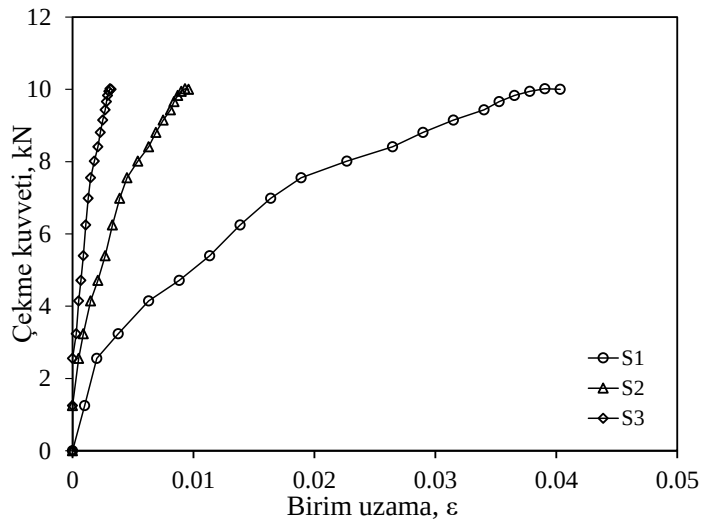
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.148. Test no: 50 deney elemanı için şematik gösterim

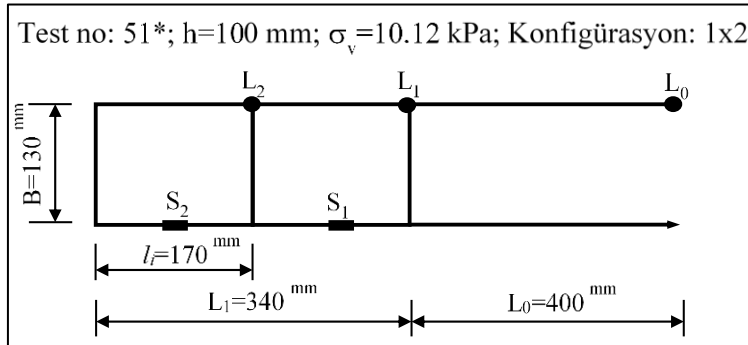


Şekil 1.149. Test no: 50 deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

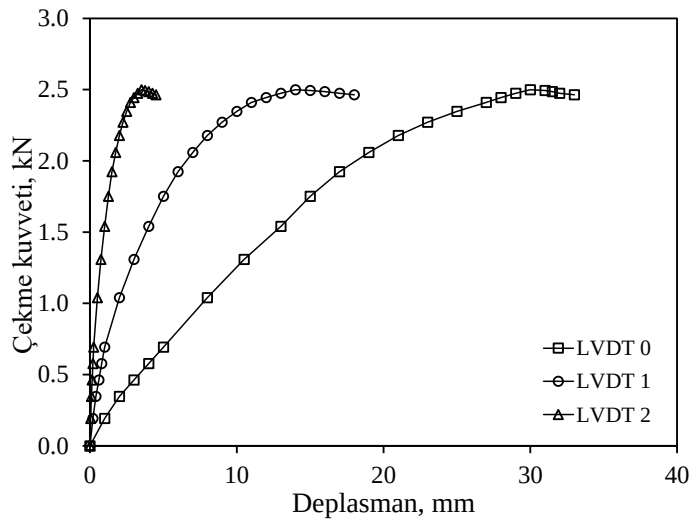


Şekil 1.150. Test no: 50 deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

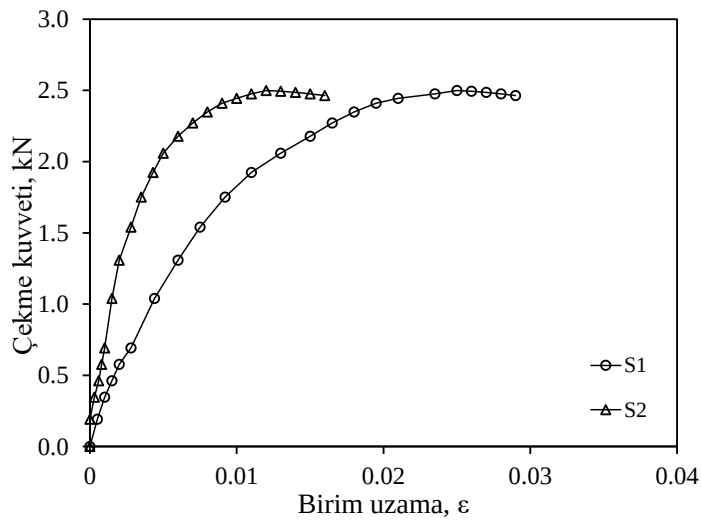
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.151. Test no: 51* deney elemanı için şematik gösterim

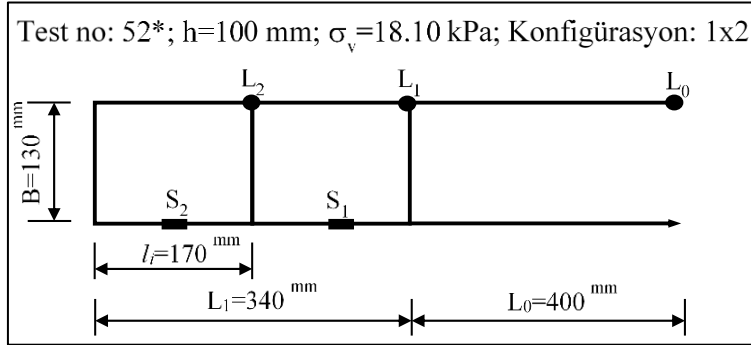


Şekil 1.152. Test no: 51* deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

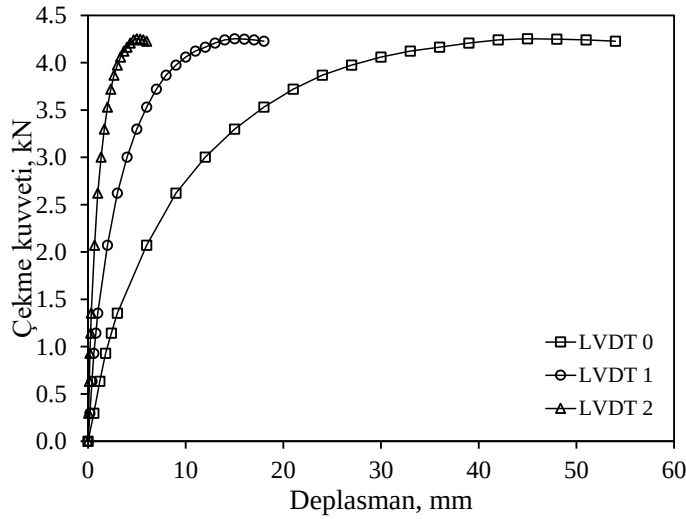


Şekil 1.153. Test no: 51* deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

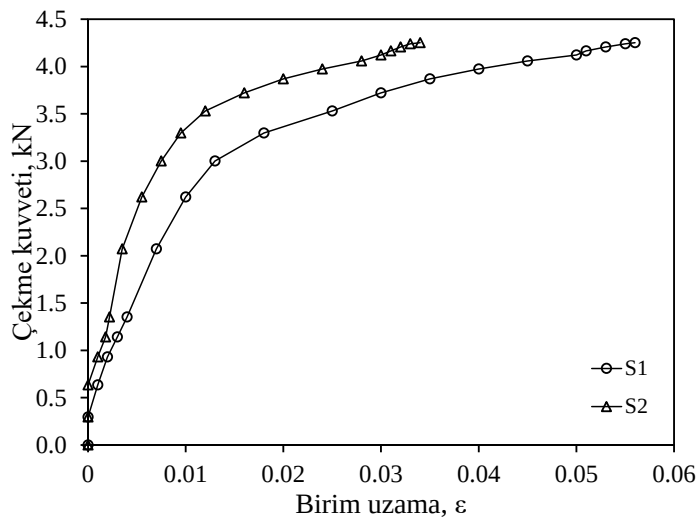
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.154. Test no: 52* deney elemanı için şematik gösterim

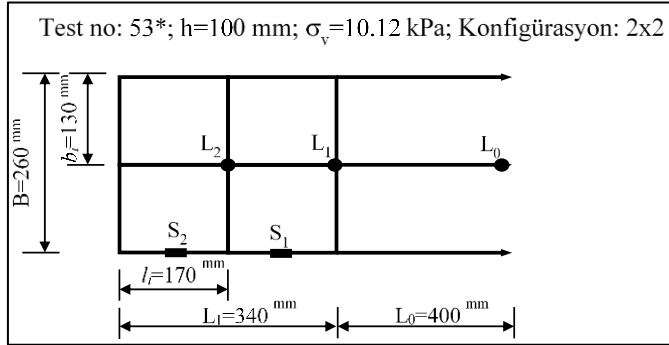


Şekil 1.155. Test no: 52* deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

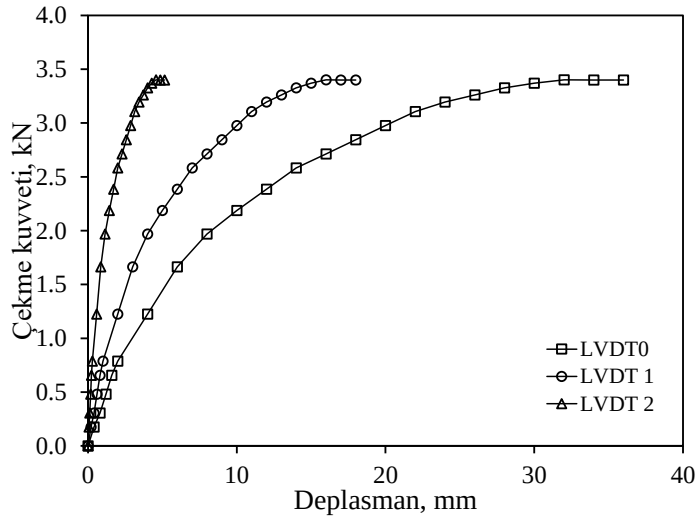


Şekil 1.156. Test no: 52* deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

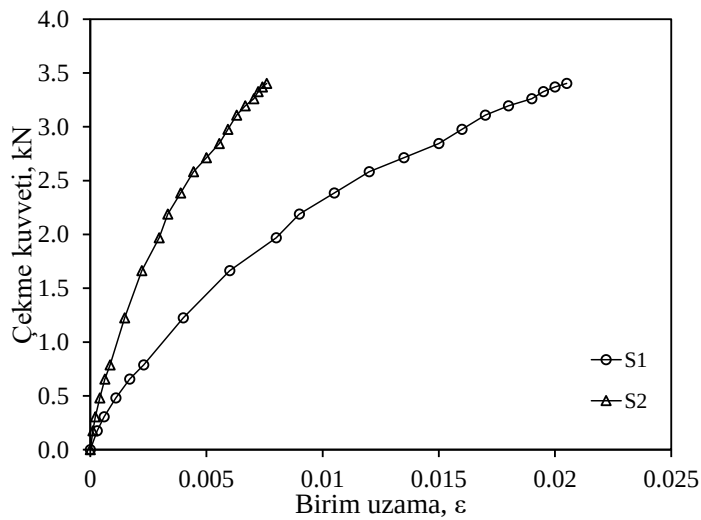
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.157. Test no: 53* deney elemanı için şematik gösterim

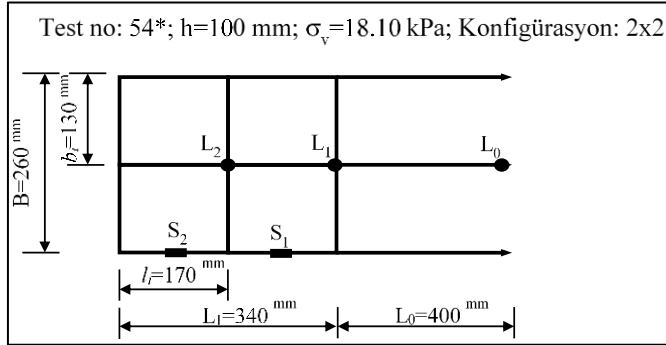


Şekil 1.158. Test no: 53* deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

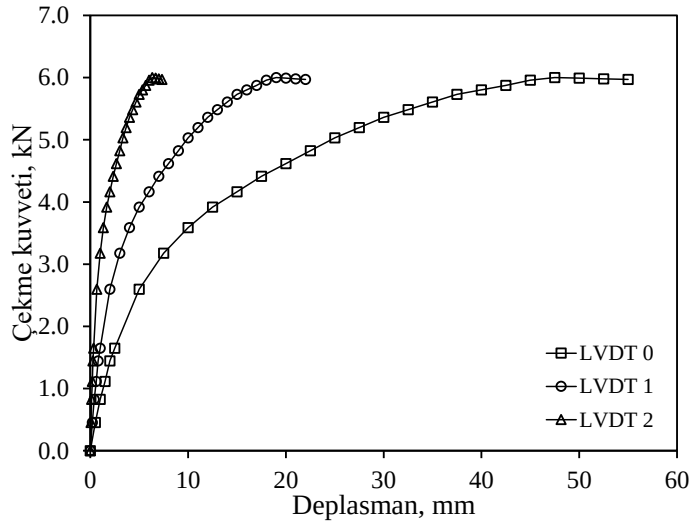


Şekil 1.159. Test no: 53* deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

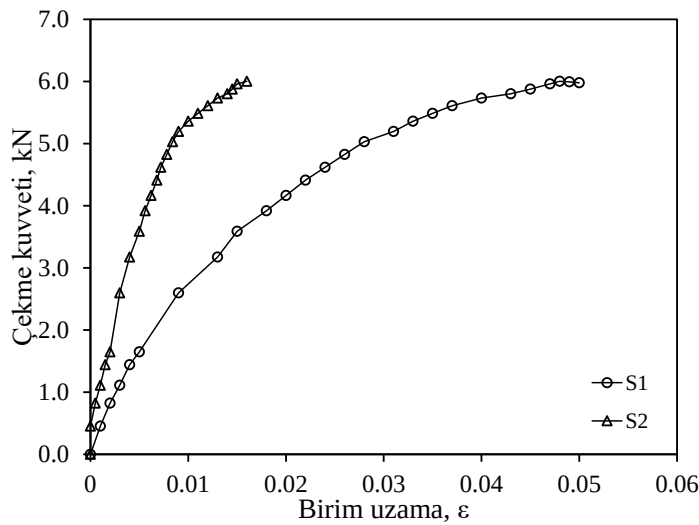
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.160. Test no: 54* deney elemanı için şematik gösterim

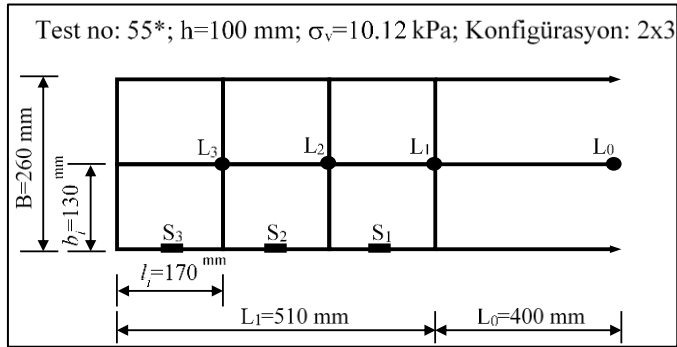


Şekil 1.161. Test no: 54* deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

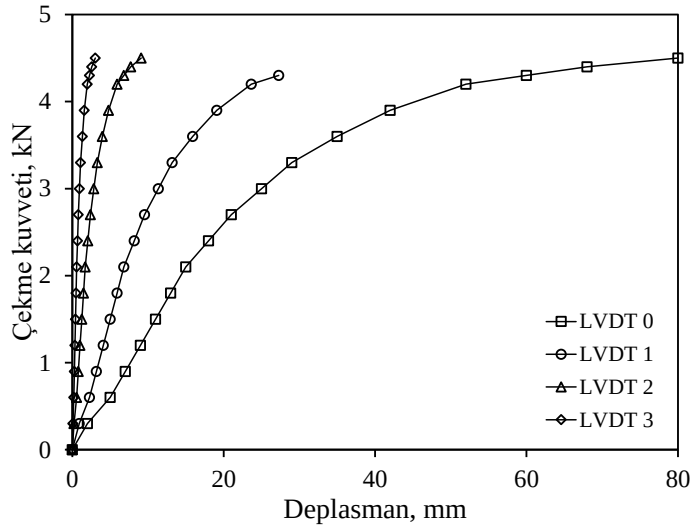


Şekil 1.162. Test no: 54* deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

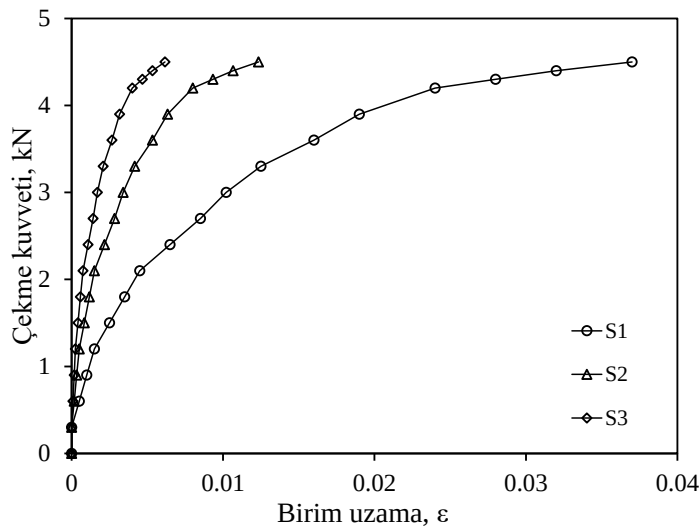
EK-1. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme kuvveti-deplasman ve çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri



Şekil 1.163. Test no: 55* deney elemanı için şematik gösterim

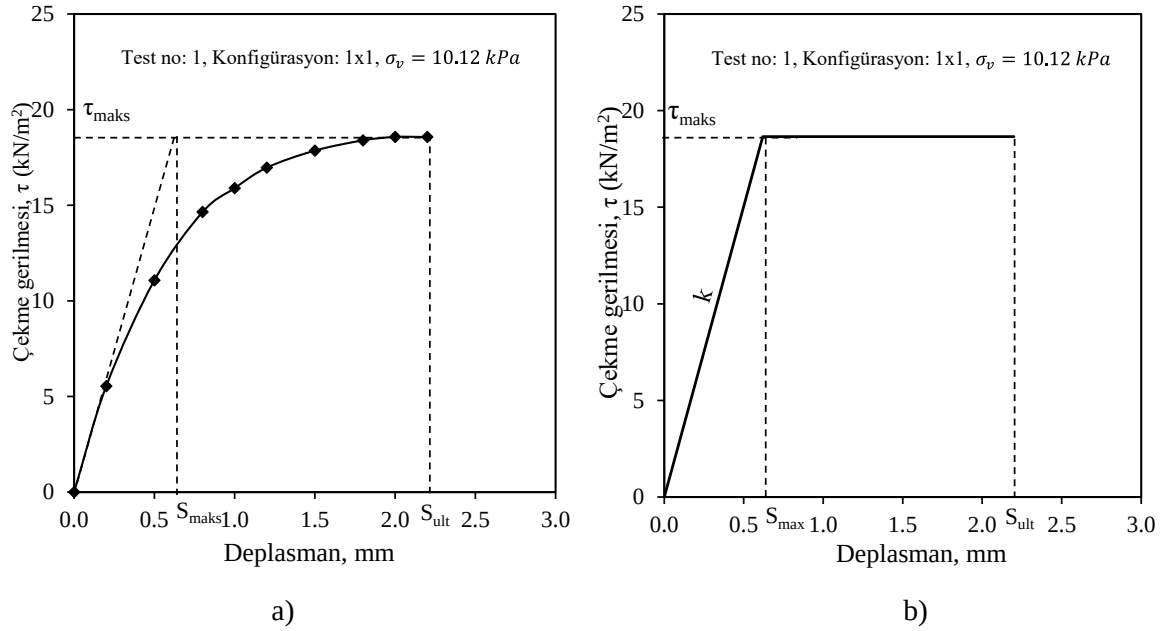


Şekil 1.164. Test no: 55* deney elemanına ait çekme kuvveti-deplasman ilişkisi

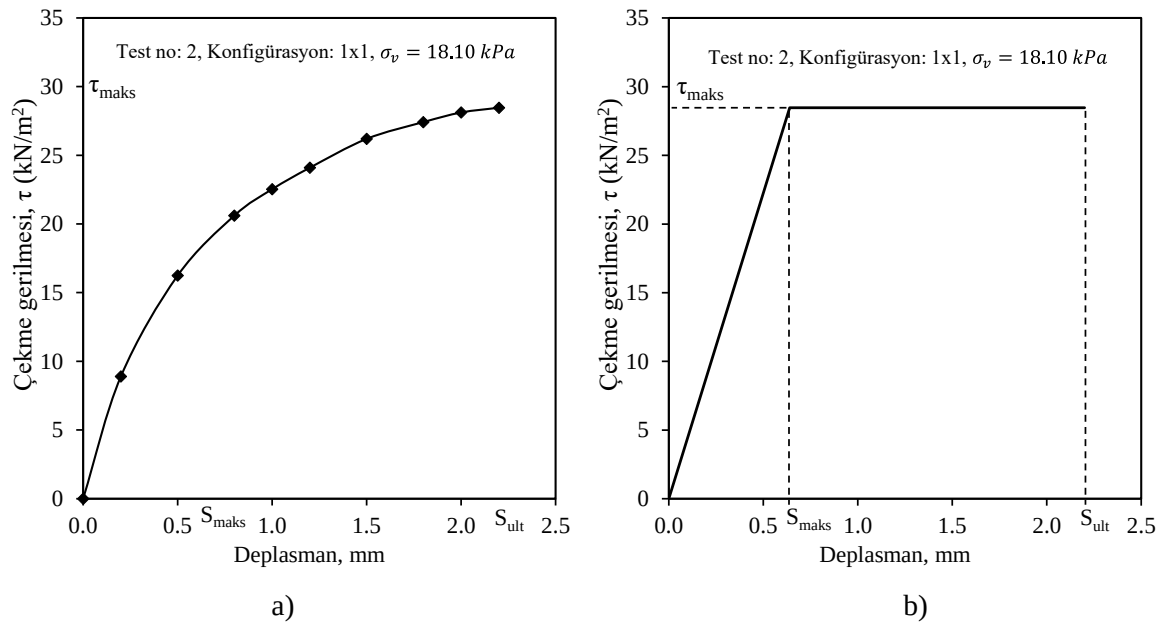


Şekil 1.165. Test no: 55* deney elemanına ait çekme kuvveti-birim deformasyon ilişkisi

EK-2. Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

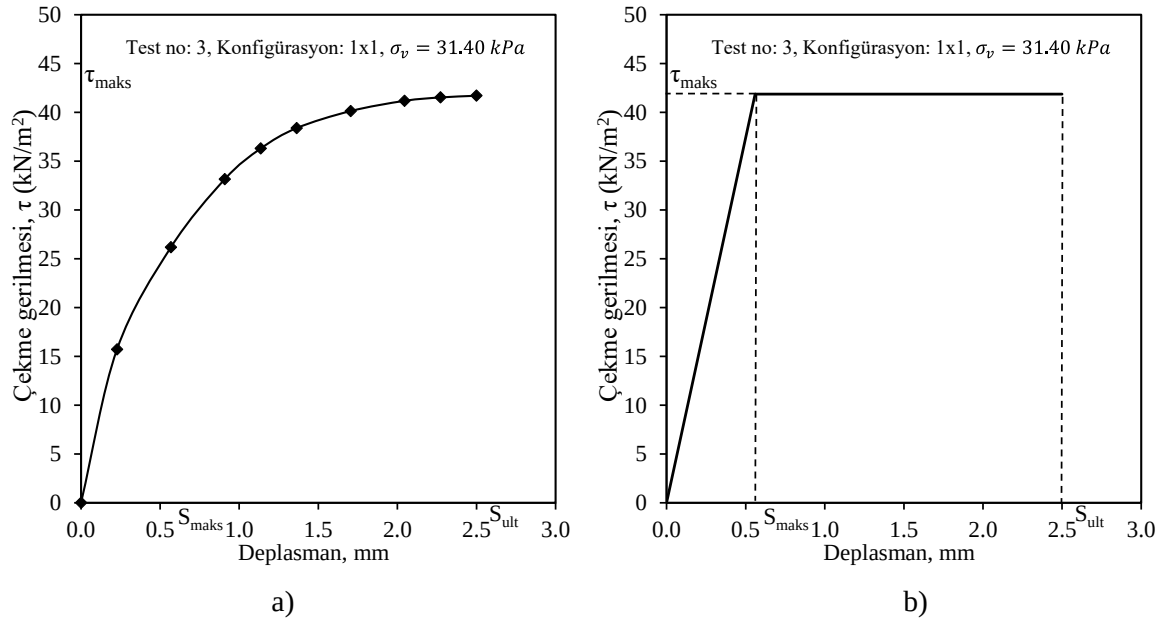


Şekil 2.1. Test no:1 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

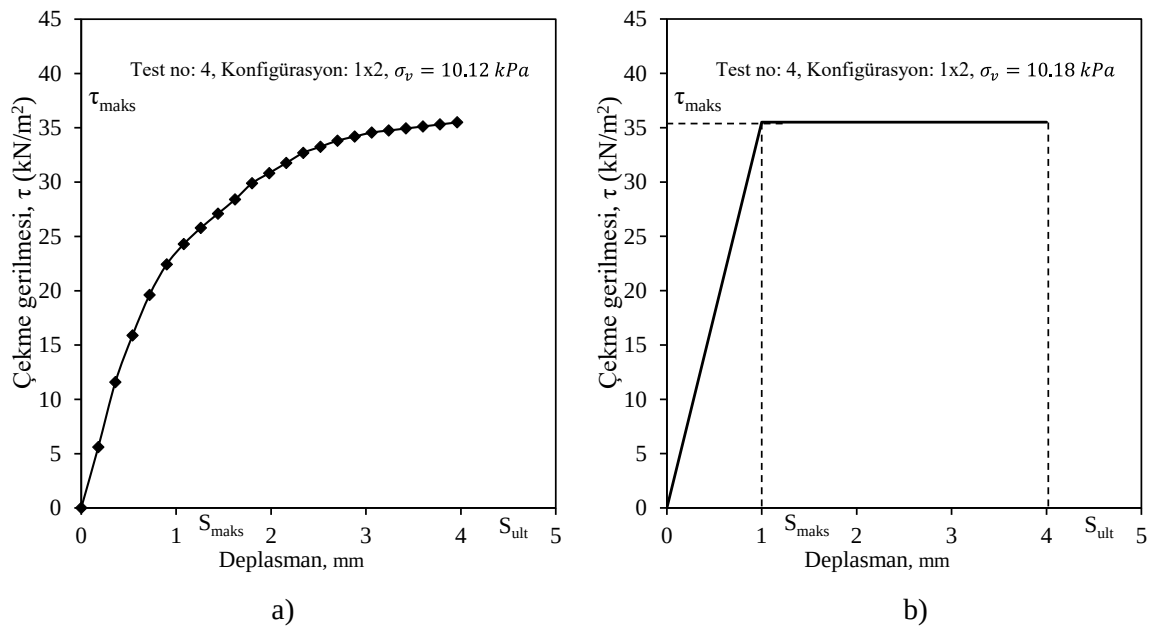


Şekil 2.2. Test no: 2 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

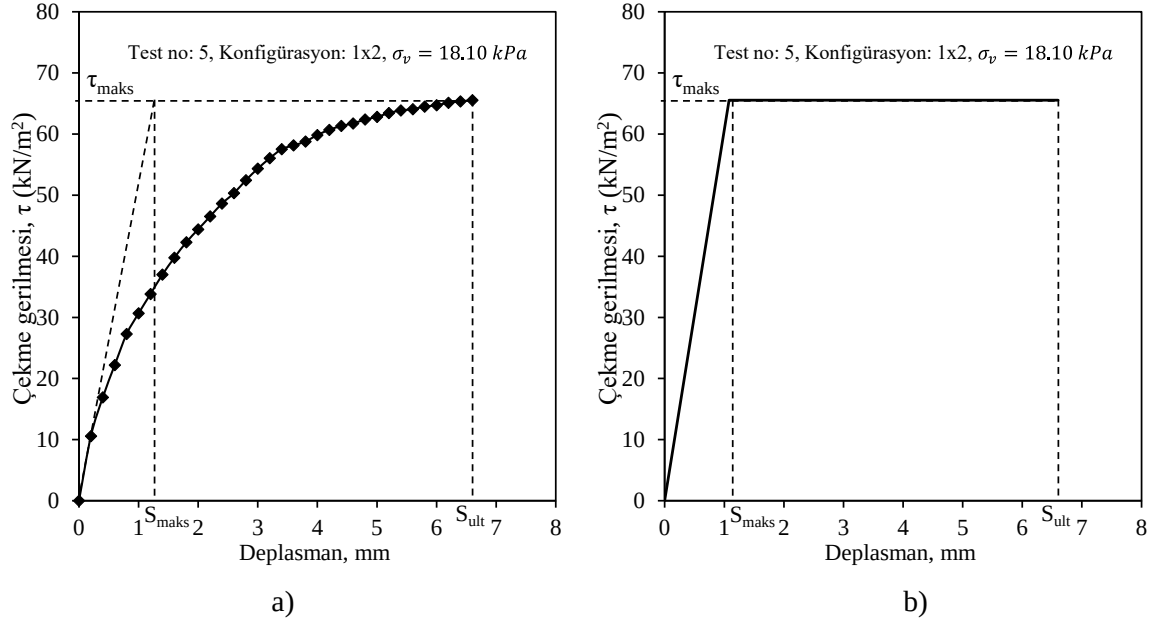


Şekil 2.3. Test no: 3 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

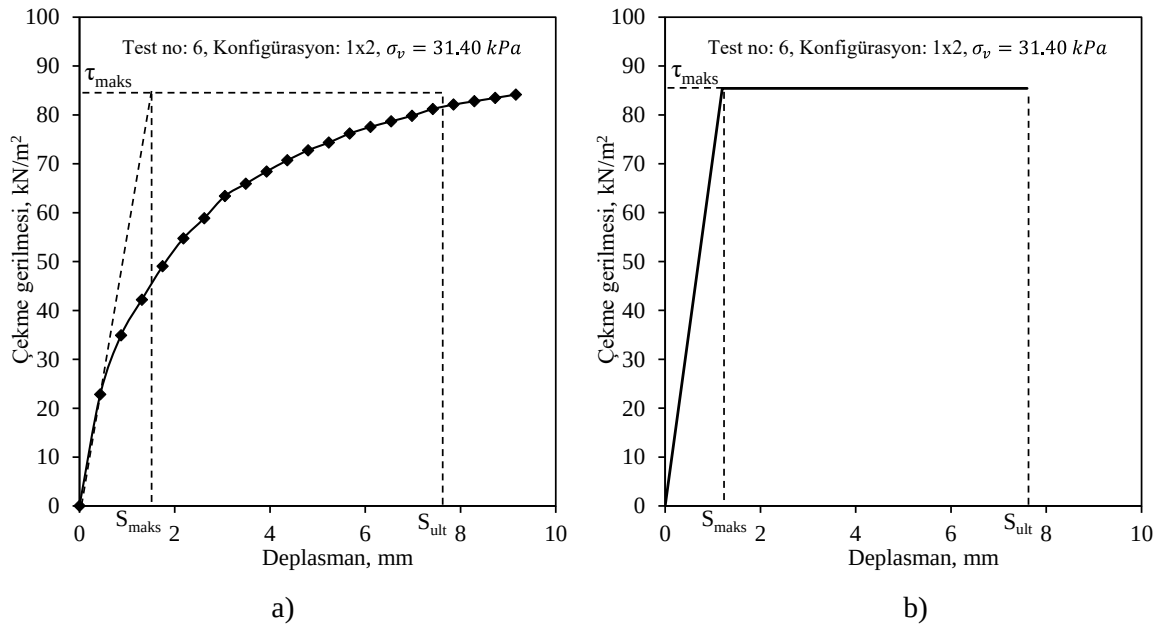


Şekil 2.4. Test no: 4 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

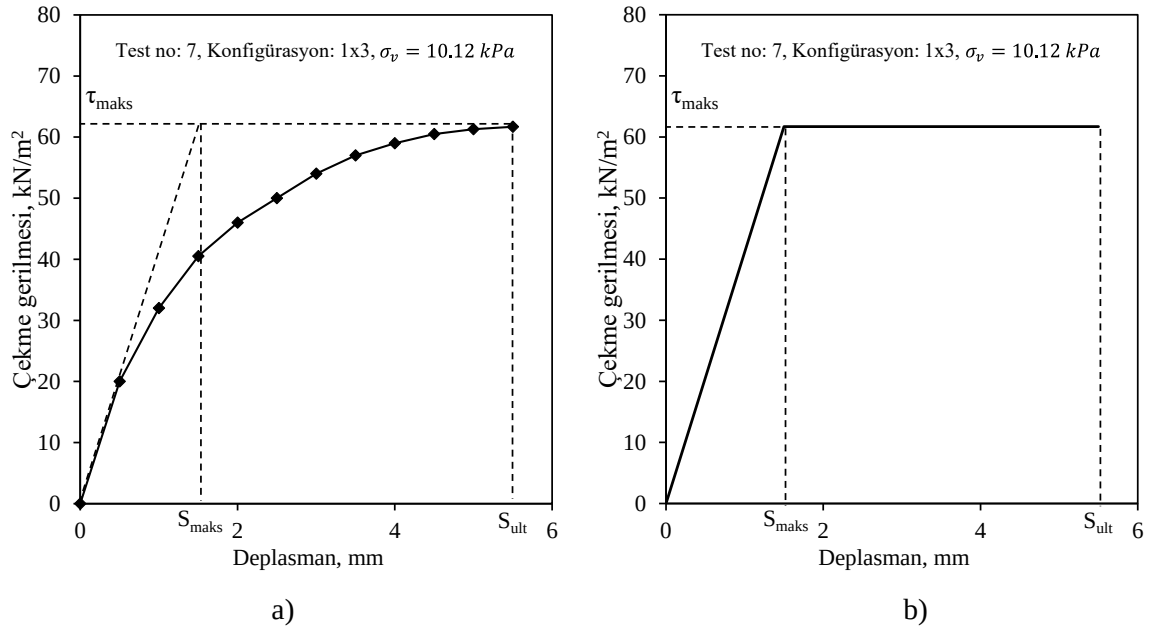


Şekil 2.5. Test no: 5 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

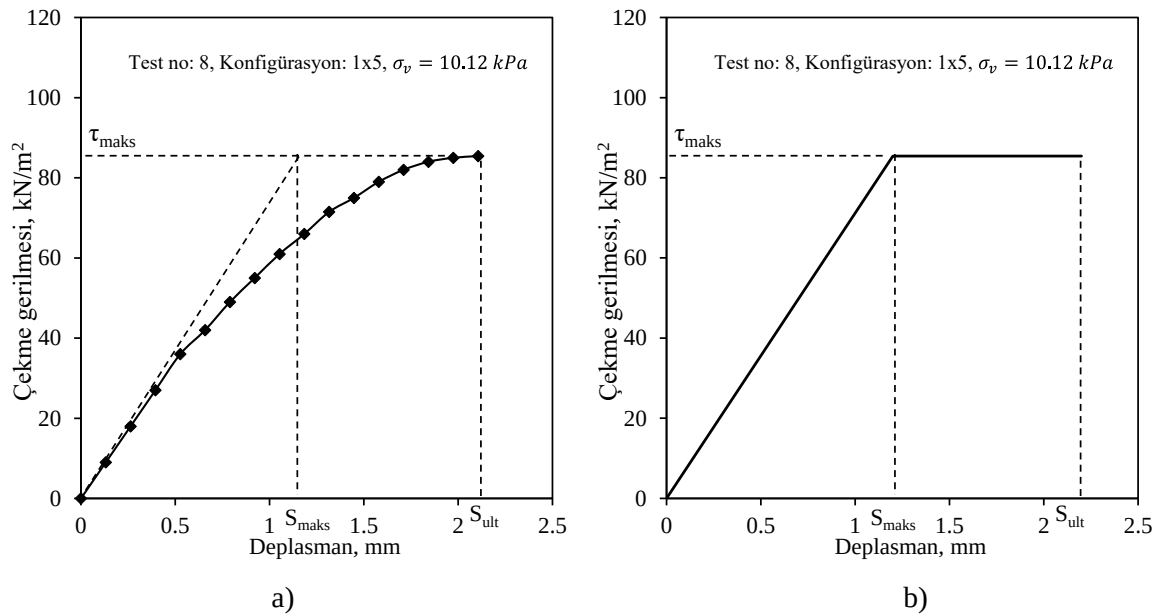


Şekil 2.6. Test no: 6 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

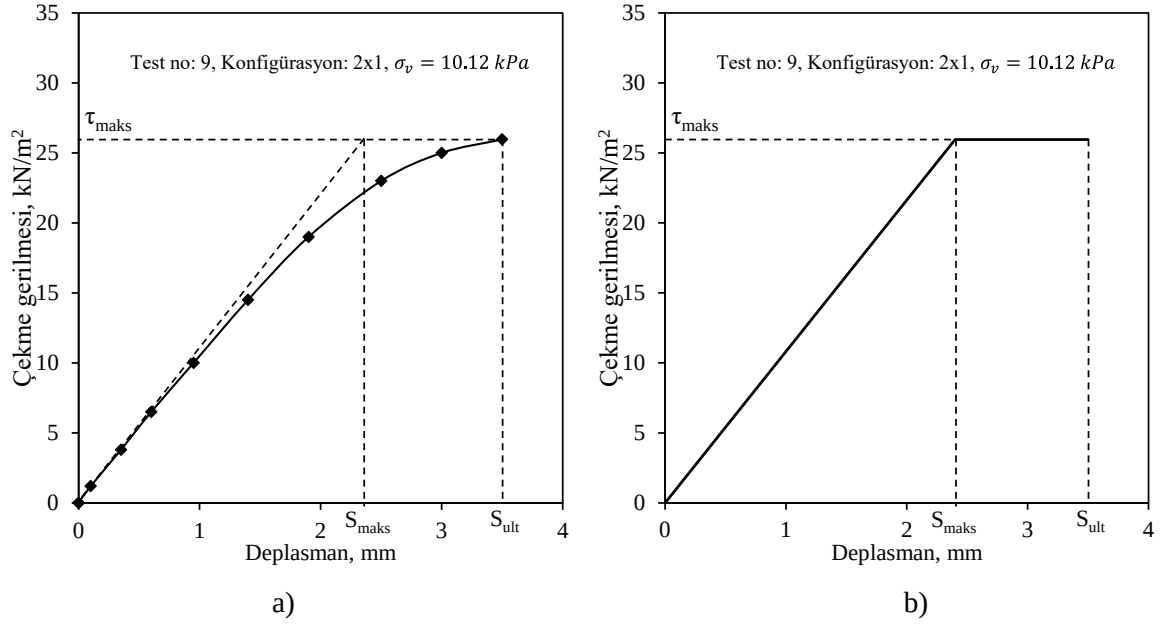


Şekil 2.7. Test no: 7 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

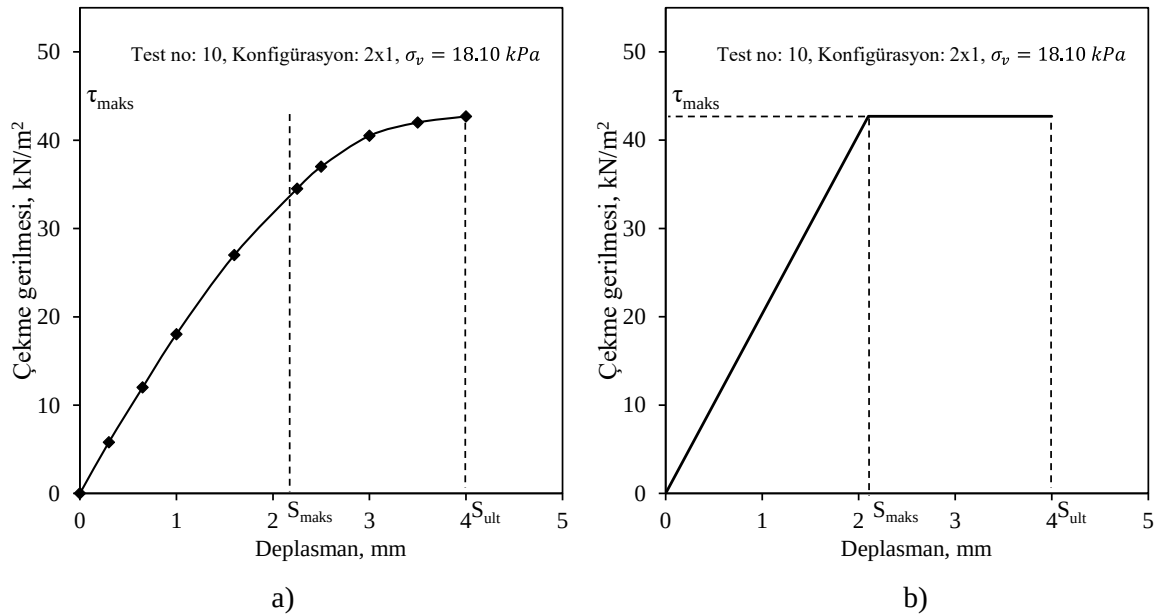


Şekil 2.8. Test no: 8 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

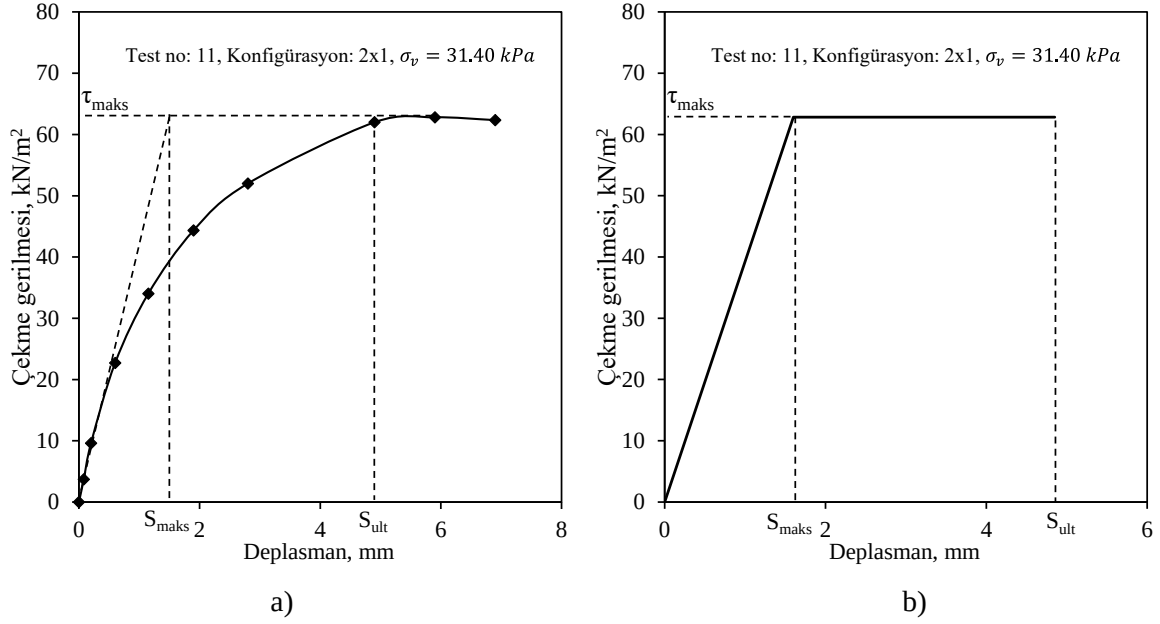


Şekil 2.9. Test no: 9 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

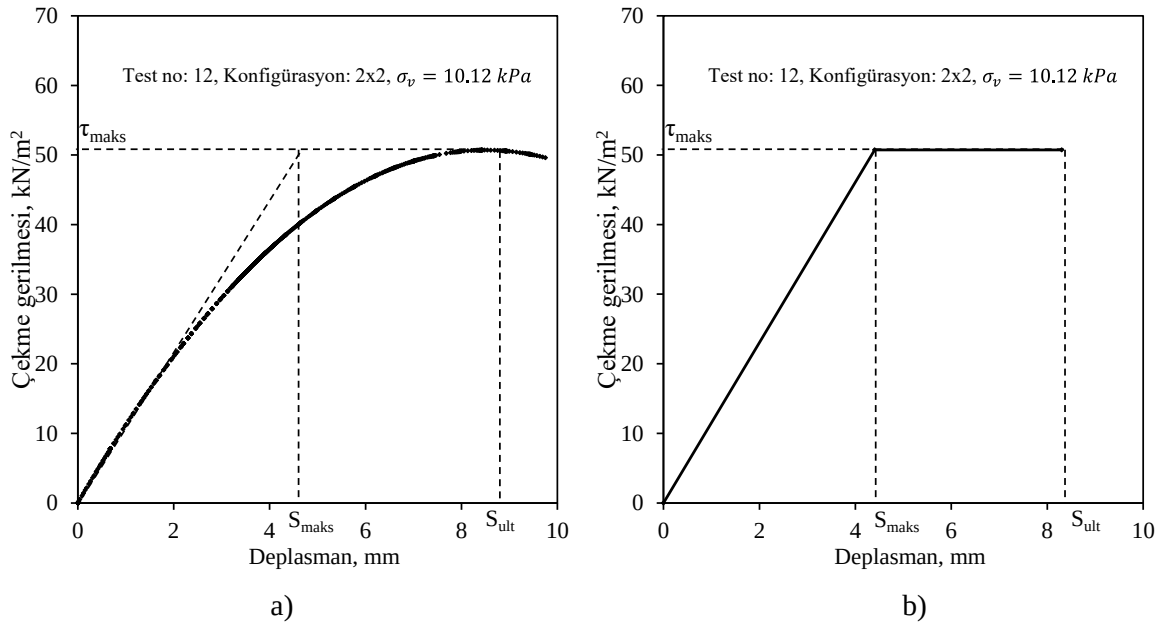


Şekil 2.10. Test no: 10 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

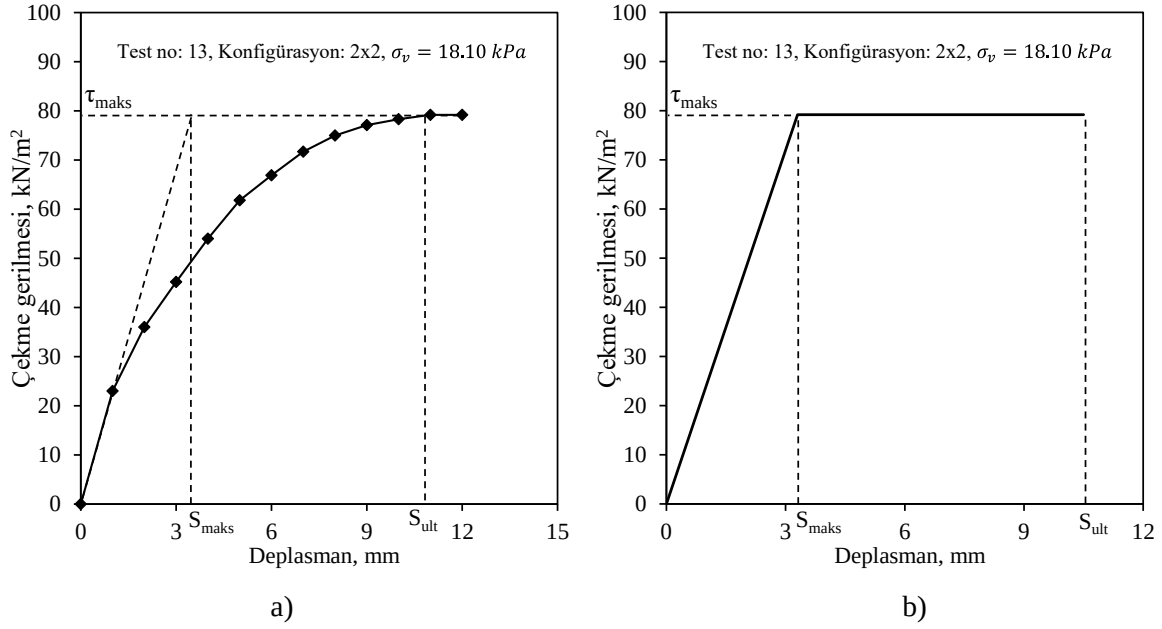


Şekil 2.11. Test no: 11 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

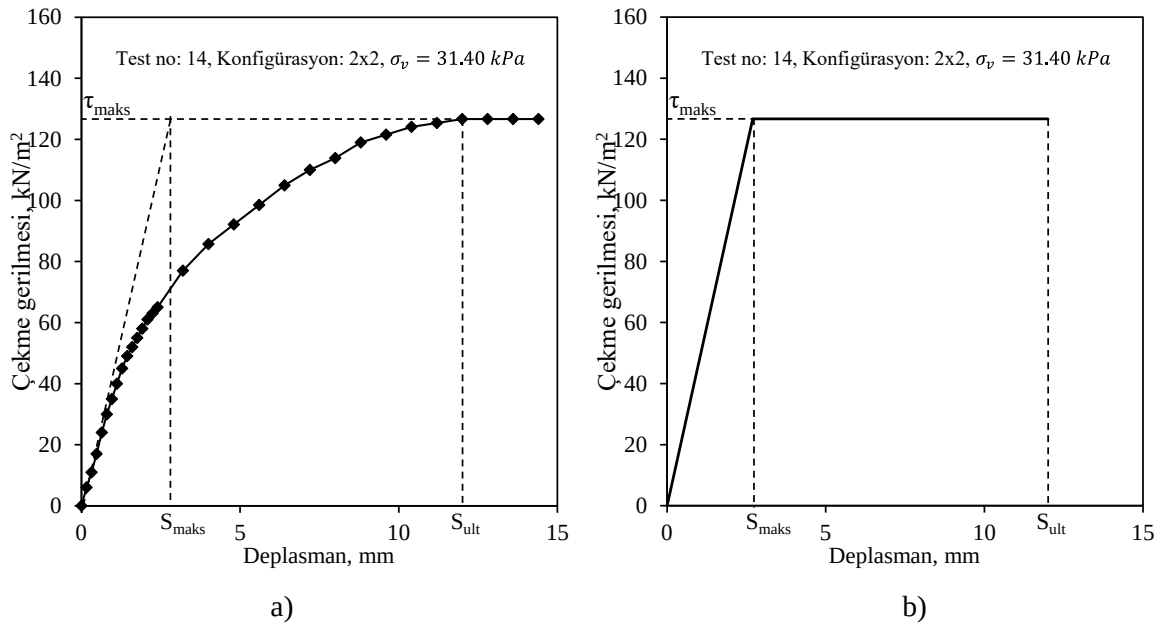


Şekil 2.12. Test no: 12 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

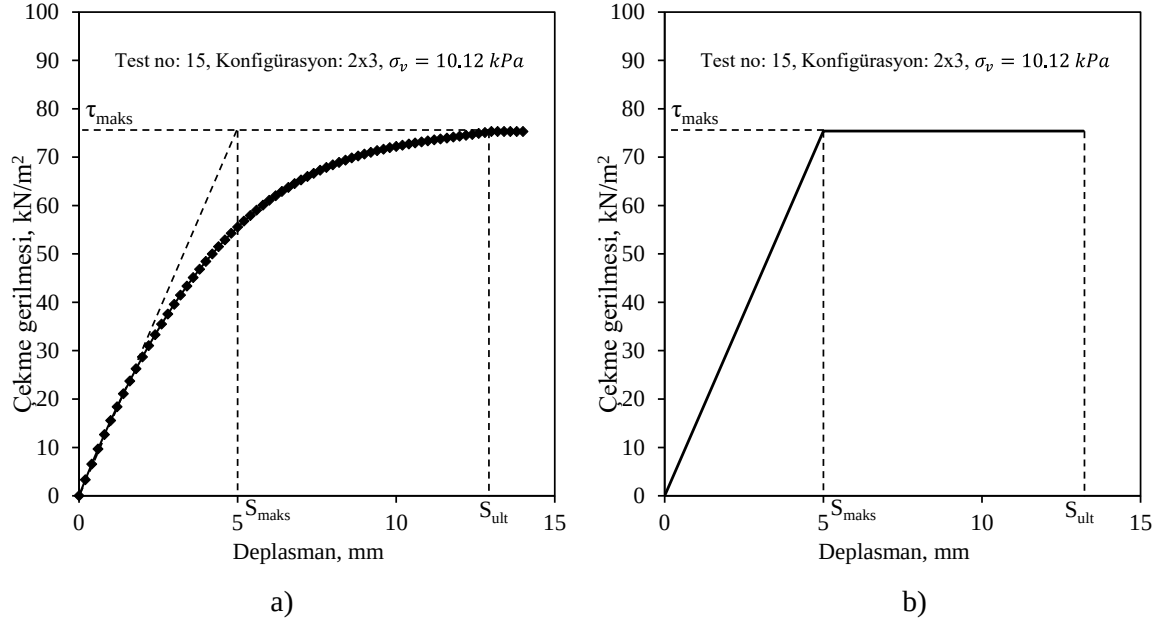


Şekil 2.13. Test no: 13 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

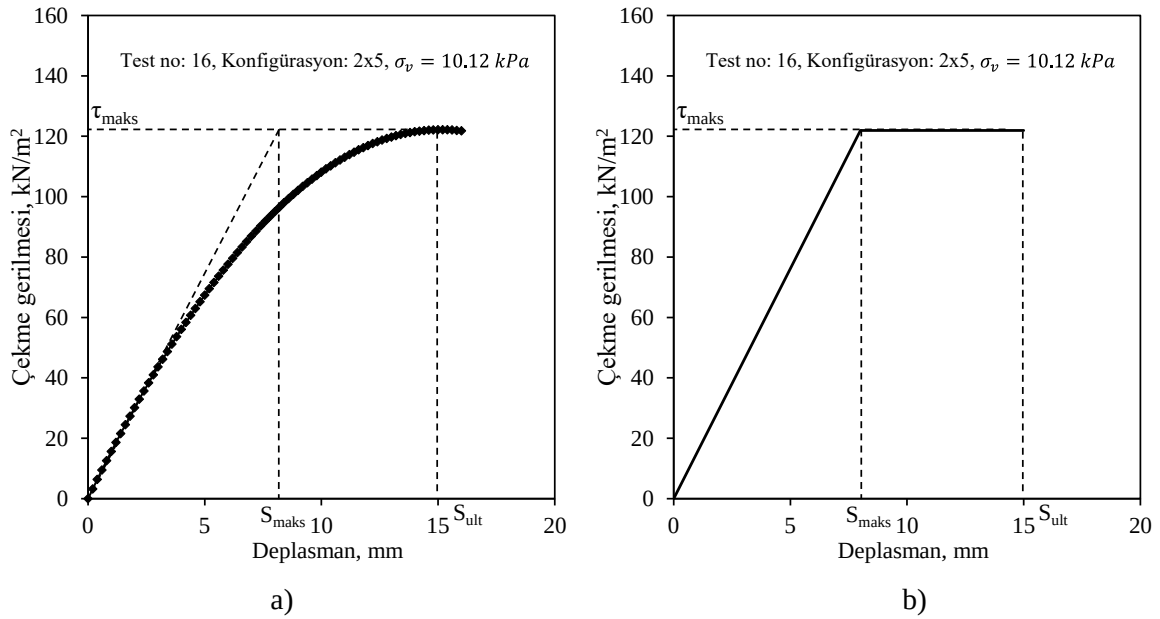


Şekil 2.14. Test no: 14 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

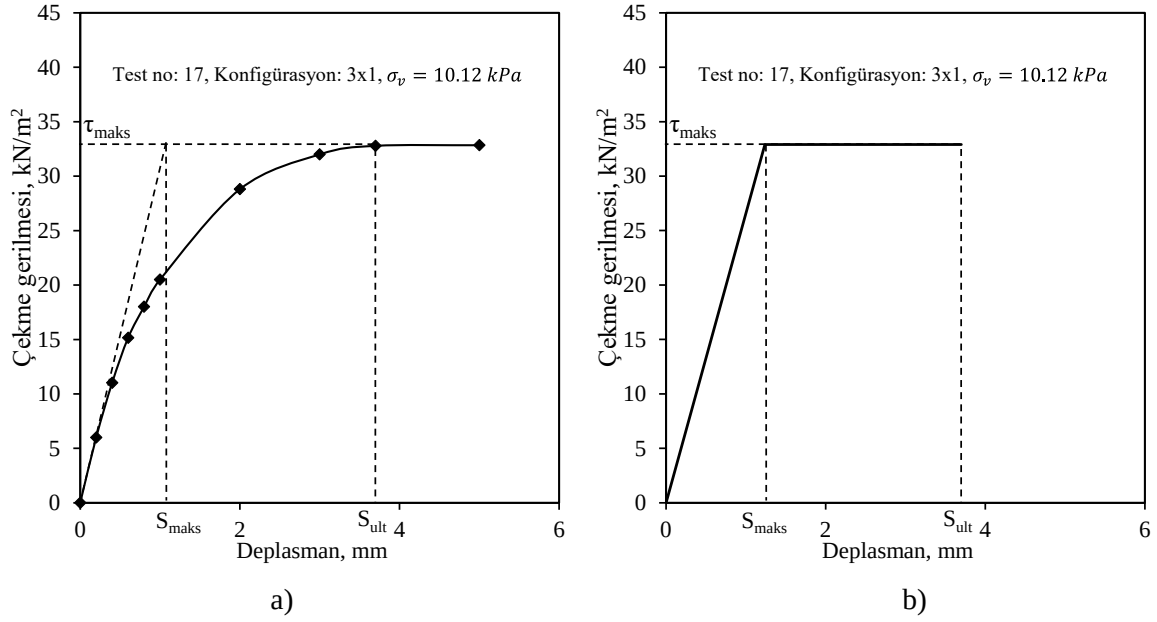


Şekil 2.15. Test no: 15 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

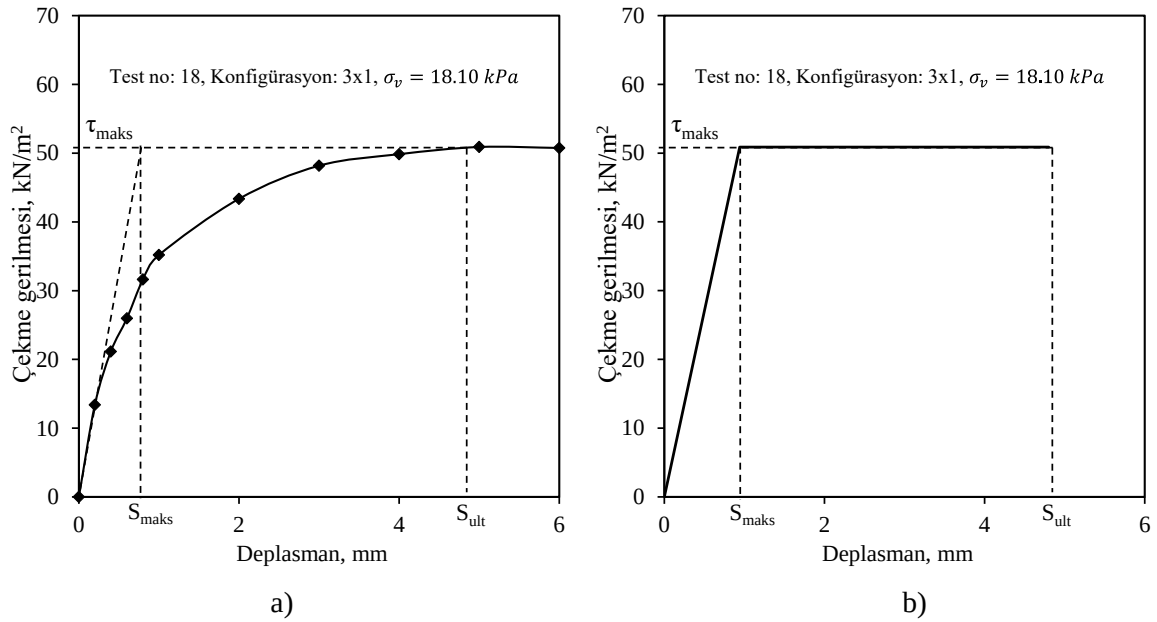


Şekil 2.16. Test no: 16 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

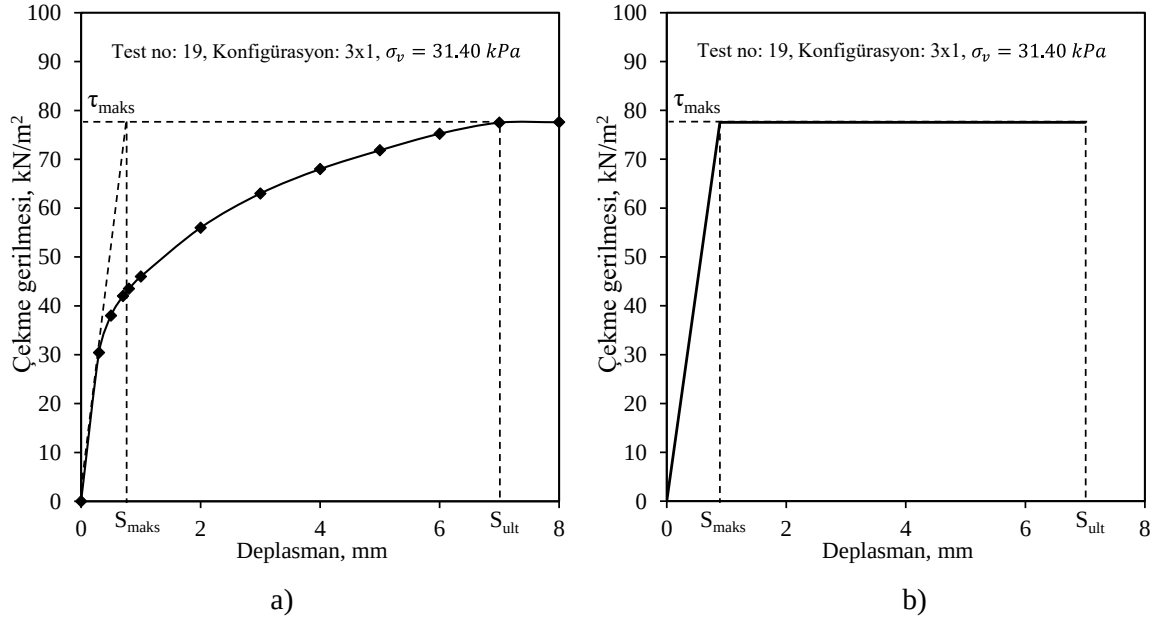


Şekil 2.17. Test no: 17 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

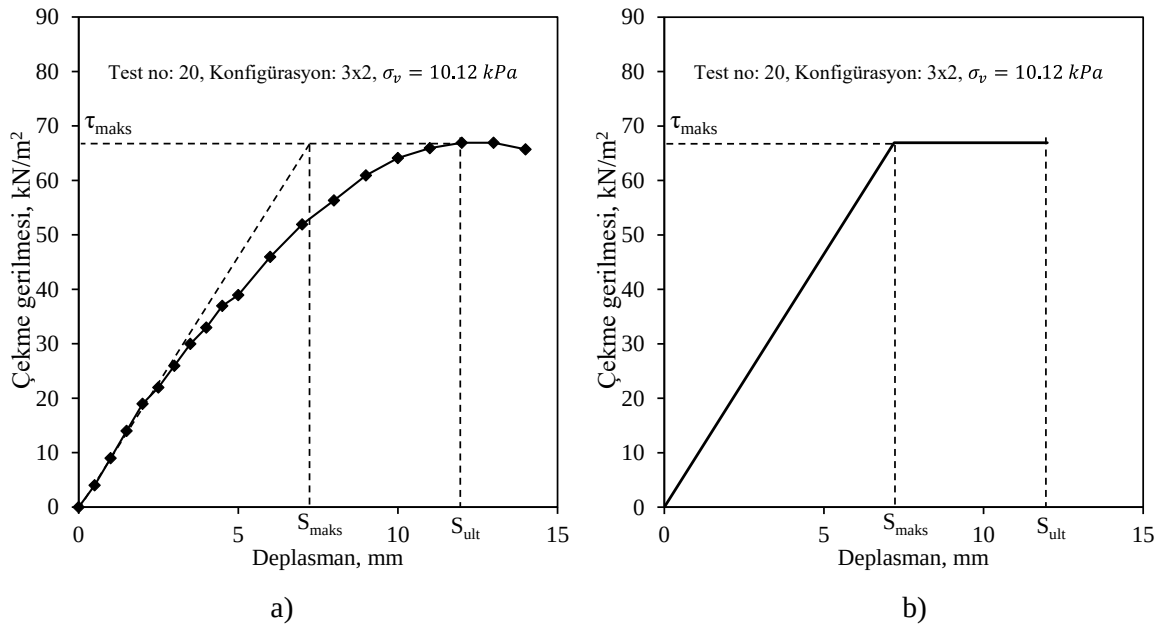


Şekil 2.18. Test no: 18 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

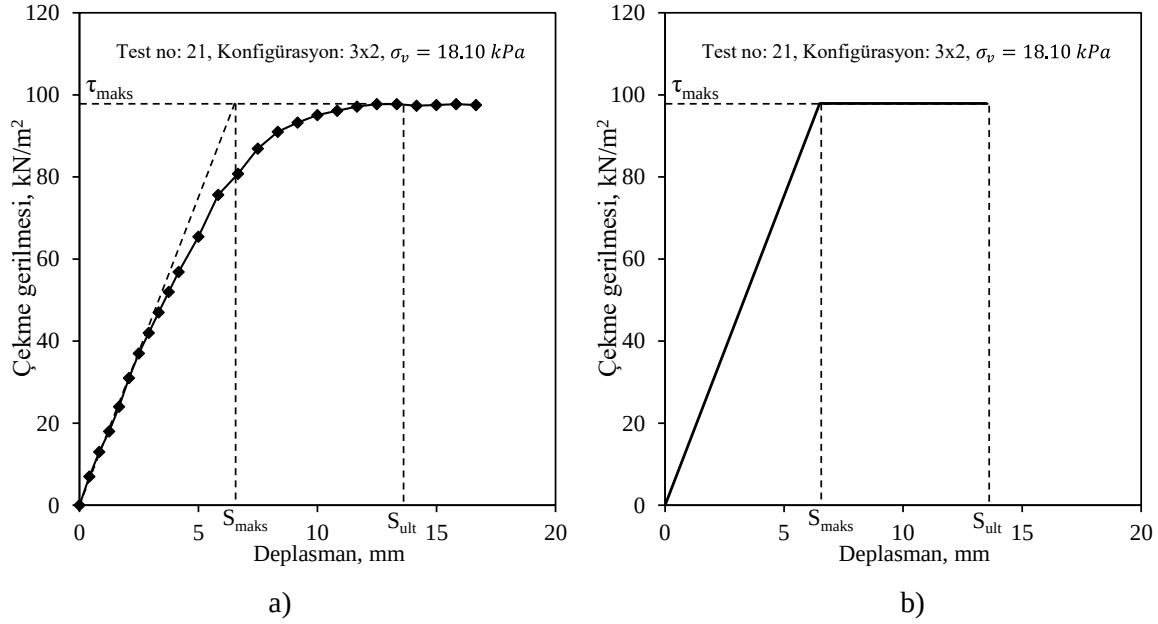


Şekil 2.19. Test no: 19 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

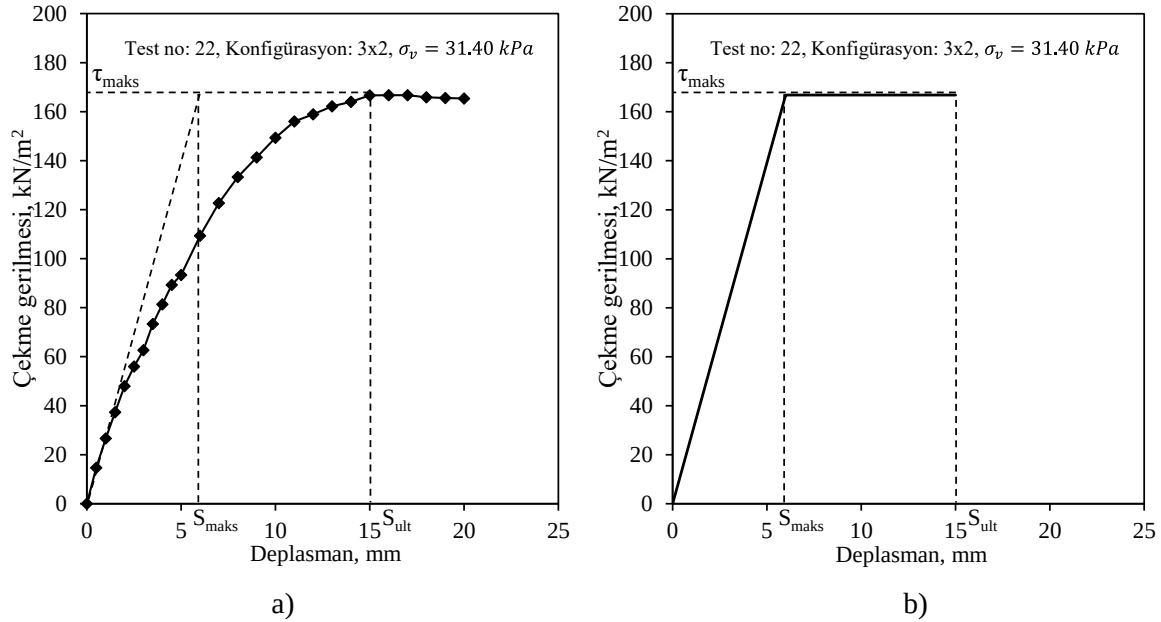


Şekil 2.20. Test no: 20 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

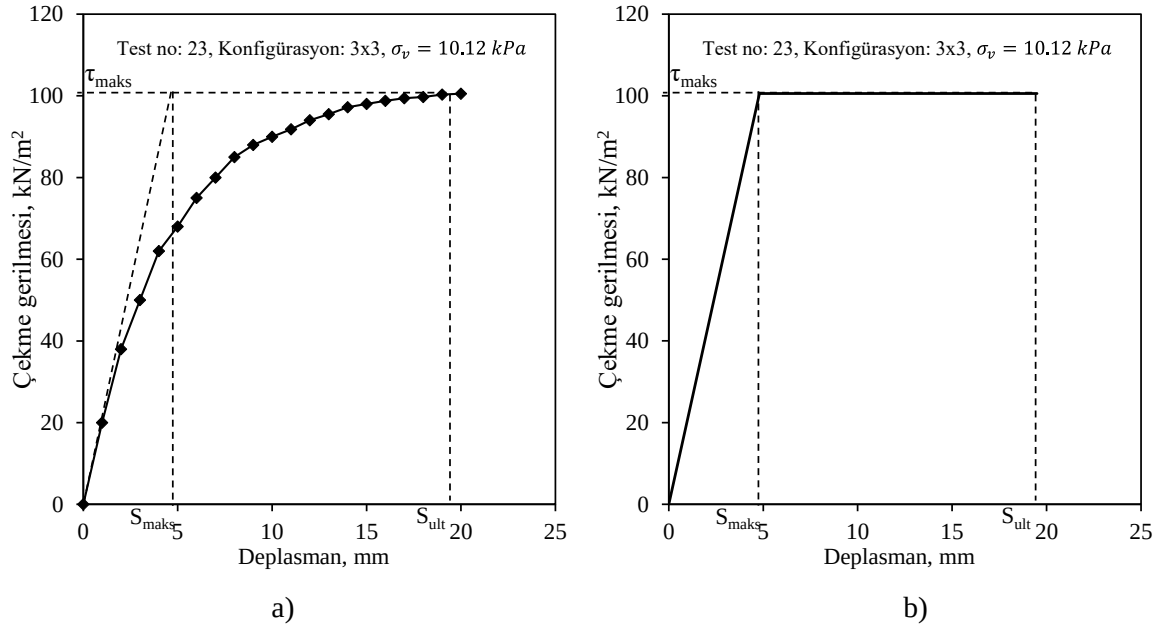


Şekil 2.21. Test no: 21 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

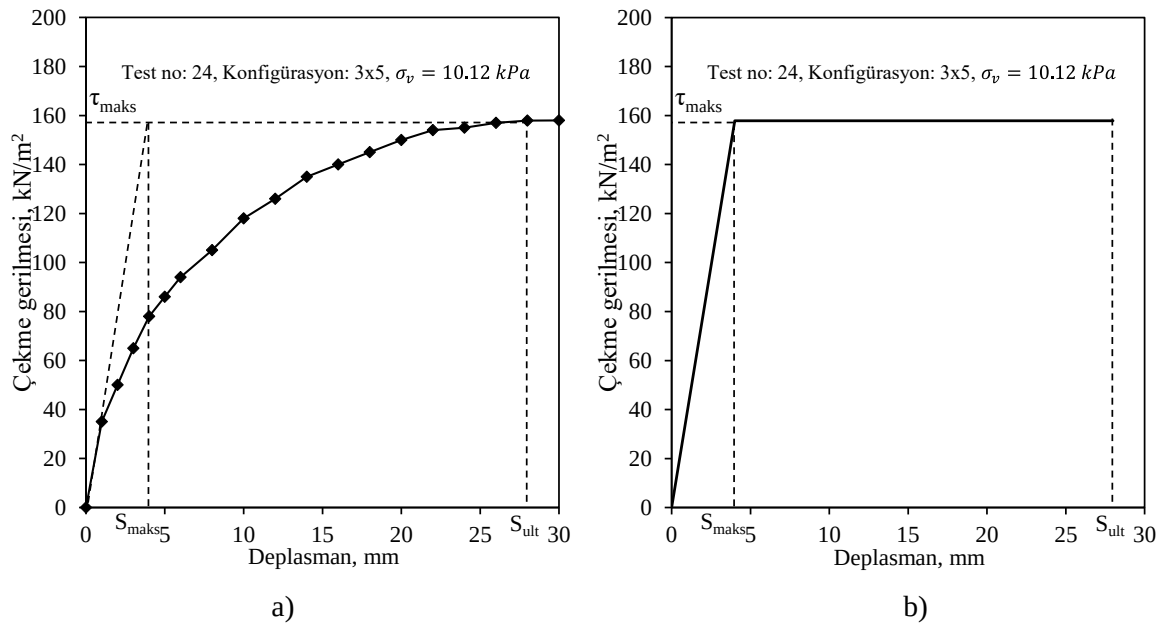


Şekil 2.22. Test no: 22 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

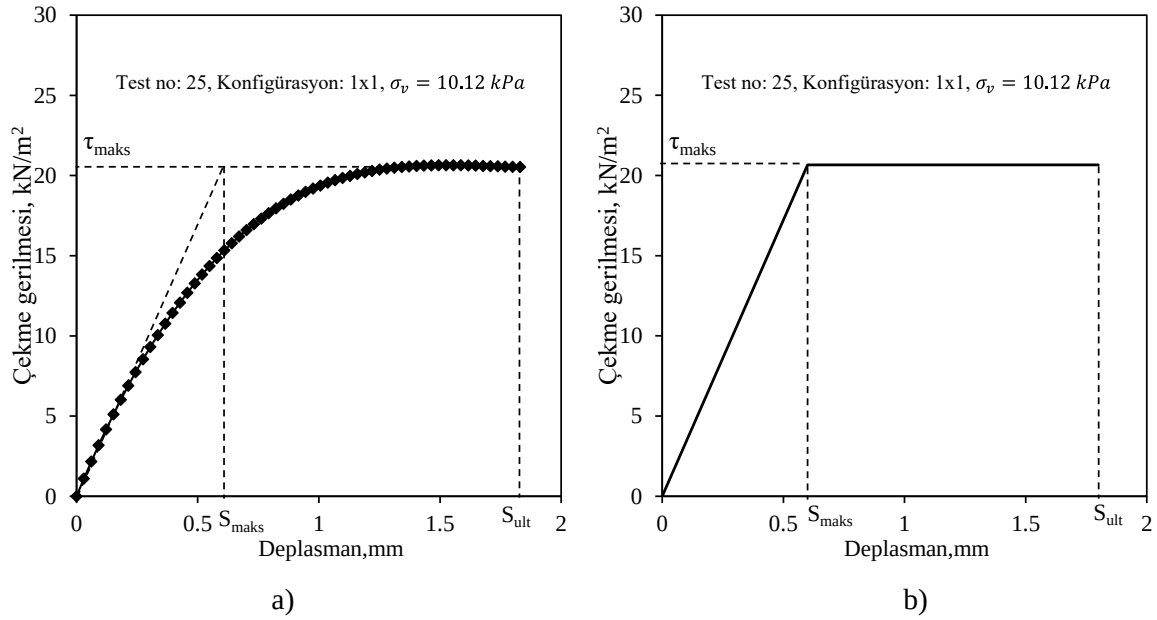


Şekil 2.23. Test no: 23 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

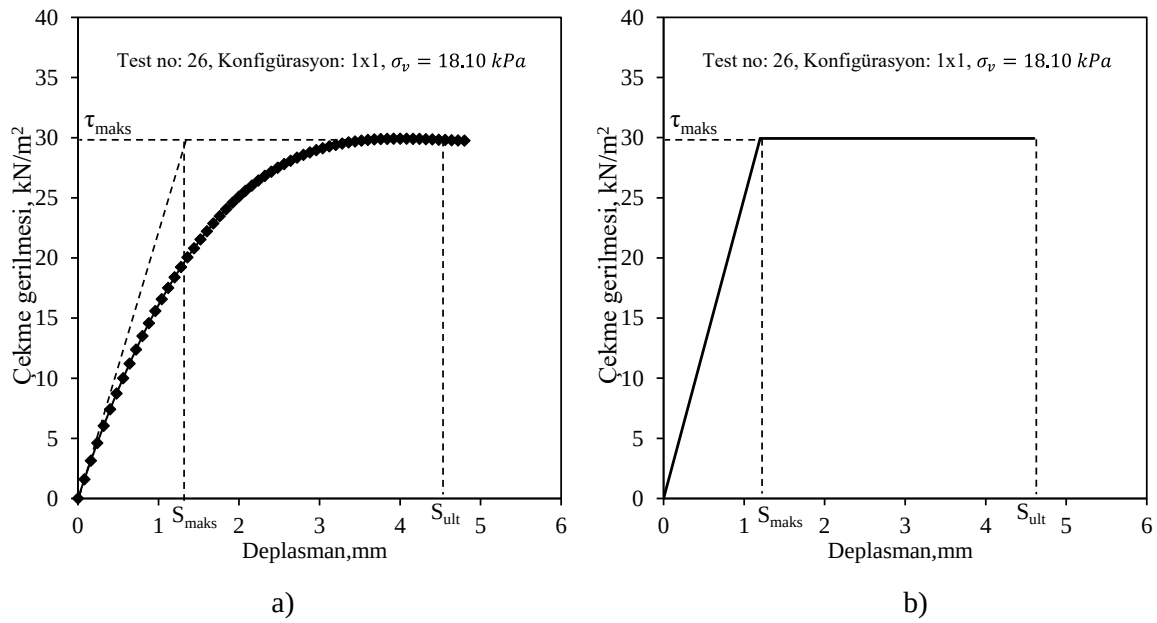


Şekil 2.24. Test no: 24 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

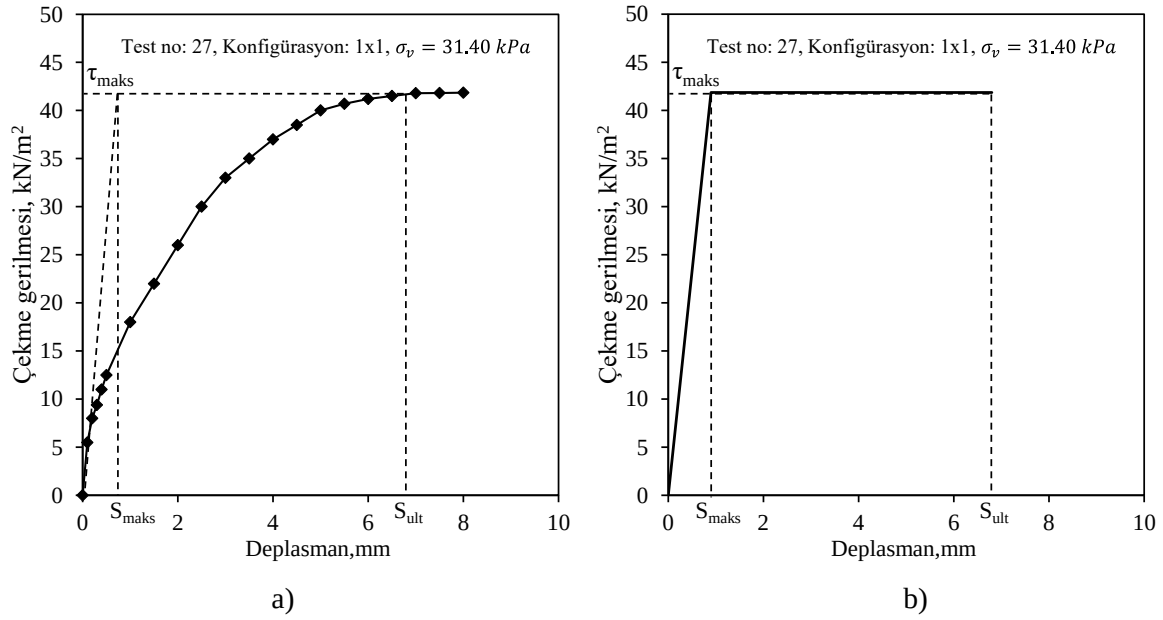


Şekil 2.25. Test no: 25 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

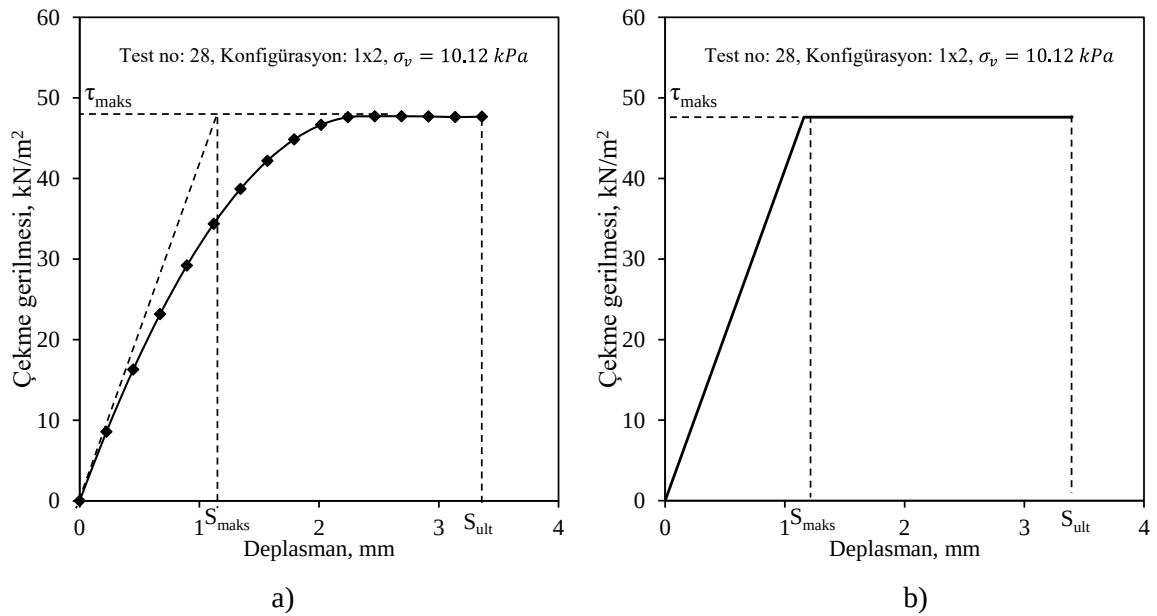


Şekil 2.26. Test no: 26 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

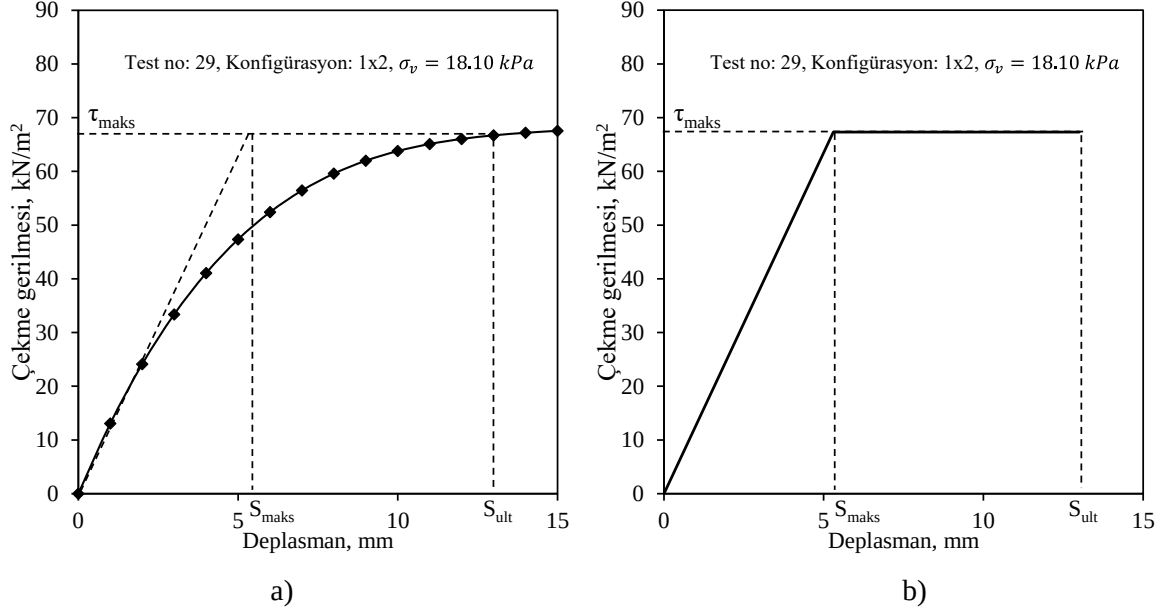


Şekil 2.27. Test no: 27 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

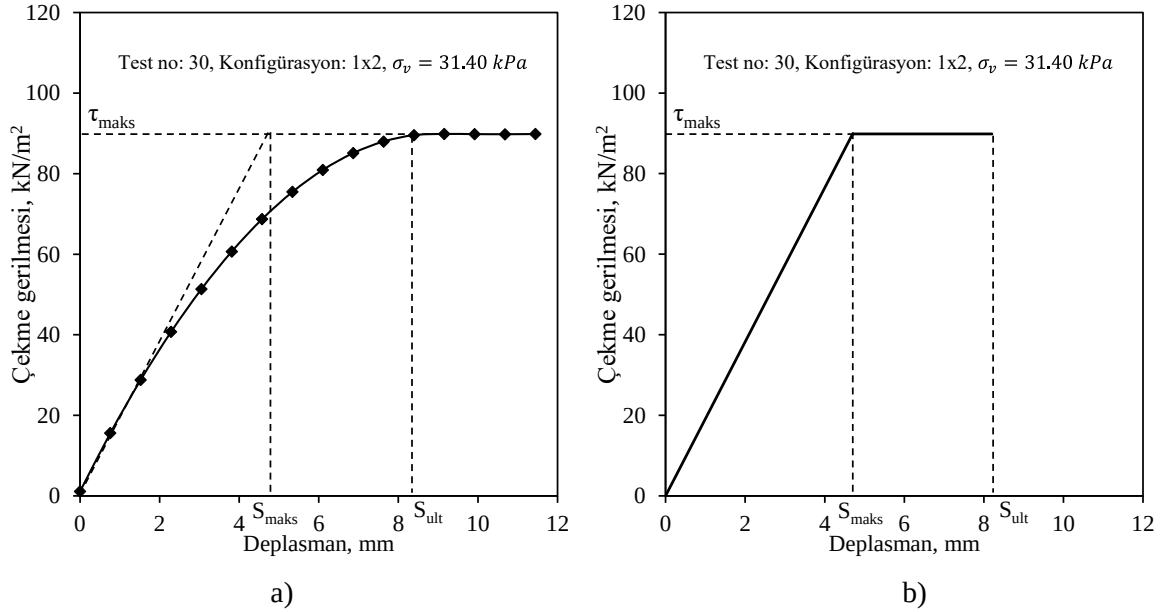


Şekil 2.28. Test no: 28 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

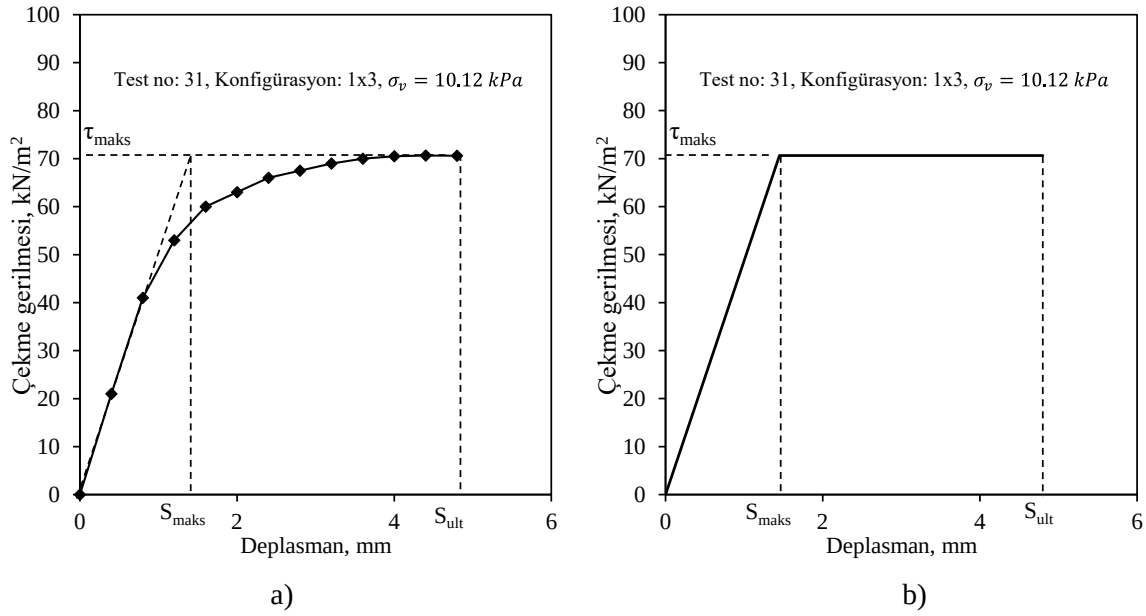


Şekil 2.29. Test no: 29 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

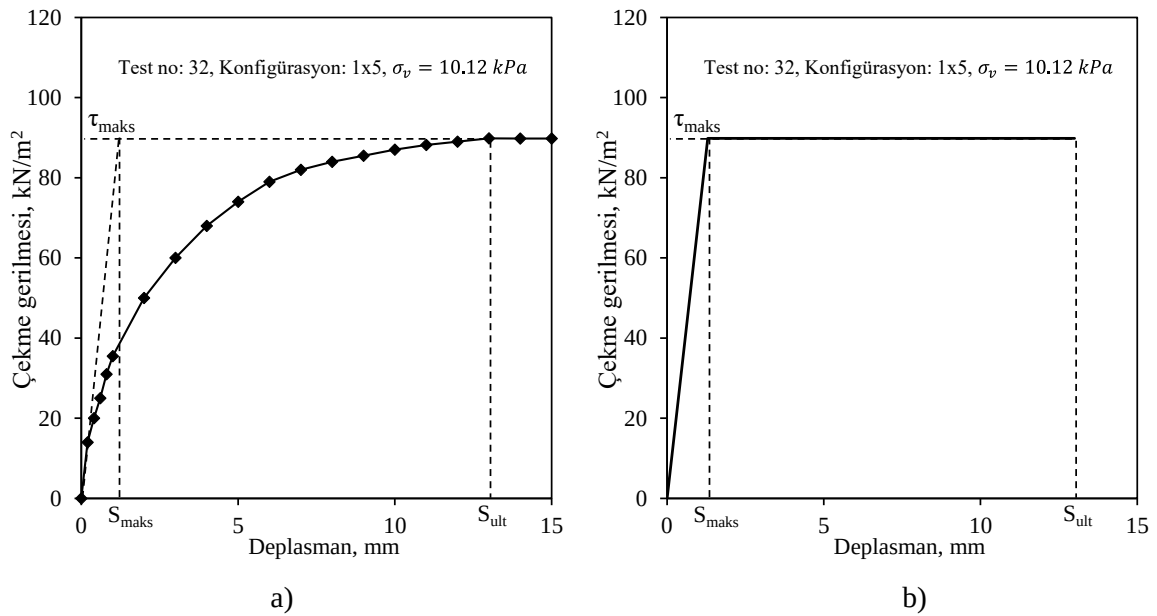


Şekil 2.30. Test no: 30 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

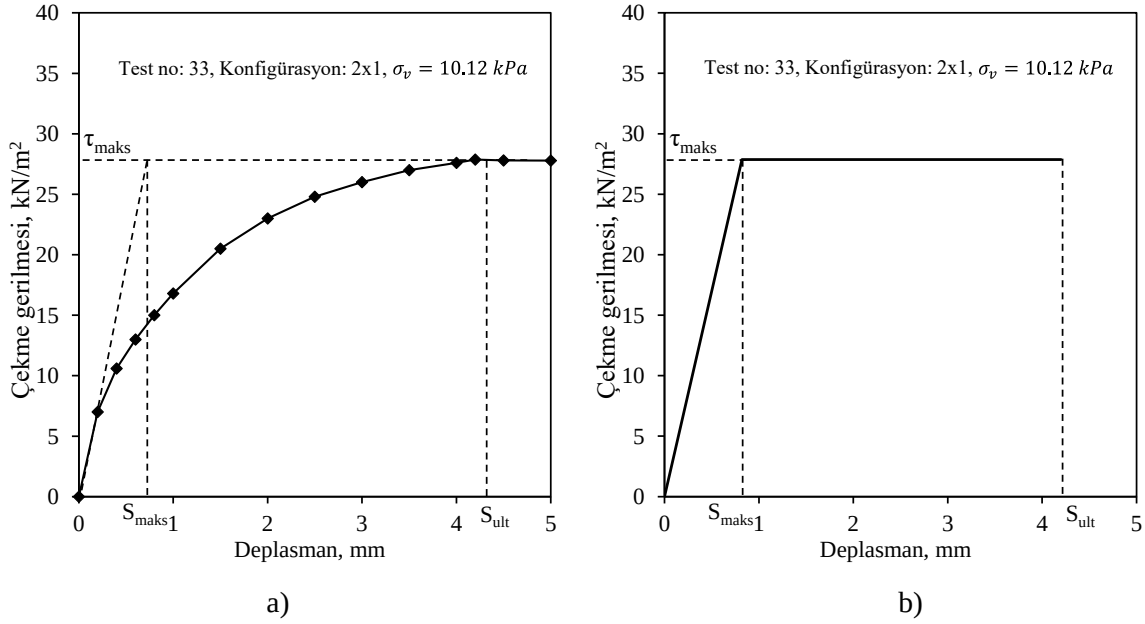


Şekil 2.31. Test no: 31 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

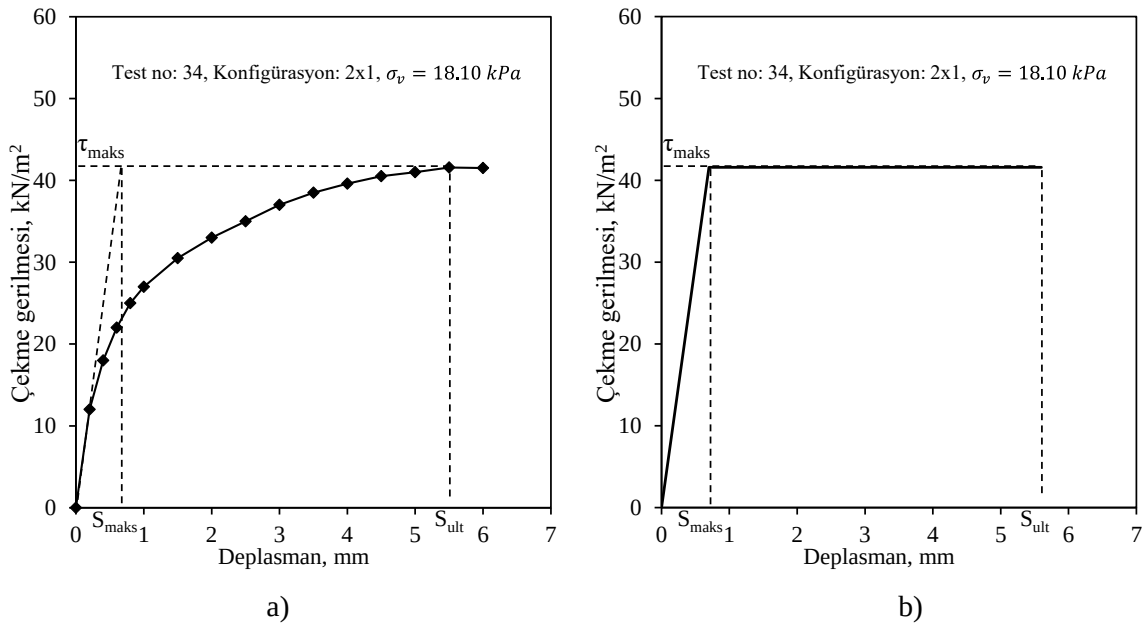


Şekil 2.32. Test no: 32 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

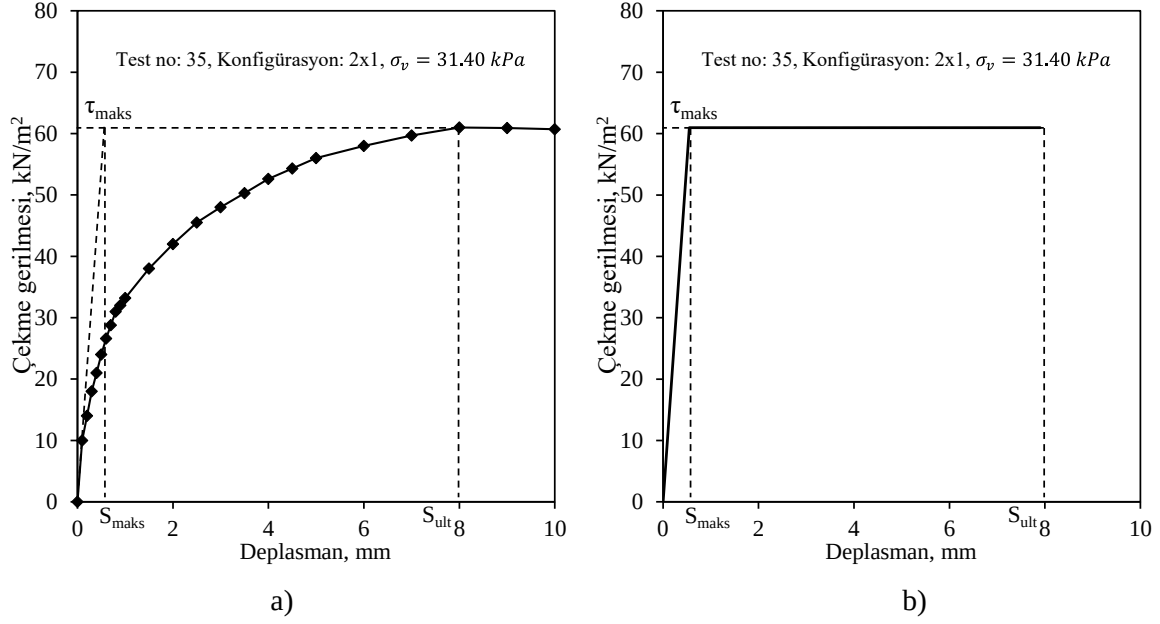


Şekil 2.33. Test no: 33 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

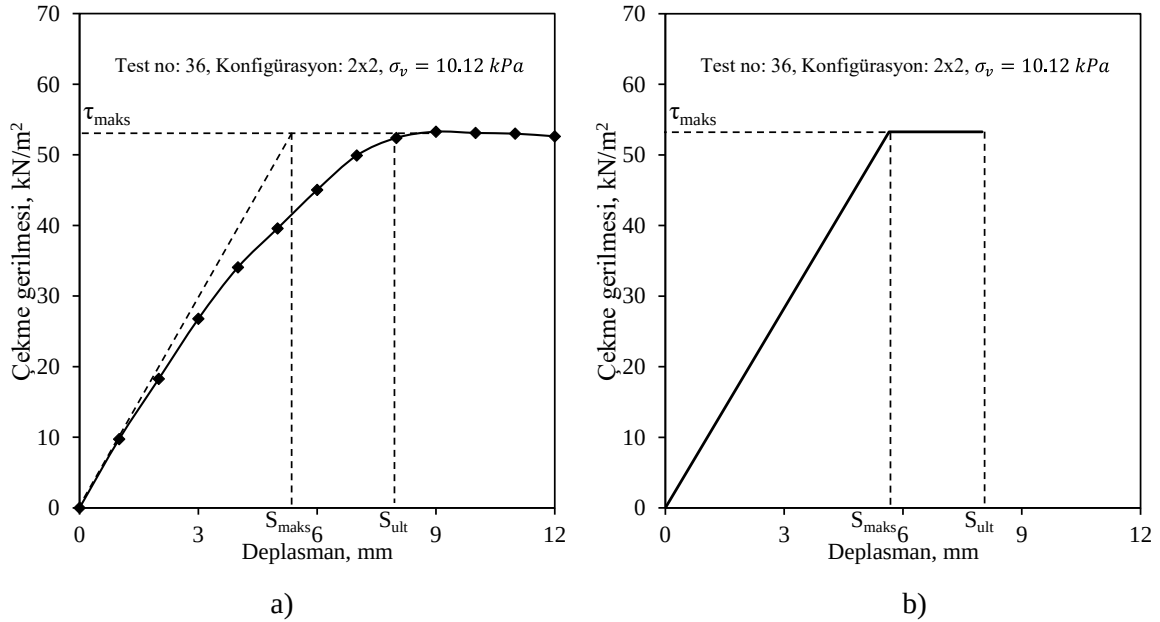


Şekil 2.34. Test no: 34 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

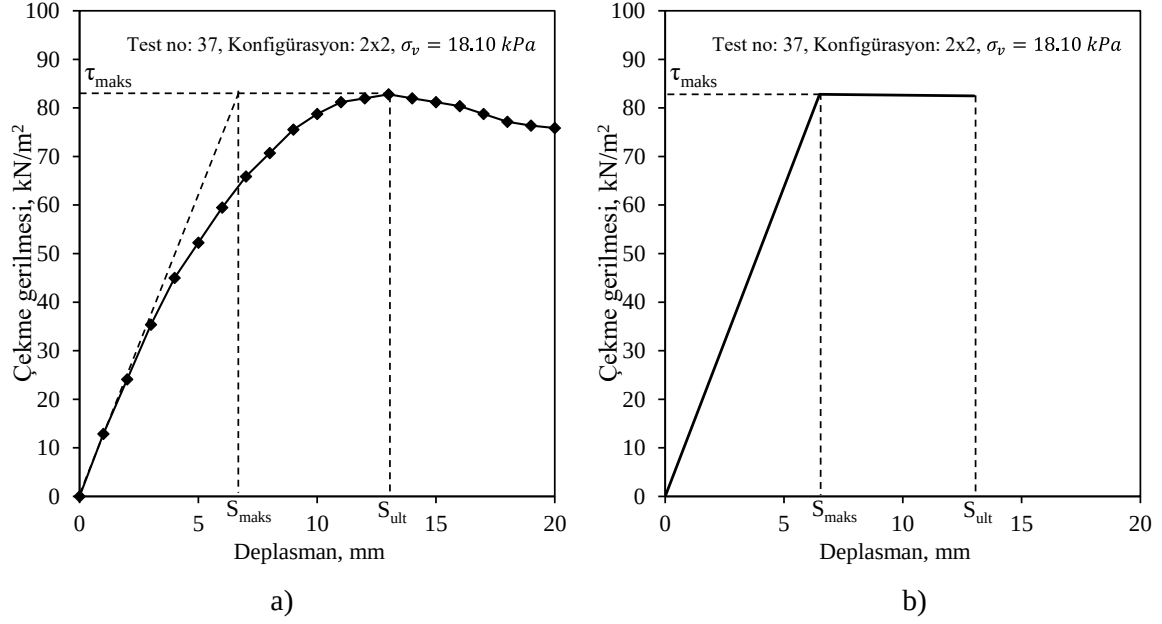


Şekil 2.35. Test no: 35 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

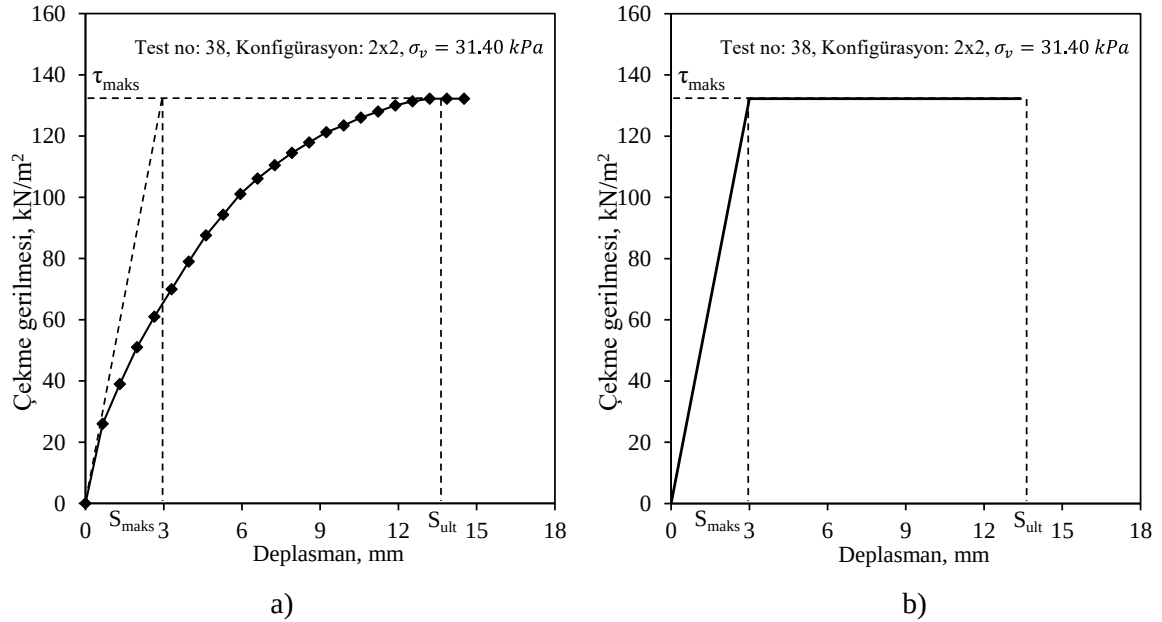


Şekil 2.36. Test no: 36 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

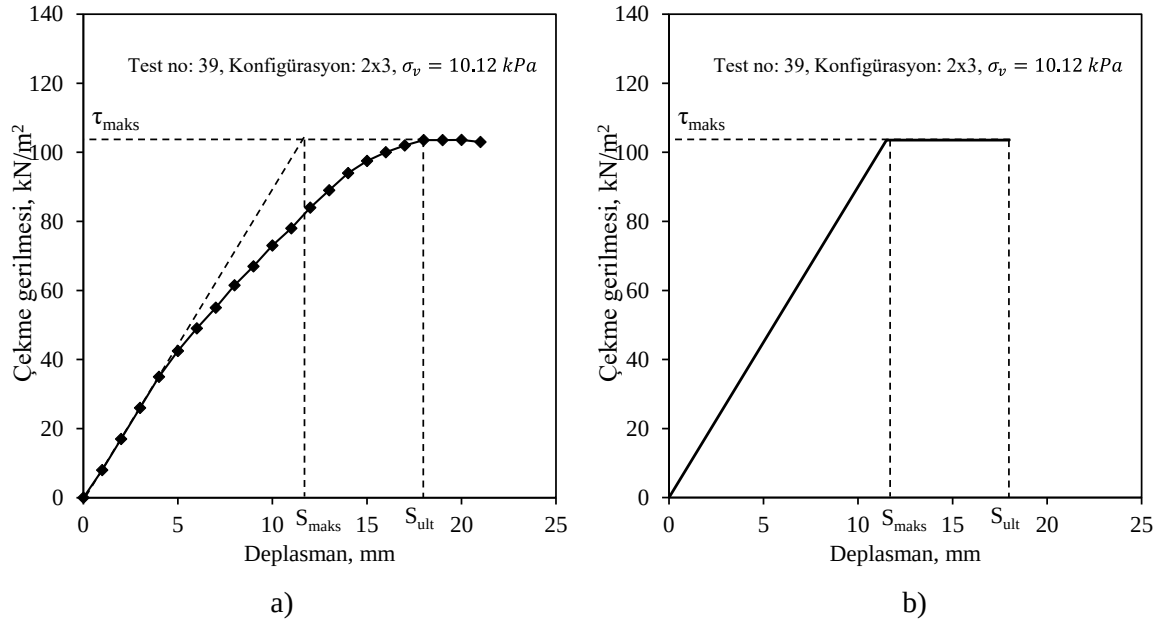


Şekil 2.37. Test no: 37 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

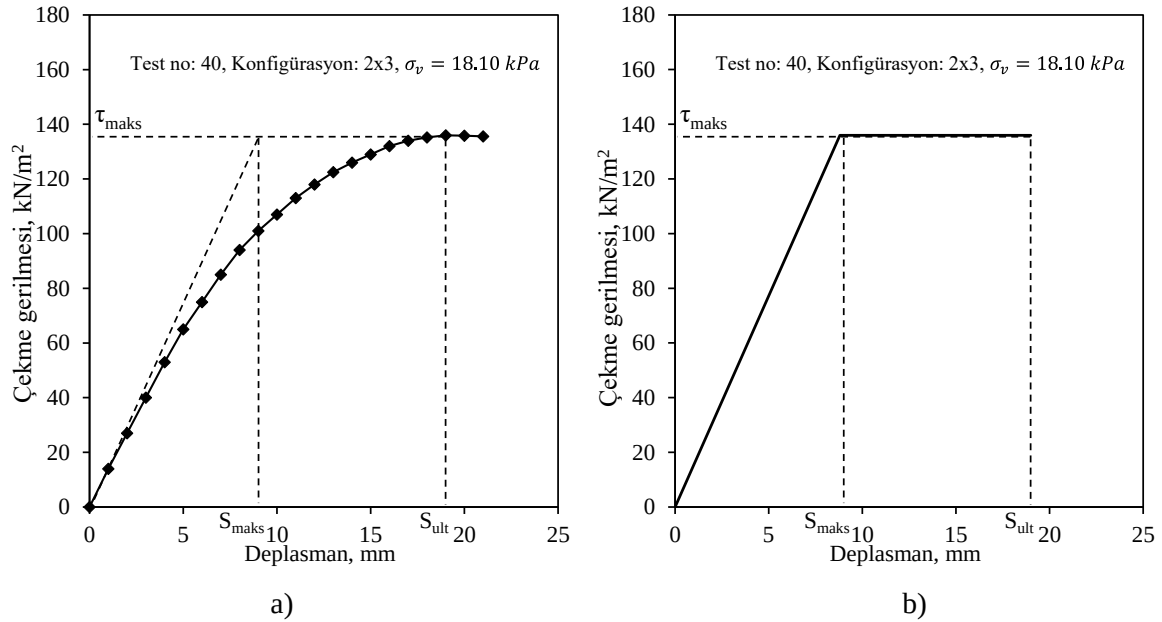


Şekil 2.38. Test no: 38 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

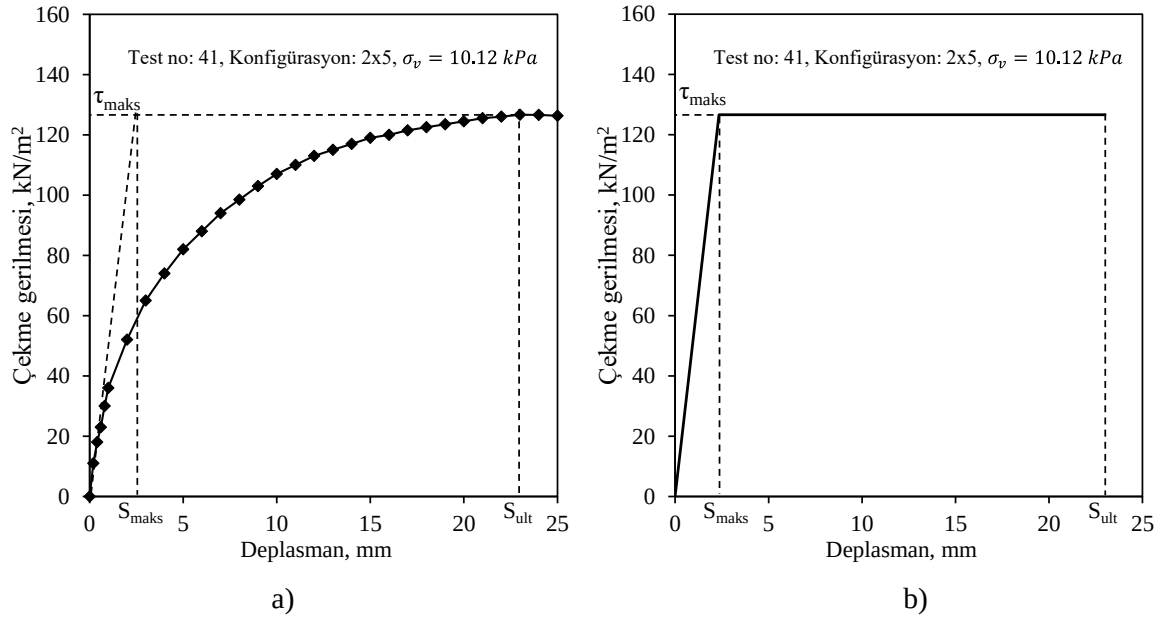


Şekil 2.39. Test no: 39 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

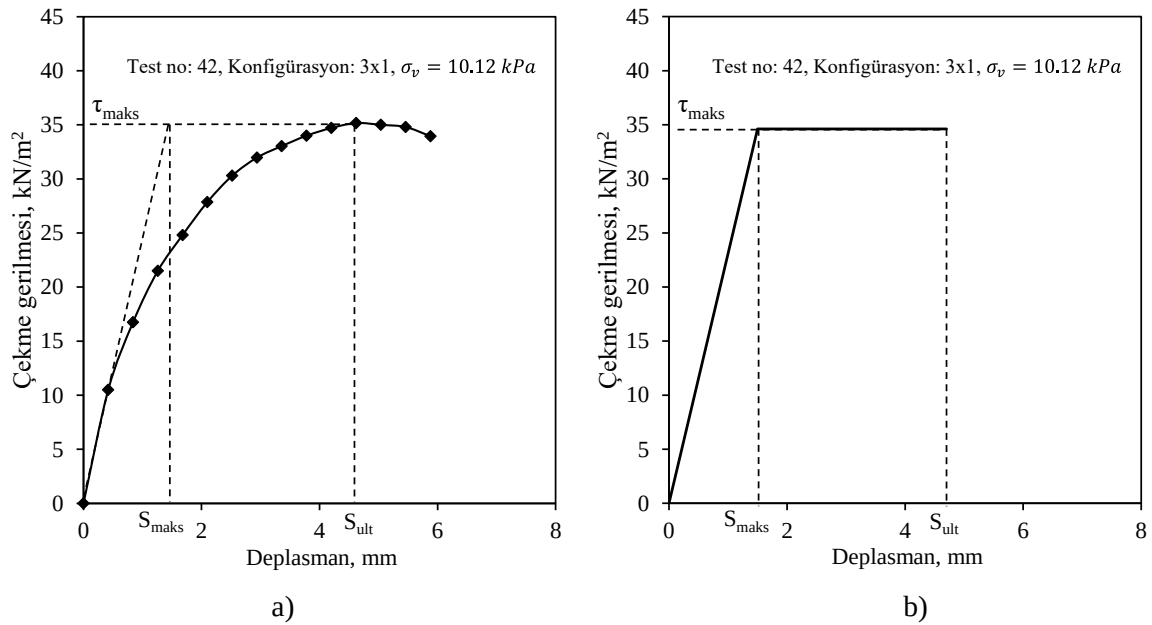


Şekil 2.40. Test no: 40 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

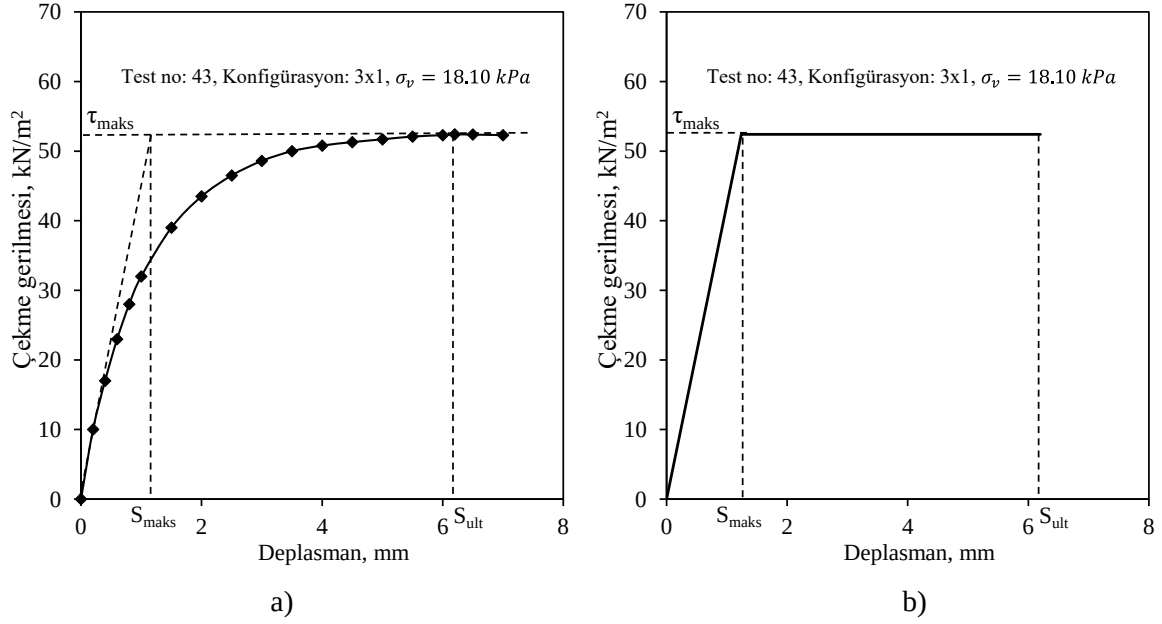


Şekil 2.41. Test no: 41 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

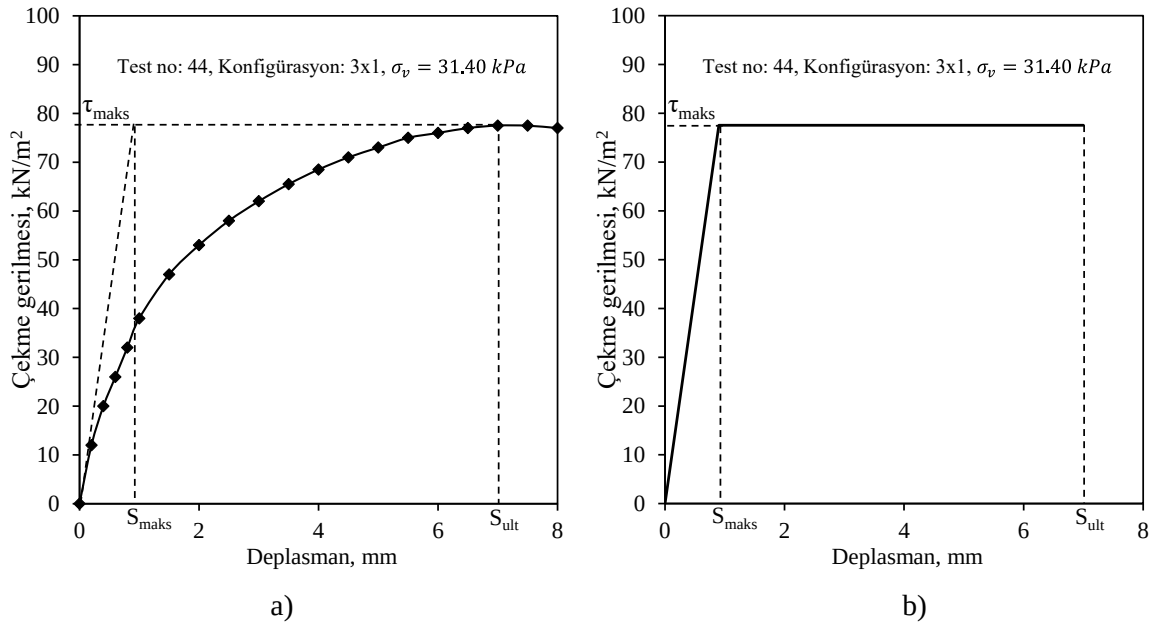


Şekil 2.42. Test no: 42 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

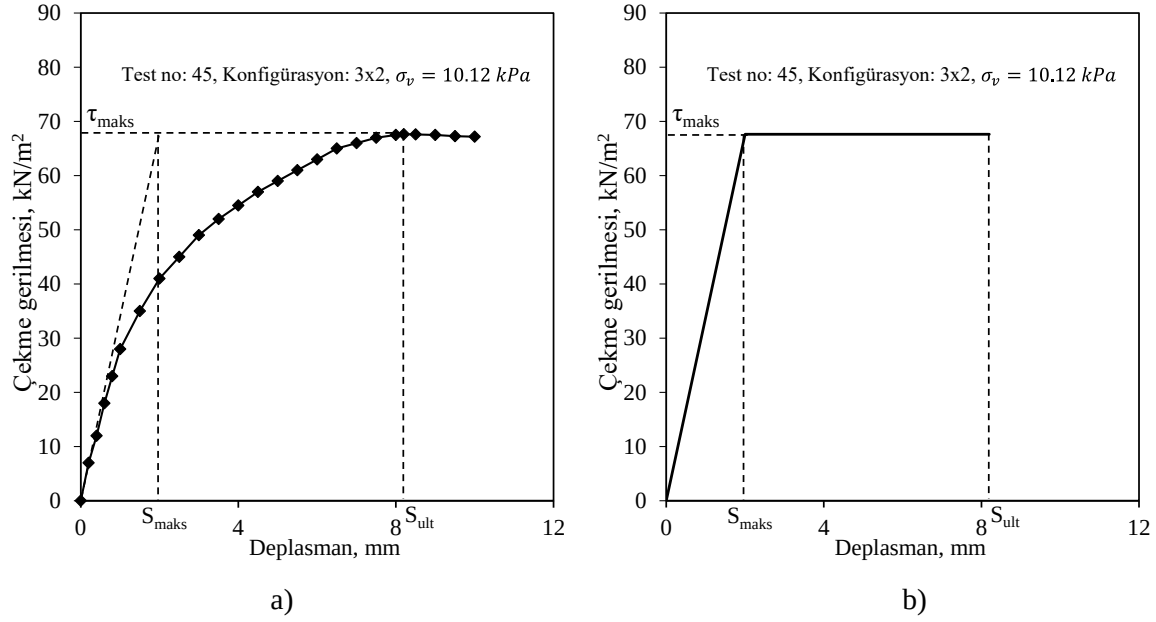


Şekil 2.43. Test no: 43 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

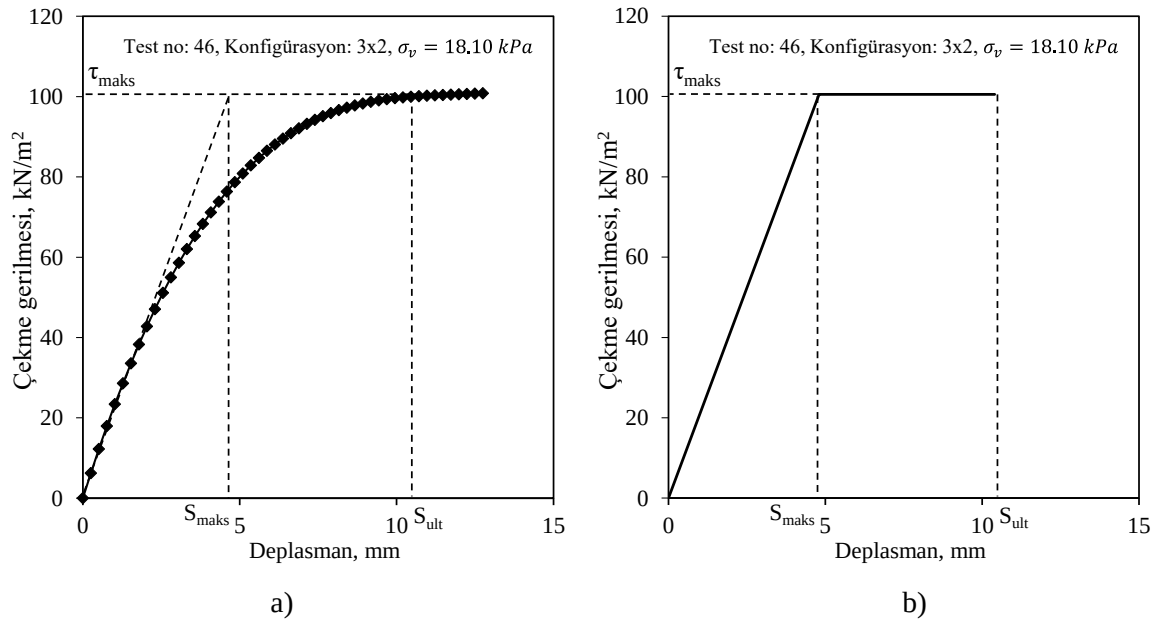


Şekil 2.44. Test no: 44 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

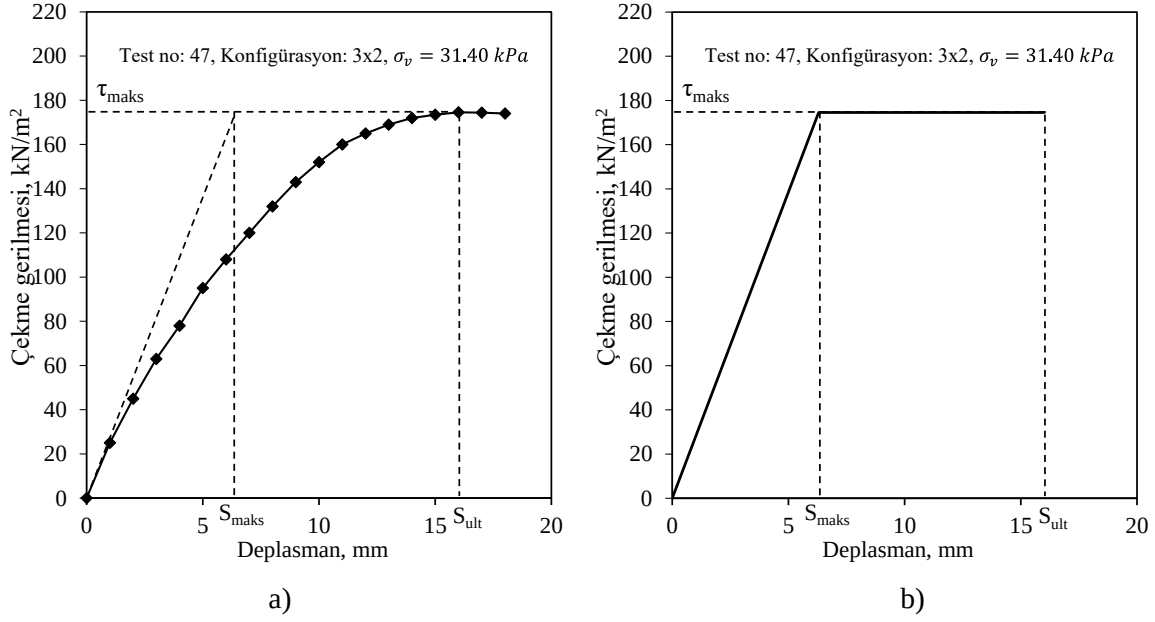


Şekil 2.45. Test no: 45 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

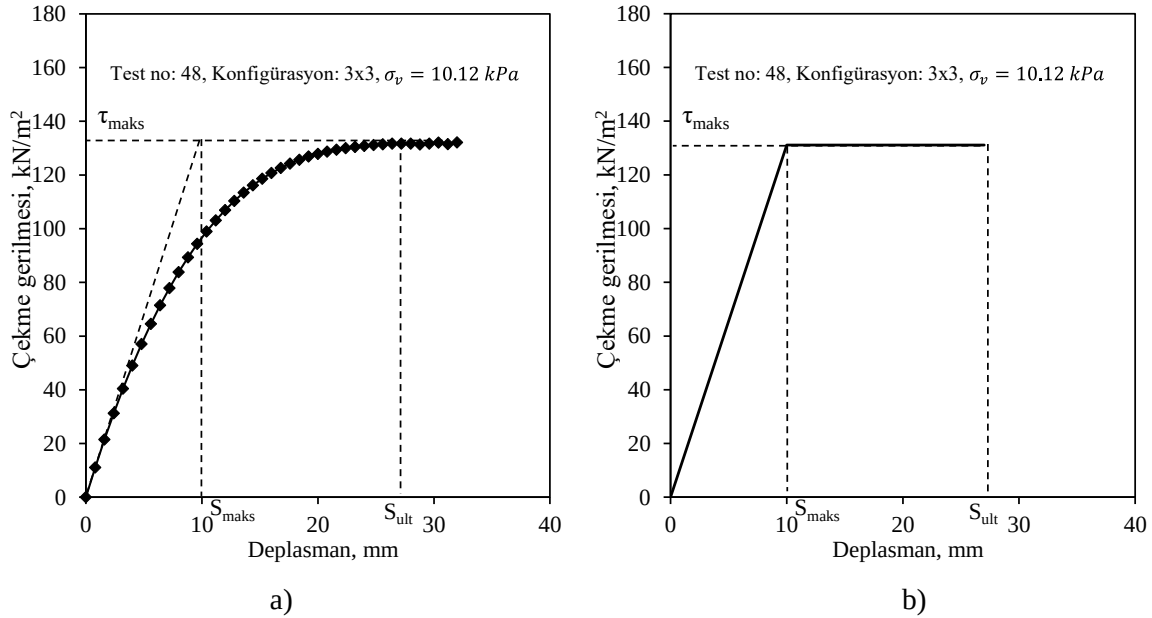


Şekil 2.46. Test no: 46 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

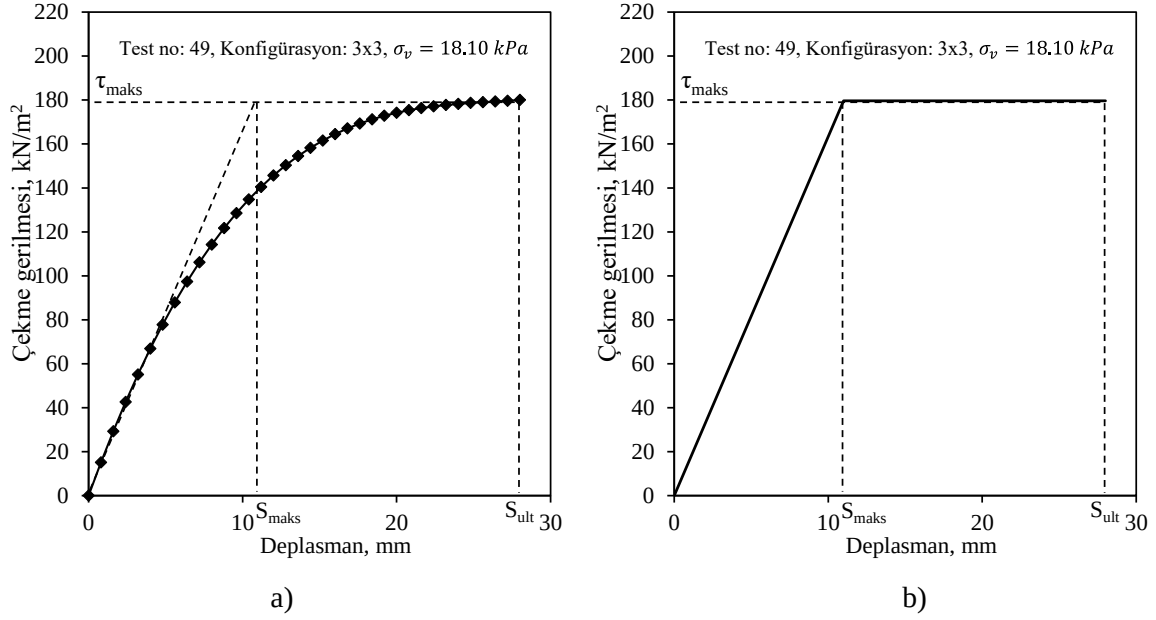


Şekil 2.47. Test no: 47 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

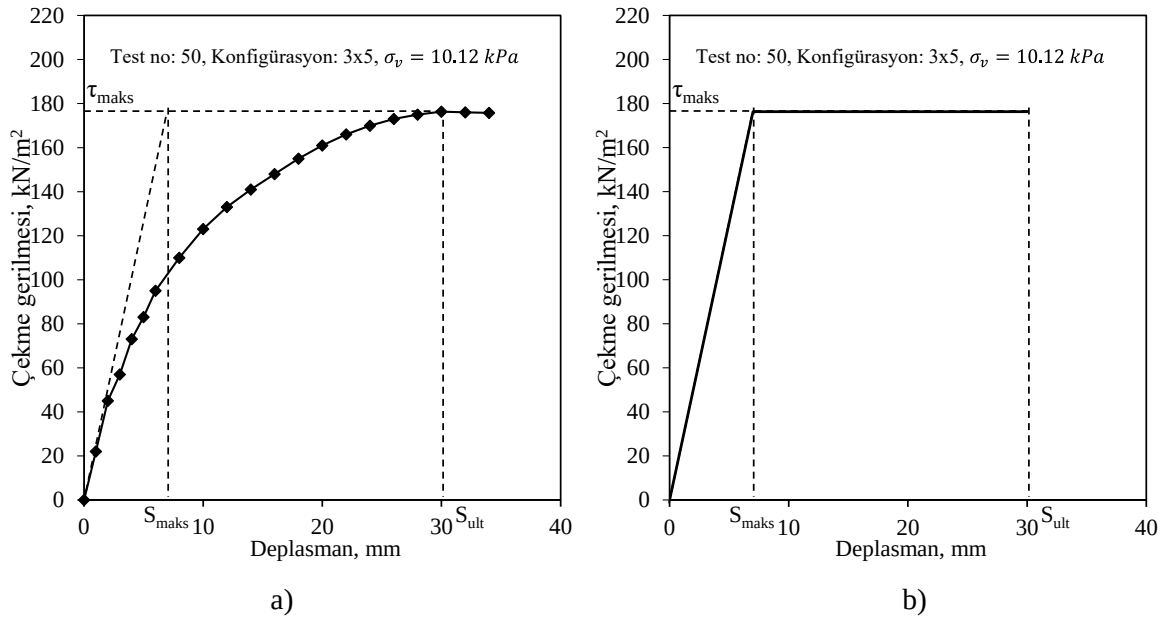


Şekil 2.48. Test no: 48 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

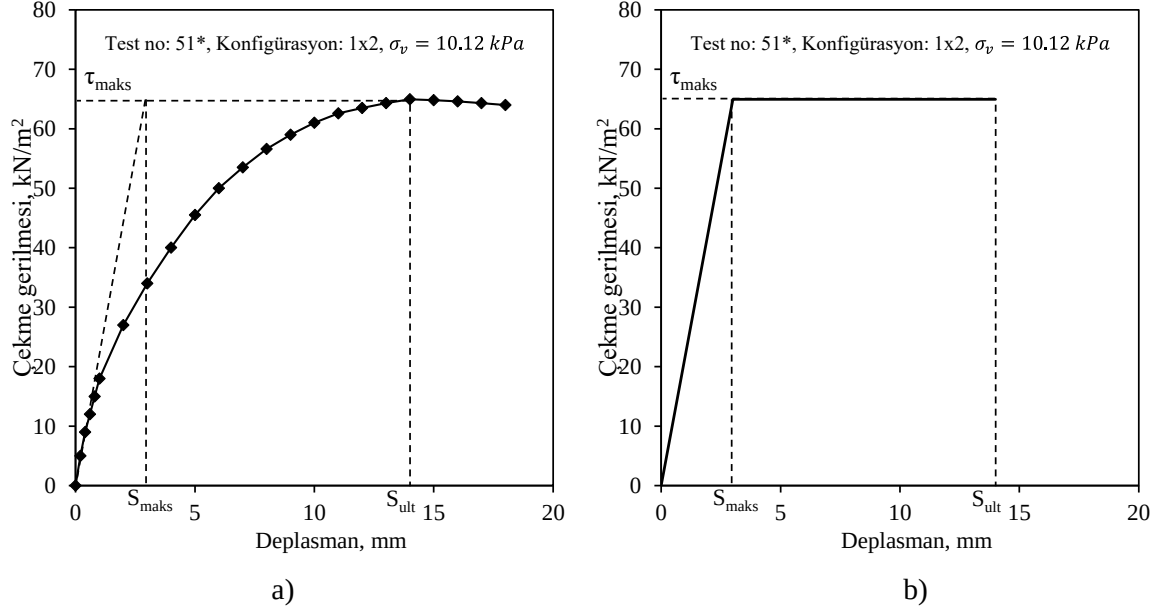


Şekil 2.49. Test no: 49 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

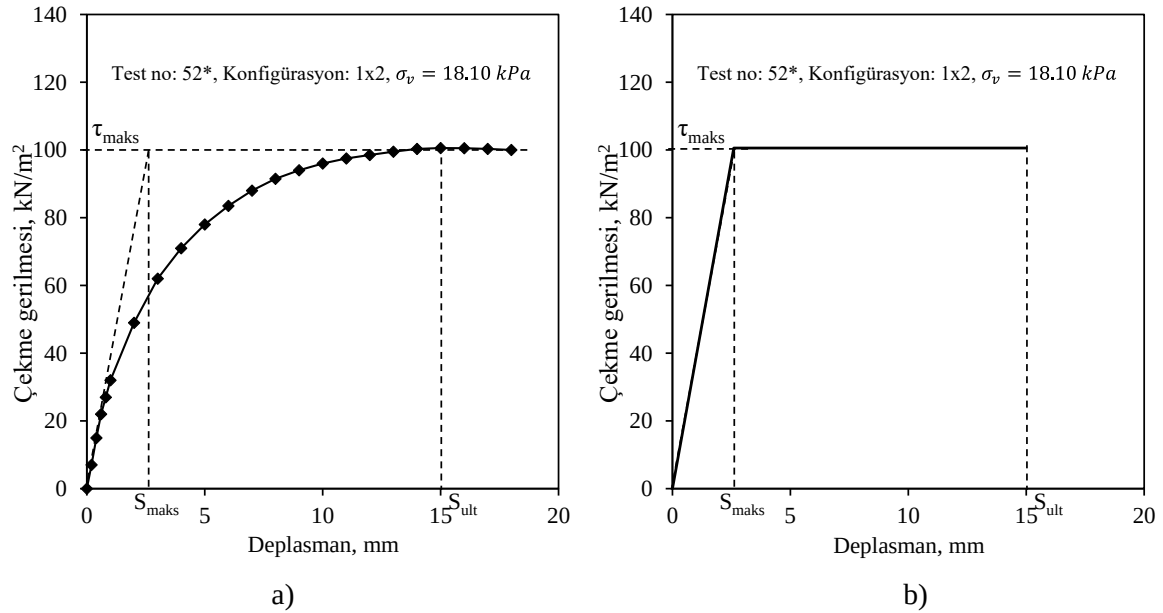


Şekil 2.50. Test no: 50 deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

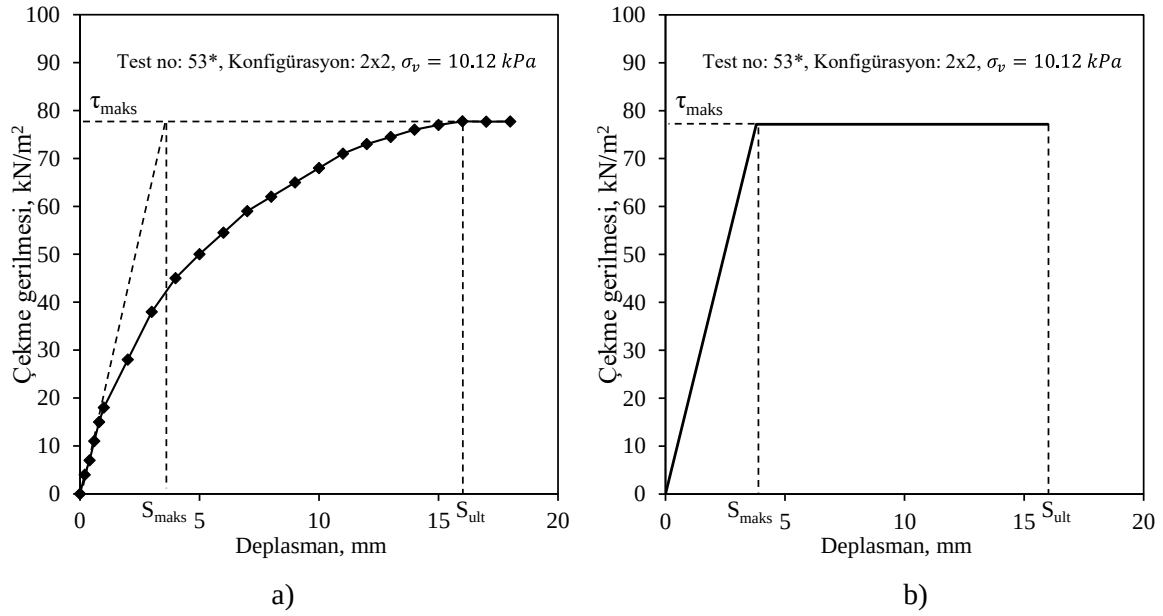


Şekil 2.51. Test no: 51* deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

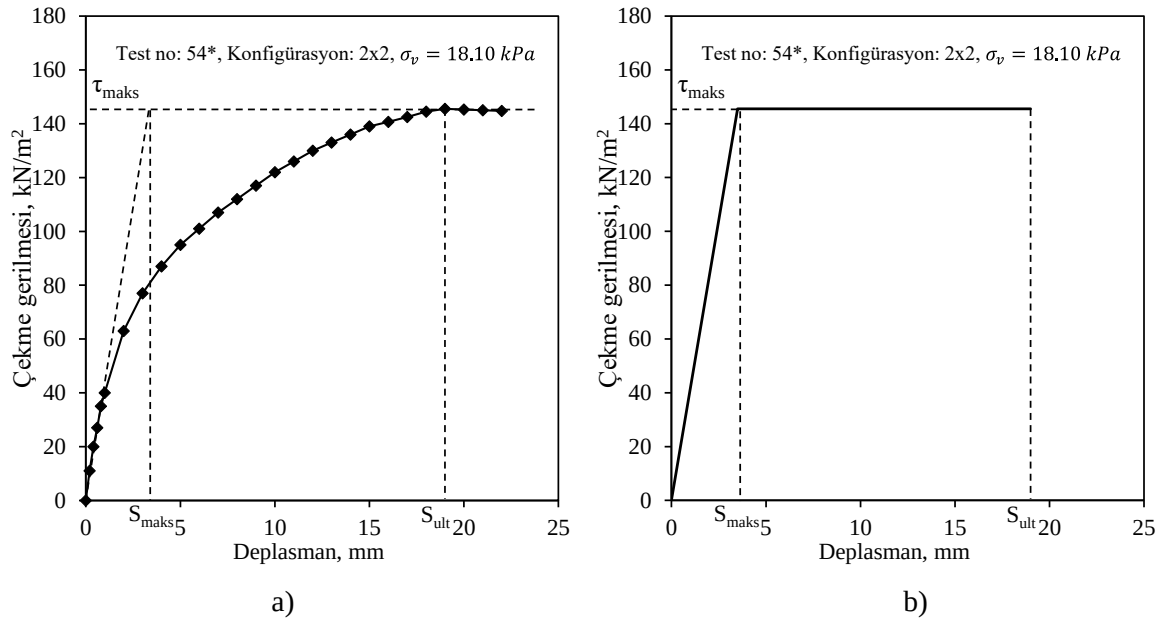


Şekil 2.52. Test no: 52* deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler

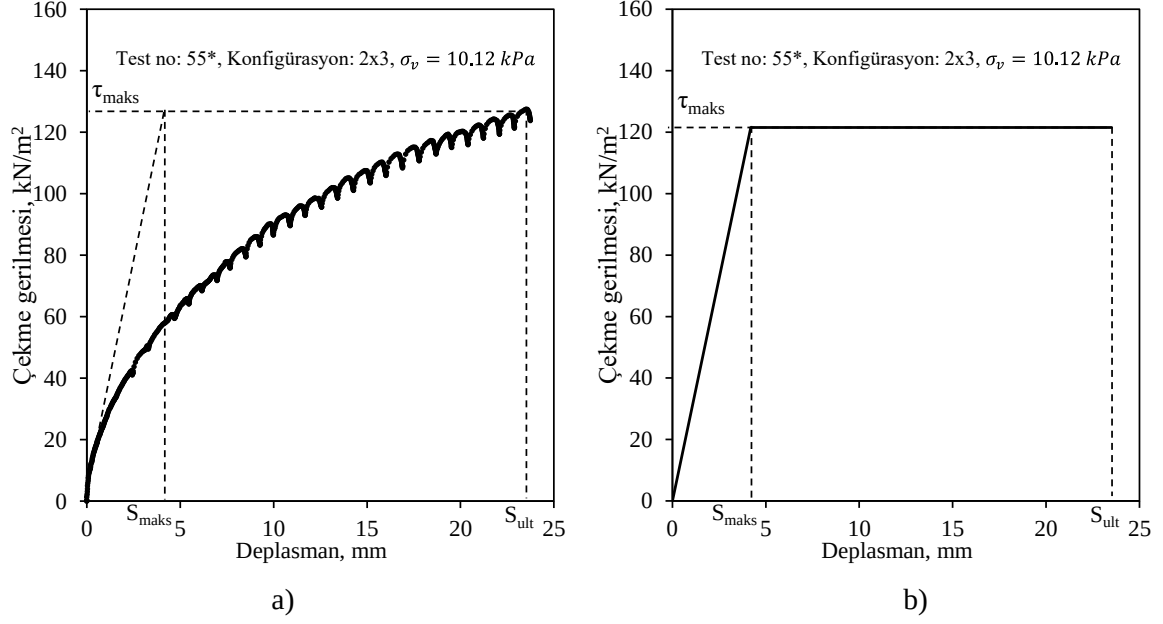


Şekil 2.53. Test no: 53* deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

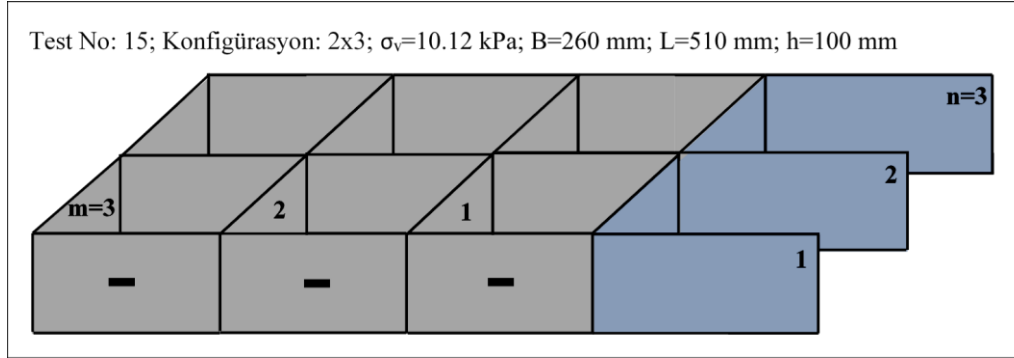


Şekil 2.54. Test no: 54* deney elemanı için elde edilen çekme gerilmesi-deplasmanı ilişkisi a) deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen grafik, b) idealleştirilmiş model grafik

EK-2. (devam) Çekme deneylerinden elde edilen çekme gerilmesi-deplasman grafikleri ve idealleştirilmiş model grafikler



EK-3. Test no:15 deney numunesinin çekme kapasitesinin teorik olarak belirlenmesi



Şekil 3.1. Test no:15 deney numunesine ait şematik görünüm ve boyuna elemanlar üzerinde meydana gelen birim uzamalar

Buna göre Test no:15 deney numunesinin toplam pasif direncin hesaplanması amacıyla, boyuna elemanlar üzerinde meydana gelen uzama miktarları ($\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$) Eşitlik 5.12, mobilizasyon faktörleri (m_{p1}, m_{p2}, m_{p3}) Eşitlik 5.13 ve pasif dirençler ise Eşitlik 5.16 yardımı ile belirlenmiştir. Hücresel yapı elemanları üzerinde meydana gelen uzama miktarları (Δl); sırasıyla birinci hücre için 2.380 mm, ikinci hücre için 1.020 mm ve üçüncü hücre için ise 0.510 mm olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.2). Hücresel yapı elemanlarının enine elemanlar üzerinde oluşan pasif basınç mobilizasyon faktörleri (m_p) ise; birinci hücre için 1.00, ikinci hücre için 1.00 ve üçüncü hücre için ise 0.510 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.3). Enine eleman üzerinde meydana gelen pasif toprak basıncı (σ'_p) 34.33 kN/m² ve enine elemanın pasif direnç oluşturan yüzey alanı (A_p) ise 0.013 m² olarak belirlenmiştir. Buna göre Test no:15 için toplam pasif kuvvetler aşağıdaki gibi Eşitlik 5.11 yardımı ile 0.74 kN olarak belirlenmiştir.

$$P_p = \sigma'_p A_p (n - 1)(\alpha_{p1}m_{p1} + \alpha_{p2}m_{p2} + \alpha_{p3}m_{p3})$$

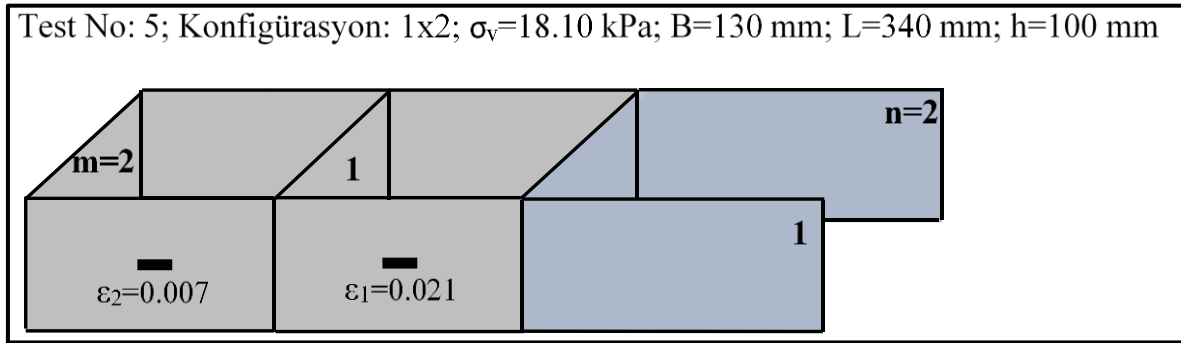
Test no:15 deney numunesi üzerinde meydana gelen toplam sürtünme direnci ise boyuna elemanlar üzerinde belirlenen birim uzama değerlerine bağlı olarak Eşitlik 5.17 yardımı ile belirlenmiştir. Test no:15 numunesi için boyuna elemanlar üzerinde meydana gelen birim uzamalar (ϵ) sırasıyla 0.014, 0.006 ve 0.003 olarak belirlenmiştir. Birim uzama değerleri hücresel yapı elemanına ait malzeme gerilme-birim uzama grafiğinde (“Hücresel Yapı Elemanlarının (Geocell) Çekme Kapasitelerinin Teorik Olarak Belirlenmesi” adlı bölüm Şekil 5.21’ e bakınız) yerine konularak herhangi bir boyuna eleman üzerinde meydana gelen

sürtünme direnci belirlenmiştir. Buna göre Test no:15 deney numunesi için boyuna elemanlar üzerinde meydana gelen sürtünme dirençleri sırasıyla (σ_i); birinci hücre için 8.47 kN/m, ikinci hücre için 4.29 kN/m ve üçüncü hücre için ise 2.29 kN/m olarak hesaplanmıştır. Buna göre boyuna elemanlar üzerinde meydana gelen toplam sürtünme kuvveti aşağıdaki gibi Eşitlik 5.17 yardımı ile 4.52 kN olarak belirlenmiştir.

$$P_s = m (\sigma_1 \cdot h + \sigma_2 \cdot h + \sigma_3 \cdot h)$$

Dolayısıyla hücresel yapı elemanının (Test no:15) çekme kapasitesi, Eşitlik 5.11 ve 5.17' de elde edilen toplam pasif ve sürtünme kuvvetlerinin Eşitlik 5.10' da yerine konularak 5.26 kN olarak hesaplanmıştır.

EK-4. Test no:5 deney numunesinin çekme gerilmesi-deplasman davranışı modeli



Şekil 4.1. Test no:5 deney numunesine ait şematik görünüm ve boyuna elemanlar üzerinde meydana gelen birim uzamalar

Maksimum çekme gerilmesinin belirlenmesi:

$$\tau_{\text{maks}} = \sigma_v \cdot c \cdot \left(\frac{L}{b}\right)^d \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \theta$$

Eşitlik yardımı ile belirlenmektedir. Burada ‘c’ ve ‘d’ sabit katsayılar olup sırasıyla 1.1717 ve 1.091 olarak alınmıştır. B/b=1 ve L/b=2.615 için α : 1.000, β =1.000 ve θ =1.000 olarak belirlenmiştir. Buna göre;

$$\tau_{\text{maks}} = 60.54 \text{ kN/m}^2 \text{ (Hesaplanan)}$$

olarak hesaplanmıştır.

Maksimum çekme gerilmesindeki deplasmanların (S_{maks} ve S_{ult}) belirlenmesi:

S_{maks} Eşitlik 6.11 yardımı ile belirlenmektedir.

$$S_{\text{maks}} = (\sigma_v) 46.87 \left(\frac{k}{L}\right)^{-1.106} \quad (6.11)$$

Burada başlangıç rijitliği (k) Çizelge 6.4’ te verildiği gibi 60692 kN/m³ alınmıştır. Buna göre Şekil 4.1’ te verilen düşey gerilme (σ_v) ve hücresel yapı elemanı boyu (L) değerleri Eşitlik 6.11’ de yerine konularak,

$$S_{\text{maks}} = 1.31 \text{ mm olarak belirlenmiştir.}$$

S_{ult} Eşitlik 6.12 yardımı ile belirlenmektedir.

$$S_{ult} = \frac{S_{maks}}{\sigma_v} \frac{k^{1.172}}{2932.8} \quad (6.12)$$

Burada deney sonuçlarına göre belirlenen çekme gerilmesi-deplasman eğrilerinden elde edilen S_{maks} değerleri denklemde yerine konularak,

$S_{ult}=8.21$ mm olarak belirlenmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : IŞIK, Adem
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.05.1985, Erciş
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (539) 357 53 66
 e-mail : isikadem@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / İnşaat Müh.	Devam ediyor
Yüksek lisans	İstanbul Teknik Üni. / İnşaat Müh.	2014
Lisans	Niğde Ömer Halisdemir Üni. / İnşaat	2009
Lise	Tevfik Sırrı Gür Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011-2014	İTÜ	Araştırma Görevlisi
2010-2011	Erzincan Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Isik, A., Iyisan, R., Cevikbilen, G., Bayin, A. (2013). Frost susceptibility of fine grained soils related to consistency limits. Proceedings, *2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering*, BCCCE, May 23–25. Epoka University, Tirana, Albania.

- Bayin, A., İyisan, R., Hatipoglu, M., Çevikbilen, G., Isik, A. (2013). The effect of testing methods on residual shear strength of cohesive soils. *In: Proceeding 2nd international Balkans conference on challenges of civil engineering*, Tirana, 769–776.
- İyisan, R., Işık, A., Çevikbilen, G. (2013). Zeminlerde don kabarması ve zeminlerin donma-çözülme sonrası davranışı. 5. *Geoteknik Sempozyumu*, Adana.
- Işık, A., Çevikbilen, G., İyisan, R. (2014). Freezing and Thawing Behavior of Compacted Soils. *11th International Congress On Advances In Civil Engineering*, İstanbul.
- Işık, A., Ünsal N., Gürbüz, A. Ve Şişman E. (2016). Fethiye yerleşim alanındaki zeminlerin SPT ve kayma dalga hızı verileriyle sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(4): 1027-1037.
- Isik, A., Gurbuz, A. (2018). Assessment of behavior of soil-geocell pullout capacity. *In: 11th International Conference on Geosynthetics*, 16-21 September, Seoul, Kore.
- Isik, A., Gurbuz, A. (2020). Pullout behavior of geocell reinforcement in cohesionless soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(1), 71-81.
- Isik, A., Gurbuz, A., Anil, O. (2020). Assessment of soil-geocell interaction behavior by laboratory pullout tests. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 27-38.

Hobiler

Ahşap, Kitap, Müzik



GAZİ GELECEKTİR..