



**YAY TİPİ ISI TRANSFERİ ARTTIRICI İÇEREN GÜNEŞ ENERJİSİ
DEPOLAMA ÜNİTESİNİN ENERJİ DEPOLAMA PERFORMANSININ
TAGUCHİ TABANLI GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ İLE OPTİMİZASYONU**

Mehmet Emin CANLI

**DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

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.

Mehmet Emin CANLI

23/01/2023

YAY TİPİ ISI TRANSFERİ ARTTIRICI İÇEREN GÜNEŞ ENERJİSİ DEPOLAMA
ÜNİTESİNİN ENERJİ DEPOLAMA PERFORMANSININ TAGUCHİ TABANLI GRİ
İLİŞKİSEL ANALİZ İLE OPTİMİZASYONU
(Doktora Tezi)

Mehmet Emin CANLI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ESNTİTÜSÜ
Ocak 2023

ÖZET

Yapılan bu çalışmada, yay tipi kanat yapısının kare bir enerji depolama ünitesindeki faz değiştiren malzemenin ergime ve enerji depolama performansına olan etkisi deneysel olarak incelenmiş ve bu deneysel çalışmadaki iş yükünü azaltmak için Taguchi tabanlı Gri ilişkisel optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Farklı boyutlardaki tel çapı, yay çapı ve yay adımına sahip yay tipi ısı transferi arttırıcılar, Taguchi deney tasarımı yönteminin belirttiği L_9 ortogonal deney dizilimi ile oluşturulmuş ve elde edilen deneysel sonuçlar Gri ilişkisel analiz yöntemi ile optimize edilerek en iyilenen deney dizilimi elde edilmiştir. Deneysel çalışmada ergime süresi, zamana bağlı iyileştirme oranı, enerji depolama verimi ve enerji depolama verimi iyileştirme oranı tanımlanmış ve her bir deney dizilimi için hesaplanmıştır. Gri ilişkisel analiz yöntemiyle bulunan en iyilenen deney diziliminin doğrulanması için örnek bir deney dizilimi ile karşılaştırması yapılmıştır. En iyilenen deney dizilimine etki eden 3 farklı parametrenin (tel çapı, yay çapı ve yay adımı) etki oranları ANOVA (Analysis of Variance) yöntemi ile belirlenmiştir. Regresyon analizi yöntemi ile tel çapı, yay çapı ve yay adımı parametrelerinin etki ettiği ergime süresi, zamana bağlı iyileştirme oranı, enerji depolama verimi ve enerji depolama verimi iyileştirme oranı terimlerini ifade eden regresyon bağıntıları geliştirilmiştir. Regresyon ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar istatistiksel hata analizi yöntemleriyle karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 92802
Anahtar Kelimeler : Güneş enerjisi depolama, gizli ısı depolama, yay tipi ısı transferi arttırıcı, Taguchi tabanlı Gri ilişkisel optimizasyon
Sayfa Adedi : 217
Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

OPTIMIZATION OF ENERGY STORAGE PERFORMANCE OF SOLAR THERMAL
ENERGY STORAGE UNIT CONTAINING SPRING TYPE HEAT TRANSFER
ENHANCER BY TAGUCHI BASED GREY RELATIONAL ANALYSIS

(Ph. D. Thesis)

Mehmet Emin CANLI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

In this study, the effect of the spring type fin structure on the melting and energy storage performance of the phase change material in a square energy storage unit was experimentally investigated and Taguchi based Grey relational optimization method was used to reduce the workload in this experimental study. Spring type heat transfer enhancers with different size of wire diameter, spring diameter and spring pitch were created with the L_9 orthogonal experimental sequence specified by Taguchi experimental design method and the experimental results obtained were optimized by the Grey relational analysis method and the optimized experimental sequence was obtained. In the experimental study, melting time, time dependent enhancement ratio, energy storage efficiency and energy storage efficiency enhancement ratio were defined and calculated for each experimental sequence. In order to confirm the optimized experimental sequence found by the Grey relational analysis method, a comparison with a sample experimental sequence was conducted. The effect ratios of 3 different parameters (wire diameter, spring diameter and spring pitch) affecting the optimized experimental sequence were determined by ANOVA (Analysis of Variance) method. With the regression analysis method, regression relations expressing the terms of melting time, time dependent enhancement ratio, energy storage efficiency and energy storage efficiency enhancement ratio, which were affected by wire diameter, spring diameter and spring pitch parameters, were developed. The results obtained from the regression and experimental study were compared with statistical error analysis methods.

Science Code : 92802
Key Words : Solar energy storage, latent heat storage, spring type heat transfer enhancer, Taguchi based Grey relational optimization
Page Number : 217
Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında en büyük katkıyı sunan ve değerli bilgi birikimi ile bana yol gösteren kıymetli danışmanım Prof. Dr. Sayın Adem ACIR'a teşekkürü bir borç bilirim. Tez izleme jürimde bulunan ve değerli tecrübelerini aktaran Prof. Dr. Sayın Mustafa İLBAŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Sayın Özgür EROL hocalarıma da ayrıca teşekkür ederim. Tez kapsamındaki deneyler sırasında tarafıma yardımcı olan ve değerli zamanını meşgul ettiğim Arş. Gör. Sayın Oğuz Kaan ÇİNİCİ'ye minnetlerimi sunarım.

Teşekkürlerin en büyüğünü hayat arkadaşım, kıymetli eşim Dr. Öğr. Üyesi Sayın Elif Süreyya KANYILMAZ CANLI'ya ederim. Her umutsuzluğa kapıldığımda bana destek olduğu, bana güvenmeyi ve inanmayı hiç bırakmadığı için minnettarım. Son olarak bana eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini sunan sevgili aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. ISIL ENERJİ DEPOLAMA.....	5
2.1. Duyulur Isı Depolama.....	7
2.2. Gizli Isı Depolama.....	8
2.3. Termokimyasal Isı Depolama.....	14
3. GİZLİ ISI ISIL ENERJİ DEPOLAMA (GIIED) SİSTEMLERİNDE ISI TRANSFERİ İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	17
3.1. Kapsülleme Yöntemi.....	18
3.2. Kanatçık (fin) ve Genişletilmiş Yüzeyler Kullanma Yöntemi.....	20
3.3. FDM İçerisine Gömülü Gözenekli Matrisler Ekleme Yöntemi.....	20
3.4. FDM İçerisinde Yüksek Isıl İletkenliğe Sahip Parçacıklar Ekleme Yöntemi.....	21
3.5. Çoklu FDM'nin Tek Sistemde Kullanılması Yöntemi.....	22
3.6. Isı Borularının Kullanılması Yöntemi.....	23
3.7. Farklı Isı Transferi İyileştirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	24
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	27
5. MATERYAL - METOT.....	59

	Sayfa
5.1. Deney Sisteminin Tasarımı.....	59
5.2. Enerji Depolama Performansının İncelenmesi.....	67
5.2.1. Depolanan enerji miktarının hesaplanması.....	67
5.2.2. Güneş simülatörü tarafından emici plakaya ulaştırılan enerji miktarının hesaplanması.....	70
5.2.3. Enerji depolama veriminin hesaplanması.....	70
5.2.4. İyileştirme oranlarının hesaplanması.....	70
5.3. Belirsizlik Analizi.....	71
5.3.1. Ölçüm araçlarının belirsizliği.....	71
5.3.2. Depolanan enerji miktarı ve enerji depolama veriminin belirsizliği.....	73
5.4. Taguchi Tabanlı Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Optimizasyon.....	75
5.4.1. Taguchi deney tasarımı yöntemi.....	76
5.4.2. Gri ilişkisel analiz (GİA) yöntemi.....	80
5.4.3. Kriter ağırlıklandırma yöntemleri.....	84
5.4.4. Varyans analizi (ANOVA).....	91
5.4.5. Doğrulama deneylerinin yapılması ve güven aralığının hesaplanması.....	94
5.4.6. Regresyon analizi.....	95
6. BULGULAR - TARTIŞMA.....	99
6.1. Zamana Bağlı Sıcaklık Dağılımı.....	99
6.2. Taguchi'ye Göre Elde Edilen Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi.....	103
6.3. Deneysel Sonuçların Doğruluğunun Araştırılması.....	112
6.4. Taguchi Tabanlı Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Optimizasyon.....	116
6.4.1. Sonuç parametrelerinin normalliklerinin değerlendirilmesi.....	118
6.4.2. Gri ilişkisel analiz (GİA) sonuçları.....	123
6.4.3. Doğrulama deneylerinin yapılması.....	130

	Sayfa
6.4.4. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları.....	136
6.4.5. Güven aralıklarının belirlenmesi.....	143
6.4.6. Regresyon analizi.....	144
6.4.7. Deneysel ve regresyon analizi ile elde edilen sonuç parametrelerinin karşılaştırılması.....	165
6.5. Belirsizlik Analizi Bulguları.....	182
6.6. Literatürdeki Çalışmalar ile Karşılaştırmalar.....	183
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	189
7.1. Sonuçlar.....	189
7.2. Öneriler.....	194
KAYNAKLAR.....	195
EKLER.....	211
EK-1. Taguchi'ye göre yapılan deneylerin zamana bağlı sıcaklık dağılımları.....	212
ÖZGEÇMİŞ.....	215

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. En çok tercih edilen duyulur ısı depolama malzemeleri.....	7
Çizelge 2.2. FDM'lerin avantaj, dezavantaj ve dezavantajlarının üstesinden gelmek için önerilen çözümler.....	12
Çizelge 2.3. Farklı karbon atomu sayısına sahip saf parafinlerin ergime noktaları ve gizli füzyon ısıları değerleri.....	13
Çizelge 5.1. Yay malzemesi ve GIİED ünitesi tasarımında kullanılan bakırın termo-fiziksel özellikleri.....	60
Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan faktör ve her bir faktörün seviyesi.....	61
Çizelge 5.3. P-1 PW'nin termo-fiziksel özellikleri.....	62
Çizelge 5.4. GIİED ünitesi içerisindeki ısı çiftlerinin yerleşim detayları.....	65
Çizelge 5.5. Ölçüm cihazları ve özellikleri.....	66
Çizelge 5.6. L ₉ ortogonal dizisi kullanılarak elde edilen deneysel tasarım.....	79
Çizelge 6.1. Deneylerde kullanılan L ₉ ortogonal deney tasarımı.....	99
Çizelge 6.2. L ₉ ortogonal deney tasarımına göre elde edilen deneysel sonuçlar.....	103
Çizelge 6.3. Standart Chauvenet kriteri değerlendirme değerleri.....	112
Çizelge 6.4. YTITA içeren deneysel ölçüm ve hesaplama sonuçlarının Chauvenet kriterine göre değerlendirilmesi.....	115
Çizelge 6.5. YTITA içermeyen (boş) deney diziliminde dâhil edildiği durumda deneysel ölçüm ve hesaplama sonuçlarının Chauvenet kriterine göre değerlendirilmesi.....	115
Çizelge 6.6. Taguchi deney tasarımı kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları.....	116
Çizelge 6.7. Tez çalışması kapsamında yapılan Taguchi tabanlı GİA optimizasyonunun iş akış diyagramı.....	117
Çizelge 6.8. Normallik test sonuçları.....	120
Çizelge 6.9. Her bir deney dizilimine ait Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametrelerinin referans serisi.....	123
Çizelge 6.10. Deney sonuçlarının GİA'ya göre normalizasyon yaklaşımları.....	123

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.11. Her bir deney dizilimine ait Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametrelerinin normalizasyon matrisi.....	124
Çizelge 6.12. Her bir deney dizilimine ait Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametrelerinin nomalizasyon değerleri için uzaklık matrisi.....	124
Çizelge 6.13. Her bir deney dizilimine ait Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametrelerinin gri ilişkisel katsayı (GİK) matrisi.....	125
Çizelge 6.14. Kriter ağırlıklandırma işlemine göre elde edilen sonuç parametrelerine ait ağırlıklar.....	126
Çizelge 6.15. Kriter ağırlıkların eklendikten sonra her bir deney dizilimine ait Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametrelerinin gri ilişkisel katsayı (GİK) matrisi.....	126
Çizelge 6.16. Her bir deney dizilimine ait Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametrelerinin kriter ağırlıklarının dikkate alınması ile hesaplanmış gri ilişkisel dereceleri (GİD) ve deney sıralaması.....	127
Çizelge 6.17. Kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen gri ilişkisel dereceleri için tepki dağılımı.....	129
Çizelge 6.18. Kriter ağırlıklandırmada Gri entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen gri ilişkisel dereceleri için tepki dağılımı.....	129
Çizelge 6.19. Kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'nin deneysel doğrulama sonuçları.....	131
Çizelge 6.20. Kriter ağırlıklandırmada Gri entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen gri ilişkisel derecenin deneysel doğrulama sonuçları.....	132
Çizelge 6.21. Δt 'nin deneysel doğrulama sonuçları.....	133
Çizelge 6.22. ZBİO'nun deneysel doğrulama sonuçları.....	133
Çizelge 6.23. η 'nin deneysel doğrulama sonuçları.....	134
Çizelge 6.24. EDVİO'nun deneysel doğrulama sonuçları.....	136
Çizelge 6.25. Kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'nin S/N oranına göre ANOVA sonuçları.....	137
Çizelge 6.26. Kriter ağırlıklandırmada Gri entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'nin S/N oranına göre ANOVA sonuçları.....	139
Çizelge 6.27. Δt 'nin S/N oranına göre ANOVA sonuçları.....	140

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.28. ZBİO'nun S/N oranına göre ANOVA sonuçları.....	141
Çizelge 6.29. η 'nün S/N oranına göre ANOVA sonuçları.....	142
Çizelge 6.30. EDVİO'nun S/N oranına göre ANOVA sonuçları.....	143
Çizelge 6.31. Sonuç parametreleri için güven aralıkları.....	144
Çizelge 6.32. Δt ve bağımsız değişkenler olan tel çapı (d, mm), yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar.....	145
Çizelge 6.33. Δt için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları.....	146
Çizelge 6.34. Δt için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin katsayıları.....	147
Çizelge 6.35. ZBİO ve bağımsız değişkenler olan tel çapı (d, mm), yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar.....	148
Çizelge 6.36. ZBİO için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları.....	149
Çizelge 6.37. ZBİO için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin katsayıları.....	149
Çizelge 6.38. η ve bağımsız değişkenler olan tel çapı (d, mm), yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar.....	150
Çizelge 6.39. η için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları.....	151
Çizelge 6.40. η için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin katsayıları.....	151
Çizelge 6.41. EDVİO ve bağımsız değişkenler olan tel çapı (d, mm), yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar.....	152
Çizelge 6.42. EDVİO için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları.....	153
Çizelge 6.43. EDVİO için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin katsayıları.....	153
Çizelge 6.44. Çok değişkenli kuvvet fonksiyonu (ÇDKF) şeklinde regresyon analizi için kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler.....	155

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.45. $\Delta t'$ ve bağımsız değişkenler olan tel çapı (d' , mm) yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar.....	156
Çizelge 6.46. $\Delta t'$ için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları.....	156
Çizelge 6.47. $\Delta t'$ için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklindeki doğrusal regresyon denkleminin katsayıları.....	157
Çizelge 6.48. ZBİO' ve bağımsız değişkenler olan tel çapı (d' , mm), yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar.....	158
Çizelge 6.49. ZBİO' için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları.....	159
Çizelge 6.50. ZBİO' için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklindeki doğrusal regresyon denkleminin katsayıları.....	159
Çizelge 6.51. η' ve bağımsız değişkenler olan tel çapı (d' , mm), yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar.....	160
Çizelge 6.52. η' için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları.....	161
Çizelge 6.53. η' için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklindeki doğrusal regresyon denkleminin katsayıları.....	162
Çizelge 6.54. EDVİO' ve bağımsız değişkenler olan tel çapı (d' , mm) yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar.....	163
Çizelge 6.55. EDVİO' için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları.....	163
Çizelge 6.56. EDVİO' için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklindeki doğrusal regresyon denkleminin katsayıları.....	164
Çizelge 6.57. İki farklı regresyon analizi ile hesaplanan Δt parametresinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.....	165
Çizelge 6.58. İki farklı regresyon analizi ile hesaplanan ZBİO parametresinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.....	169
Çizelge 6.59. İki farklı regresyon analizi ile hesaplanan η parametresinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.....	172
Çizelge 6.60. İki farklı regresyon analizi ile hesaplanan EDVİO parametresinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.....	176

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.61. Eğitim verilerine göre regresyon analizlerinin istatistiki değerlendirilmesi.....	180
Çizelge 6.62. Regresyon denklemlerine göre tüm deneysel verilerin istatistiki değerlendirilmesi.....	181
Çizelge 6.63. GIIED ünitesinde kullanılan FDM’lerin ergime sürelerinin ve enerji depolama davranışlarının literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması.....	184

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Isıl enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.2. Isıtılan bir maddenin sıcaklık-zaman diyagramı.....	6
Şekil 2.3. Katı-sıvı faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması.....	11
Şekil 3.1. Gövde borulu GID ünitesinde çoklu FDM kullanımı.....	23
Şekil 3.2. a) Gövde borulu bir ısı değiştiricinde ısı borusu kullanımı b) Kullanılan ısı borusunun kanatlı yapısı.....	24
Şekil 5.1. FDM olarak kullanılan PW'a (P-1) ait DSC analiz sonucu.....	64
Şekil 5.2. Isıl çiftlerin GIIED ünitesi içerisindeki yerleşimi.....	65
Şekil 5.3. Ağırlıklandırma yöntemlerinin en genel haliyle sınıflandırılması.....	85
Şekil 5.4. Sürekli entropi türü.....	88
Şekil 6.1. $A_3B_1C_3$ deney dizilimine ait zamana bağlı sıcaklık değişimi.....	100
Şekil 6.2. L_9 ortogonal tasarımına göre deneysel sonuçlar, a) Δt , b) ZBİO, c) η ve d) EDVİO.....	104
Şekil 6.3. Girdi parametrelerinin Δt 'ye etkisi, a) Δt -d-D değişimi, b) Δt -d-p değişimi, c) Δt -D-p değişimi.....	107
Şekil 6.4. Girdi parametrelerinin ZBİO'ya etkisi, a) ZBİO-d-D değişimi, b) ZBİO-d-p değişimi, c) ZBİO-D-p değişimi.....	108
Şekil 6.5. Girdi parametrelerinin η 'ye etkisi, a) η -d-D değişimi, b) η -d-p değişimi, c) η -D-p değişimi.....	110
Şekil 6.6. Girdi parametrelerinin EDVİO'ya etkisi, a) EDVİO-d-D değişimi, b) EDVİO-d-p değişimi, c) EDVİO-D-p değişimi.....	111
Şekil 6.7. Deney sayısına göre çizilmiş olan standart Chauvenet kriteri eğrisi.....	113
Şekil 6.8. Normal, çarpık ve dik dağılımlar.....	119
Şekil 6.9. Δt için normal olasılık grafiği; a) Tüm girdi değişkenlerine göre, b) Tel çapına göre, c) Yay çapına göre ve d) Yay adımına göre.....	121
Şekil 6.10. ZBİO için normal olasılık grafiği; a) Tüm girdi değişkenlerine göre, b) Tel çapına göre, c) Yay çapına göre ve d) Yay adımına göre.....	121

Şekil	Sayfa
Şekil 6.11. η için normal olasılık grafiği; a) Tüm girdi değişkenlerine göre, b) Tel çapına göre, c) Yay çapına göre ve d) Yay adımına göre.....	122
Şekil 6.12. EDVİO için normal olasılık grafiği; a) Tüm girdi değişkenlerine göre, b) Tel çapına göre, c) Yay çapına göre ve d) Yay adımına göre.....	122
Şekil 6.13. Kriter ağırlıklandırma yöntemi olarak shannon entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD değerlerinin yapılan deneyler ile değişimi...	128
Şekil 6.14. Kriter ağırlıklandırma yöntemi olarak gri entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD değerlerinin yapılan deneyler ile değişimi.....	128
Şekil 6.15. Deneysel Δt ile ÇDDRA sonuçlarının karşılaştırılması.....	166
Şekil 6.16. Deneysel Δt ile ÇDKF şeklindeki regresyon sonuçlarının karşılaştırılması..	167
Şekil 6.17. Deneysel olarak ölçülen Δt ile ÇDDRA denkleminde hesaplanan Δt 'nin değişimi.....	167
Şekil 6.18. Deneysel olarak ölçülen Δt ile ÇDKF şeklindeki regresyon denkleminde hesaplanan Δt 'nin değişimi.....	168
Şekil 6.19. Deneysel ZBİO ile çok değişkenli doğrusal regresyon sonuçlarının Karşılaştırılması.....	169
Şekil 6.20. Deneysel ZBİO ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	170
Şekil 6.21. Deneysel olarak ölçülen ZBİO ile çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminde hesaplanan ZBİO'nun değişimi.....	171
Şekil 6.22. Deneysel olarak ölçülen ZBİO ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denkleminde hesaplanan ZBİO'nun değişimi.....	171
Şekil 6.23. Deneysel η ile çok değişkenli doğrusal regresyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	173
Şekil 6.24. Deneysel η ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	174
Şekil 6.25. Deneysel olarak ölçülen η ile çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminde hesaplanan η 'nin değişimi.....	174
Şekil 6.26. Deneysel olarak ölçülen η ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denkleminde hesaplanan η 'nin değişimi.....	175
Şekil 6.27. Deneysel EDVİO ile çok değişkenli doğrusal regresyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	176

Şekil	Sayfa
Şekil 6.28. Deneysel EDVİO ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	177
Şekil 6.29. Deneysel olarak ölçülen EDVİO ile çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminde hesaplanan EDVİO'nun değişimi.....	178
Şekil 6.30. Deneysel olarak ölçülen EDVİO ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denkleminde hesaplanan EDVİO'nun değişimi.....	178

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Isıl iletkenlik iyileştirmede kullanılan farklı malzemeler.....	18
Resim 3.2. Düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılan FDM'lerin kapsüllenmesi için ticari olarak farklı firmalar tarafından üretilen kap malzemeleri.....	19
Resim 5.1. Deney düzeneği.....	59
Resim 5.2. Farklı boyutlardaki deney dizilimleri.....	61
Resim 6.1. $A_3B_3C_2$ deney dizilimine ait 40-160 dk. aralığındaki enerji depolama sürecine bağlı termal kamera görüntüleri ve zamana bağlı ergime değişimi.....	102

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

α	Anlamlılık düzeyi
β	Normalize edilmiş ağırlık değeri
d	Tel çapı (mm)
D	Yay çapı (mm)
e	Gri Entropi değeri
E	Depolanan enerji miktarı (kJ)
η	Enerji depolama verimi
Δh_m	Ergime gizli ısısı (kJ/kg)
K	Normalizasyon katsayısı
λ	Bağıl ağırlık
p	Yay adımı (mm)
q	Güneş radyasyonu (W/m^2)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
Δt	Ergime süresi (dk)
w	Önem ağırlığı
y	Gri ilişkisel sürecin normalize edilmiş değeri
ξ	Gri ilişkisel katsayısı
Δ	Sapma
Y	Gri ilişkisel derecesi
φ	Ayırt edici katsayı

Kısaltmalar

Açıklamalar

ÇDDRA	Çok değişkenli doğrusal regresyon analizi
ÇDKF	Çok değişkenli kuvvet fonksiyonu
DID	Duyulur ısı depolama

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
EDVİO	Enerji depolama verimi iyileştirme oranı
FDM	Faz değıştiren malzeme
FFM	Ful faktöriyel metodu
FV	Fotovoltaik
FV/T	Fotovoltaik/Termal
GA	Genetik algoritma
GG	Genişletilmiş grafit
GİD	Gizli ısı depolama
GIİED	Gizli ısı ısıt enerji depolama
GİA	Gri ilişkisel analiz
GİD	Gri ilişkisel derecesi
GİO	Gri ilişkisel oluşum
GİTTA	Gri ilişki tabanlı taguchi analizi
HAD	Hesaplama akışkanlar dinamiği
IED	Isıl enerji depolama
IDÜ	Isı depolama ünitesi
ITA	Isı transferi akışkanı
KF	Karbon fiber
MAPE	Ortalama mutlak yüzde hata
MDSC	Modüle edilmiş diferansiyel taramalı kalorimetre
NİFDM	Nano iyileştirilmiş faz değıştiren malzeme
PCR	Yüzde katkı oranı
PW	Parafin wax
RA	Regresyon analizi
SEM	Sonlu elemanlar metodu
SGSEM	Standart galerkin sonlu elemanlar metodu
S/N	Sinyal/gürültü oranı
TKED	Termokimyasal enerji depolama
YTITA	Yay tipi ısı transferi artırıcı
YYY	Yanıt yüzeyi yöntemi
ZBİO	Zamana bağlı iyileştirme oranı

Kısaltmalar**Açıklamalar****f**

Son hal

i

Başlangıç hal

l

Gizli ısı

s

Duyulur ısı

1. GİRİŞ

Sanayi devriminden beri enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Teknolojinin gelişmesi enerji talebine olan ihtiyacı yükseltmekte ve buna bağlı olarak enerji arzının sağlanmasını gerekli kılmaktadır. Enerji talebindeki artış, hükümetlerin bölgesel, ulusal ve uluslararası seviyelerdeki enerji arzını temin etmelerini gerekli kılmaktadır. Enerji arzının sağlanması için yenilenebilir enerji kaynakları, mevcut geleneksel (fosil) enerji kaynaklarının yerini almaya başlamıştır. Çünkü fosil enerji kaynaklarının yakın gelecekte tükenecek olması bu durumun en önemli sebebidir. Bunun yanında sera gazı emisyonları ve buna bağlı olarak ortaya çıkan küresel iklim değişikliği yenilenebilir enerji üretiminin payını artırmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (UEA) yayınladığı bir rapora göre 2018 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi 1220 gigawatt (GW) iken 2024 yılında yaklaşık %50 artış ile 2502 GW seviyelerine ulaşacaktır [1]. UEA'ya göre beklenen bu artışla birlikte, geleneksel fosil yakıt ve nükleer enerjiyi içeren yapının üçte ikisini yenilenebilir enerjinin oluşturması beklenmektedir [1]. Bunun yanında tüm yenilenebilir enerjilerin kapasitesindeki artışın neredeyse %60'ı güneş enerjisinden üretilen enerji ile karşılanacaktır [1]. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjideki artış önemli seviyelere ulaşmış olmasına karşın, sürekli (kesintisiz) yapıda olmamaları en büyük dezavantajdır [2]. Kesintili enerji kaynakları, elektrik şebekesinin istikrarını ve güvenilirliğini azaltmaktadır. Bunu önlemek için yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji depolanarak, gerektiğinde şebekeye verilmeli ve böylece sistemin istikrarlı ve güvenli olması sağlanmalıdır.

Yukarıda bahsedildiği üzere, örneğin güneş enerjisi gündüz depolanmalı ve akşamda depolanan enerjinin belirli amaçlar için kullanılması sağlanmalıdır. Güneş enerjisi gece şartlarında veya güneşin azaldığı saatlerde de kullanılması amacıyla ısı enerji depolama (IED) yöntemleri ile depolanabilmektedir [2]. Sıcak su, havalandırma ve ısıtma uygulamalarında, duyulur ısı depolama (DID) için su, kum ve taş vb. malzemeler kullanılırken, gizli ısı depolamada (GID) ise faz değiştiren malzemeler (FDM), tuz hidratlar, yağlar vb. malzemeler çoğunlukla tercih edilmektedir [2]. Düşük ve orta sıcaklık uygulamalarında GID amacıyla en çok parafin wax (PW) tercih edilmektedir. Çünkü parafin zehirli (toksik) değildir, uzun kullanım ömrüne sahiptir, kimyasal olarak daha karardır, faz değişimi esnasında tuz hidratlara göre aşırı soğuma göstermez, ucuz ve kolay bulunabilir

yapıdadır [3-8]. FDM olarak kullanılan PW'nin en büyük eksikliği ise düşük ısı iletim katsayısına sahip olmasıdır [2, 3, 5, 7]. FDM'nin düşük ısı iletim katsayısına sahip olması, enerji depolama ve geri kazanım sürelerinin uzamasına neden olmakta ve istenilen enerji depolama hacimlerine ulaşılamamasıyla sonuçlanmaktadır. Bu olumsuz durumu bertaraf etmek için, aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır:

- Yüksek ısı iletim katsayısına sahip metal köpük malzemeleri FDM içerisine ekleme [9-11].
- Yüksek ısı iletim katsayısına sahip nano boyutta parçacıkları FDM içerisine ilave etme [12, 13].
- FDM'yi mikro/makro boyutta kapsülleyerek enerji depolama işleminde kullanma [14, 15].
- FDM içerisine karbon nano tüp yerleştirme [16, 17].

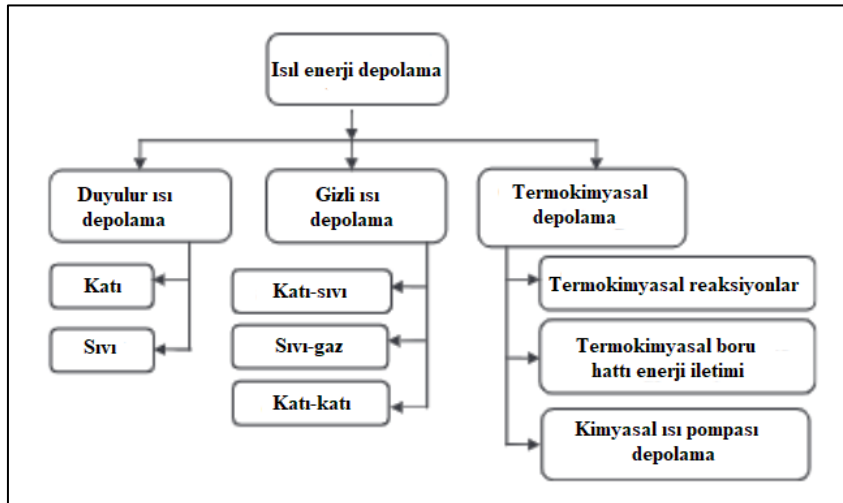
Isı transferi artırma yöntemleri ile FDM'nin düşük ısı iletkenlik sorunu bir nebze çözüme kavuşsa da enerji depolama malzemesinin kullanılacağı depolama sistemindeki miktarını düşürdüğü için, yine de istenilen yüksek enerji depolama oranlarına ulaşılamamaktadır. Bunun önüne geçmek için ise tek bir FDM kullanılarak yapılan enerji depolama işlemi yerine birden fazla FDM'yi bünyesinde barındıran kaskad (kademeli) enerji depolama sistemlerinin (KEDS) kullanılmasıdır [18-21]. KEDS'nin avantajları olmasına karşın, sistem içerisinde birden fazla FDM kullanılması depolama sisteminin üretimini karmaşıktırmakta ve üretim ve uygulama maliyetlerini yükseltmektedir. KEDS'ler örneğin odaklamalı (yoğunlaştırıcı) güneş enerjisi santrallerinde üretilen yüksek ısının sonraki kullanımlar için depolanmasında tercih edilebilir. Fakat düşük sıcaklık uygulamalarında yapıya fazladan maliyet artışı yükleyeceği için tek FDM kullanılan enerji depolama sistemleri daha çok tercih edilmektedir.

Düşük sıcaklık uygulamalarında, FDM'nin düşük ısı iletimi performansı düşük maliyetli, kolay üretilebilir ve basit yapıda olmaları dolayısıyla kanatçıklar (genişletilmiş yüzeyler) kullanılarak iyileştirilmektedir [5, 7, 22]. En temel pasif ısı transferi iyileştirme yöntemlerinden olan kanatçık kullanımı araştırmacılar tarafından halen yoğun bir araştırma konusu olarak ele alınmaktadır. Kare bir depolama alanındaki FDM üzerine yapılan literatür çalışmalarında çoğunlukla yatay ve dikey pozisyonundaki düz kanatların [5, 8, 22-26], Y şekilli kanat yapılarının [27], L şeklindeki kanat yapılarının [28] vb. kullanımı üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Tez çalışması kapsamında yapılan bu çalışmada ise yay tipi kanat yapısının

kare bir enerji depolama ünitesindeki FDM'nin ergime ve enerji depolama performansına olan etkisi deneysel olarak incelenmiş ve bu deneysel çalışmadaki iş yükünü azaltmak için Taguchi tabanlı gri ilişkisel optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Yapılan tez çalışmasında farklı boyutlardaki yaylar, tel çapı (d , mm), yay çapı (D , mm) ve yay adımı (p , mm) dikkate alınarak Taguchi deney tasarımı yönteminin belirttiği L_9 ortogonal deney dizilimi ile oluşturulmuş ve elde edilen deneysel sonuçlar gri ilişkisel analiz (GİA) yöntemi ile optimize edilerek en iyilenen deney dizilimi elde edilmiştir. Deneysel çalışmada her bir deney dizilimindeki FDM'nin ergime süresi (Δt), zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİO), enerji depolama verimi (η) ve enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİO) tanımlanmış ve hesaplanmıştır. Bulunan deney diziliminin doğrulaması için örnek bir deney dizilimi ile karşılaştırması yapılmıştır. En iyilenen deney dizilimine etki eden 3 farklı parametrenin (tel çapı, yay çapı ve yay adımı) etki oranları ANOVA (Analysis of Variance) yöntemi ile belirlenmiştir. Regresyon analizi yöntemi ile tel çapı, yay çapı ve yay adımı parametrelerinin etki ettiği ergime süresi (Δt), zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİO), enerji depolama verimi (η) ve enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİO) terimlerini ifade eden regresyon bağıntıları geliştirilmiştir. Regresyon ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar istatistiksel hata analizi yöntemleri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

2. ISIL ENERJİ DEPOLAMA

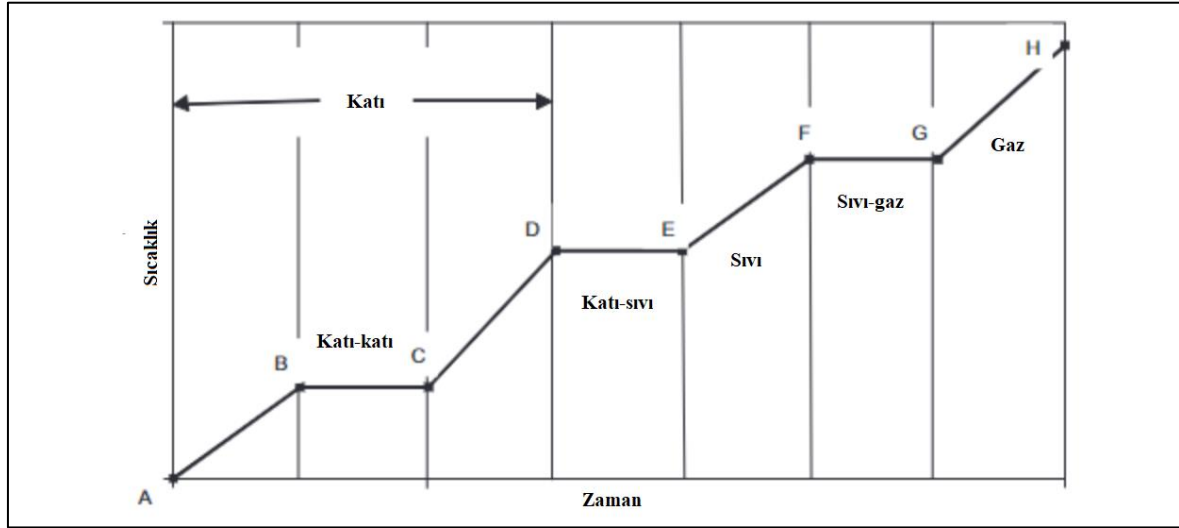
Çok eski zamanlarda, insanların karları toplayıp ortam sıcaklığının yükseldiği zamanlarda bunları serinlemek, su elde etmek ve ürünlerini daha uzun süre saklamak amacıyla kullanmaları bilinen en eski ısı enerji depolama (IED) yöntemidir [29]. Çoğu sistemde, enerji arzı ile enerji tüketimi arasında bir uyumsuzluk vardır. Bu uyumsuzluk, enerji depolama işlemi ile giderilebilmekte ve böylece sermaye maliyetlerinden tasarruf edilebilmektedir. IED sistemleri, mevcut sistemlerin daha etkin ve çevreye daha az zararlı hale getirilmesine yardımcı olmaktadır. Artan enerji talepleri, fosil yakıt kıtlığı ve çevresel etki konusundaki endişeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine ivme kazandırmıştır. Önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisi, kesintili bir yapıya sahip olduğu için etkin kullanımı kısmen verimli ve etkili enerji depolama sistemlerine bağlıdır. Güneş enerjisi sistemlerinde enerji depolama kullanılmadığı takdirde, enerji ihtiyacının büyük bir kısmı yedek veya yardımcı kaynaklardan üretilen enerjiden karşılanacak ve bu nedenle yıllık güneş yükü oranı çok düşük olacaktır. Isıl enerji, enerji bol olduğunda depolanabilmekte ve gerektiğinde kullanılabilir. Ancak güneş enerjisinin önemli bir enerji kaynağı olabilmesi için verimli, ekonomik ve güvenilir IED cihazları ve yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir [29-31]. IED sistemlerinin genel sınıflandırılması Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Isıl enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması [32]

Isıl enerji en temel şekliyle, bir maddenin sıcaklığının düşürülmesi veya yükseltilmesi yani duyulur ısısında bir değişim meydana getirilmesi, bir maddenin fazının değiştirilmesi yani

gizli ısısında bir değişim meydana getirilmesi ya da termokimyasal veya bunların birleşimi şeklinde depolanabilmektedir [29-33]. Bir maddeye ısı şeklinde enerji verildiğinde, iç enerjisinde meydana gelen değişim Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Isı transferine bağlı olarak maddenin sıcaklığında bir artış (duyulur ısıtma) ve faz değişikliğinin (gizli ısıtma) meydana gelmesi beklenen bir durumdur. A noktasındaki ilk katı halden başlayarak, maddeye ısı verilmesi önce katı maddenin A-B bölgesinde duyulur ısınmasına, ardından B-C bölgesinde sabit sıcaklıkta kristal yapı değişikliği ile katı-katı faz değişimine ve yine C-D bölgesinde ısı almaya devam ettiği sürece duyulur ısıtmaya maruz kalmaktadır. D-E bölgesinde ise sabit sıcaklıkta gizli ısıda bir değişim meydana gelerek katı-sıvı faz değişimi oluşur, E-F bölgesinde duyulur ısıtmaya bağlı olarak sıcaklık artışı meydana gelmektedir. F-G bölgesinde ise sabit sıcaklıkta ısı artışına bağlı olarak sıvı-gaz faz değişimi oluşmaktadır. Son olarak G-H bölgesinde ise duyulur ısıtma ile gaz fazın sıcaklığı artmaktadır [29, 30].



Şekil 2.2. Isıtılan bir maddenin sıcaklık-zaman diyagramı [29]

Isıl enerji tüketilmediği takdirde çevreye yayılarak israfa neden olmaktadır. Yakıtların yakılması ile ihtiyaç bazında ısı enerjisi üretimi sağlanmaktadır. Bu nedenle talep-arz boşlukları, ısı enerjisi talebini karşılamak için daha fazla yakıt tüketilmesine neden olmaktadır [31]. IED sistemleri hem yenilenebilir enerji sistemlerinde hem de fazla veya atık ısıların sonraki kullanımlar için depolanarak değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. IED sistemlerinde temel amaç, tüketilene kadar fazla ısıyı depolayarak ısı enerjisi kaybını önlemektir. Büyük mesafelere dağılmış çok sayıda küçük ısı kaynağından gelen atık ısıyı toplamak, depolamak ve kullanmak için gerekli malzeme ve emek maliyeti göz önüne

alındığında, IED sistemini her ısı kaynağında uygulamak pratik değildir. Ancak, güneş enerjisi, jeotermal enerji, fosil yakıtlı enerji santralleri, nükleer santral, endüstriyel atık ısı vb. gibi büyük ısı kaynakları için IED sistemlerinin ekonomik bir şekilde uygulama alanı bulunmaktadır [31].

2.1. Duyulur Isı Depolama

Bir maddenin sıcaklığının düşmesi veya yükselmesine bağlı olarak ve maddede faz değişimine neden olmadan meydana gelen ısı enerji depolama işlemine duyulur ısı depolama (DID) denir. DID malzemeleri duyulur ısıyı, sıcaklıklarında ve özgül ısılarında meydana gelen değişimine bağlı olarak bünyelerinde depolar veya depoladıkları duyulur ısıyı geri verirler. Duyulur ısı şeklinde depolanan enerji miktarı Eş. 2.1’de verilen ifade ile hesaplanmaktadır [2, 5, 7, 12, 29-33]:

$$Q_s = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dT = mc_p(T_f - T_i) \quad (2.1)$$

Burada, Q_s (kJ) duyulur olarak depolanan ısı enerji miktarını, m (kg) ısı depolama malzemesinin miktarını, c_p (kJ/kgK) depolama malzemesinin özgül ısısını ve T_f ile T_i enerji depolama işlemi sonundaki ve başlangıcındaki depolama malzemesinin sıcaklığını ifade etmektedir. Depolanan duyulur ısı miktarı depolama malzemesinin yoğunluğu, hacmi, özgül ısısı ve sıcaklık değişimi ile doğru orantılıdır [2, 5, 7, 12, 29-33].

Çizelge 2.1. En çok tercih edilen duyulur ısı depolama malzemeleri [32]

Malzeme	Çalışma sıcaklığı (°C)	Isı kapasitesi (kJ/kgK)	Yoğunluk (kg/m ³)
Su	0-100	4,190	1000
Motor yağı	160’a kadar	1,880	888
Terminol	-9-343	2,100	750
Lityum	180-1300	4,190	510
Oktan	126’a kadar	2,400	704
Tuğla	1000	0,840	1698
Alüminyum	660’a kadar	0,896	2707
Beton	1000	1,130	2240

Isıl enerjinin duyulur ısı formunda depolanabilmesi için katı (taş, kum, beton, tuğla vb.), sıvı (su, termal (mineral) yağlar, sıvı metaller) ve sıvı-katı (eriyik tuzlar) maddelerin bir arada kullanıldığı farklı depolama malzemeleri kullanılmaktadır. DID sistemlerinde kullanılan farklı malzemeler örnek olarak Çizelge 2.1’de verilmiştir. DID malzemeleri, yüksek sıcaklıklarda termal olarak kararlıdır ve bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamaları için en çok kullanılan IED malzemeleridir. DID malzemeleri, sıvı metaller ve termal yağlar dışında genellikle düşük maliyetli malzemelerdir. DID malzemelerinin temel dezavantajı, depolanan enerjinin geri kazanımı (deşarj) işlemi sırasındaki sıcaklık kararlılığıdır. Deşarj devam ederken, iş akışkanının DID sisteminden çıkış sıcaklığı zamanla kademeli olarak azalmaya başlar. Gizli ısı depolama (GID) ile karşılaştırıldığında, malzemelerin özgül ısısı 50 ile 100 kat daha küçüktür ve bu nedenle IED yoğunluğu daha küçüktür. Yüksek sıcaklık uygulamaları için yine de DID malzemeleri kullanılmaktadır [31].

2.2. Gizli Isı Depolama

Gizli ısı depolama (GID), ısı depolama malzemesinin katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz, sıvı-gaz ya da tam tersi şeklinde faz değişimine maruz kalmasına bağlı olarak bünyesine gizli füzyon ısını emmesi (depolaması) veya bünyesindeki enerjiyi salması (geri kazanımı) olarak ifade edilmektedir [34, 35]. GID sisteminde kullanılan depolama malzemesinin iç enerjisindeki değişim faz değişimine neden olmakta ve meydana gelen faz değişimi çok az sıcaklık dalgalanmasıyla veya yaklaşık sabit sıcaklıkta meydana gelmektedir [30-35]. Bu nedenle GID sistemlerinde kullanılan enerji depolama malzemelerine faz değıştiren malzemeler (FDM) tanımlaması yapılmaktadır. GID uygulamasında depolanan veya depolanan enerjinin geri kazanılan miktarının hesaplaması aşağıda verilen Eş. 2.2 kullanılarak yapılmaktadır [26-35].

$$Q_l = m a_m \Delta h_m \quad (2.2)$$

Burada Q_l (kJ) gizli ısı formunda depolanan ısı enerjisi miktarını, m (kg) FDM’nin miktarını, a_m hesaplama yapılan andaki ergiyen FDM yüzdesini ve Δh_m (kJ/kg) FDM’nin en belirleyici özelliği olan ergime gizli ısını (gizli füzyon ısısı, faz değışim entalpisi, ergime entalpisi) ifade etmektedir. Eş. 2.2’den de anlaşılacağı üzere GID sistemlerinde en önemli unsur depolama için kullanılacak olan FDM’nin yüksek ergime gizli ısına sahip olmasıdır.

GID uygulamalarında genellikle katı-sıvı faz değişimi sürecine sahip FDM'ler kullanılmaktadır. Katı-gaz ve sıvı-gaz dönüşümler, en yüksek faz değişimi gizli ısıya değerine sahiptir. Bununla birlikte, buharlaşmanın meydana geldiği durumda, FDM'nin hacminde büyük miktarda hacimsel genişleme meydana gelmektedir. Bu nedenle depolama işleminde yüksek basınçla dayanıklı kapların kullanılması bu işlemi karmaşıktırma ve kullanım alanını sınırlandırmaktadır [29-37]. Sıvı-sıvı GID sistemlerinde depolanacak enerji miktarı oldukça azdır [37]. Katı-katı dönüşümlerde, FDM bir kristal yapıdan diğer kristal yapıya dönüşürken bünyesine gizli ısı depolamaktadır [35]. Katı-katı dönüşümler, katı-sıvı dönüşümler ile karşılaştırıldıklarında genellikle düşük gizli ısı depolamaktadırlar. Bunun yanında düşük hacimsel değişim göstererek daha az rijit kaba ihtiyaç duymakta ve daha fazla tasarım esnekliği göstermektedir [35-37]. Yapısında sıvı FDM'nin bulunmaması herhangi bir sızıntı riskini de ortadan kaldırmaktadır [35-37].

Katı-sıvı faz dönüşümleri, sıvı-gaz faz dönüşümlerinden nispeten daha küçük gizli ısı depolama kabiliyetine sahiptir. Bununla birlikte, bu dönüşümler hacimde yalnızca küçük bir değişikliği (%10 veya daha az mertebesinde) içerir [35]. Katı-sıvı FDM dönüşümlerinin, IED sistemlerinde kullanımı için ekonomik olarak çekici olduğu kanıtlanmıştır. FDM'lerin kendileri ısı transferi ortamı olarak kullanılamaz. Ayrı bir ısı transferi ortamı, enerjiyi bir kaynaktan FDM'ye ve FDM'den yüke doğru aktarmak için kullanılacak bir ısı değiştiricisi ile beraber kullanılmadır [35]. Kullanılacak ısı değiştiricisi, FDM'lerin düşük ısı yayılım gösterdiği bilgisi göz önünde bulundurularak özel olarak tasarlanmalıdır [35]. FDM'lerin ergime sırasındaki hacim değişiklikleri, kullanılacakları kapların özel olarak tasarlanmasını gerektirecektir. Bu hacim değişikliklerini sönümleyebilmeli ve ayrıca kullanılan FDM ile uyumlu olmalıdır [35].

Başlangıçta, FDM'ler geleneksel depolama malzemeleri gibi çalışmakta ve ısıyı emdikçe sıcaklıkları yükselmektedir. Sıcaklık yükselip FDM'nin ergime derecesine ulaştığında ise geleneksel DID malzemelerinin aksine, FDM neredeyse sabit bir sıcaklıkta ısıyı emerek faz değiştirmektedir. Su, duvar veya kaya gibi DID malzemelerine göre birim hacim başına 5-14 kat daha fazla ısı GID malzemeleri tarafından depolanmakta veya istenildiğinde geri verilmektedir [35]. FDM'lerin GID sistemlerinde kullanılabilmesi için taşınmaları gereken kimyasal, kinetik, termodinamik ve ekonomik özellikler aşağıda sıralanmıştır [34-39]:

- Uygun faz-geçiş sıcaklığına sahip olmalıdır.

- Yüksek gizli füzyon ısısına sahip olmalıdır.
- İyi ısı transferi özelliği göstermelidir. Yani yüksek ısıl iletkenlik özelliği göstermelidir.
- Uygun faz dengesine ve yüksek yoğunluğa sahip olmalıdır. Çünkü ergime/katılaşma sırasında faz kararlılığı, ısı depolamanın ayarlanmasına yardımcı olmaktadır.
- Faz dönüşümünde küçük hacimsel değişiklik göstermeli ve düşük buhar basıncına sahip olmalıdır. Çünkü her iki özelliğinde sağlanması durumunda FDM'nin depolanma boyutları küçülecek ve kullanım alanı genişleyecektir.
- IED ünitesinden ısı çekilmesi sırasında sürekli bir ısı aktarımı için çok aşırı soğuma davranışı göstermemeli ve çekirdekleşme hızı yüksek olmalıdır.
- Depolanan ısıнын çabucak geri kazanılması için kristal büyüme oranı yeterli olmalıdır.
- Uzun süreli kimyasal kararlılığa sahip olmalıdır.
- Yapı malzemeleri ile uyumlu olmalıdır. Yoksa FDM'nin yapısı değişerek istenilen depolama özelliklerini devam ettirilemez ve yapı malzemelerini korozyona uğratarak kullanım ömrünü kısaltır.
- Zehirli olmamalıdır.
- Yangın tehlikesi göstermemelidir.
- Ekonomik olarak bol ve kolay bulunabilir yapıda olmalıdır.
- Kullanım alanının genişlemesi için düşük maliyete sahip olmalıdır.

Katı-sıvı FDM'lerin genel sınıflandırılması Şekil 2.3 verilmiştir. Şekil 2.3'e göre organik, inorganik ve ötektik olmak üzere 3 farklı yapıda katı-sıvı faz değişimine göre kullanılan FDM yapısı bulunmaktadır. Organik FDM'ler, bir döngü şeklinde devam eden ısı depolama ve geri kazanım süreçlerinde kimyasal kararlılıklarını sürdürerek aynı performanslarını devam ettirirler [30-39]. Bu grupta bulunan parafin ve parafin olmayan FDM'ler bünyesine depoladıkları ısıl enerjiyi geri verirken aşırı soğuma göstermezler [30-39]. Böylece depolanan enerji yüksek oranda geri kazanılabilir. Parafinler düşük ısıl iletkenlik göstermelerine rağmen kimyasal kararlılık, uzun kullanım ömrü, kolay ve bol bulunabilir özelliklerinden ötürü IED sistemlerinde geniş kullanım alanına sahiptir. Parafin olmayan organik FDM'ler grubunda yer alan glikoller, alkoller, esterler ve yağ asitleri yüksek faz değişim entalpisine sahip olmalarına karşın parafinler gibi düşük ısıl iletkenlik, geçici zehirlilik, kolay tutuşma gibi zayıf özellikler göstermektedir [30-39]. Fakat bu durum Çizelge 2.2'de listelendiği gibi birtakım yöntemler ile bertaraf edilerek, FDM'lerin uygun tasarımlar ile enerji depolama işlemlerinde kullanılmasına engel teşkil etmemektedir.



Şekil 2.3. Katı-sıvı faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması [31-36]

Organik olmayan (inorganik) grupta bulunan metal ve metal alaşımları, tuz ötektikleri, tuz hidratlar ve tuzlar organik gruba göre yaklaşık 2 kat daha fazla IED yoğunluğuna sahiptirler [30-39]. En büyük dezavantajları ise aşırı soğuma ve depolandıkları metal kaplarda korozyona sebep olmalarıdır (Bkz. Çizelge 2.2). Ötektik FDM'ler ise en az iki farklı FDM grubunun beraber karışması ve yeni bir FDM oluşturması ile meydana gelmektedir [30-40]. Ötektik FDM'ler organik-organik, organik-inorganik ve inorganik-inorganik FDM'lerin birleşimi ile oluşmaktadır (Bkz. Şekil 2.3). Ötektik FDM'ler en yüksek ergime entalpisine sahip olmalarına karşın yüksek üretim maliyetlerinden dolayı kullanım alanı kısıtlıdır [30-40]. Ayrıca iki farklı FDM grubunun ergime ve katılaşma sıcaklıklarından daha düşük ergime ve katılaşma sıcaklıklarına sahiptirler. Bunun yanında ergime-katılaşma döngüsü sırasında bileşenlerine ayrılma olmadığı için, faz ayrılmasından ve aşırı soğumadan söz edilmez [30-40]. Organik, inorganik ve ötektik FDM'lerin birbirlerine göre üstünlük, eksiklik ve mevcut olan eksikliklerinin üstesinden gelmek için yapılabilecek olası uygulamalar Çizelge 2.2'de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Organik FDM grubunda yer alan parafinlerin kullanım alanının fazlalığı onun özelliklerinin daha detaylı açıklanmasını gerekli kılmaktadır.

Çizelge 2.2. FDM'lerin avantaj, dezavantaj ve dezavantajlarının üstesinden gelmek için önerilen çözümler [36]

FDM türü	Avantaj	Dezavantaj	Önerilen çözüm
Organikler	- Kimyasal kararlılık - Korozif etki göstermeme - İhmal edilebilir çok aşırı soğuma ve aşırı soğuma - Düşük buhar basıncı - Isıl kararlılık - Uyumlu ergime - Yüksek bulunurluk - Tekrar kullanılabilme	- Düşük ısı iletkenlik - Yanıcılık - Düşük ve orta sıcaklık uygulamalarına uygunluk - Yüksek hacimsel genleşme - Geçici zehirlilik	- İletken katkı maddeleri ile kompozitler oluşturma - Kapsülleme - Düşük sıcaklık uygulamalarında yaygın kullanım - Hacimsel genişleme için yer sağlama
İnorganikler	- Yüksek ısı iletkenlik - Yanıcı olmama - Düşük-yüksek (geniş aralık) ergime sıcaklığı - Düşük hacimsel genişleme	- Yüksek dereceli çok aşırı soğuma davranışı - Korozif etki - Faz ayrışması - Uyumsuz ergime	- Diğer tuzlar ve katkı maddeleri ile karıştırma (Araştırmalar devam etmektedir.) - Kapsülleme - Farklı türlerin hareketliliğini sınırlamak için katkı maddelerinin kullanılması
Ötektikler	- En yüksek faz değişim entalpisi (gizli füzyon ısısı) ve enerji depolama yoğunluğu - Geri dönüştürülebilme - Kesin ergime sıcaklığı - Uyumlu ergime	- Kimyasal ve ısıl kararsızlık - Termofiziksel verilerde yokluk - Güçlü (rahatsız edici) koku - Yüksek maliyet (pahalılık)	- Daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmasının yapılması - Kapsülleme

Parafinler

Ticari olarak en çok tercih edilen organik IED malzemesi parafinlerdir. Parafin, doymuş n-alkan alifatik¹ hidrokarbonlardır. Parafinler $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$ düz zincirli n-alkanların bir

¹ Alifatik bileşikler, molekül yapılarında, çeşitli atomların birbirlerine kovalent bağlanarak oluşmuş düz veya dallanmış zincir şeklinde iskelet içeren organik bileşikler ve bunların türevleri olarak tanımlanmaktadır. En basit hidrokarbon CH_4 (metan)'dür. Parafin hidrokarbonlar ve doymuş hidrokarbonlar alkanlar sınıfında yer almaktadır

karışımı ve C_nH_{2n+2} genel formülü ile ifade edilmektedir [29-41]. Petrolün damıtılmasıyla yan ürün olarak üretilmektedir. Formülde bulunan n karbon atomu sayısını ifade etmektedir. Omurga zincirindeki karbon atomlarının sayısı arttıkça ergime noktaları ve genellikle ergime gizli ısıları da artmaktadır [29-41]. Parafinler düz zincirlerden (n-parafin) ya da dallanmış zincirlerden (izo-parafin) oluşmaktadırlar [38]. (CH_3) - zincirinin kristalleşmesi büyük miktarda gizli ısı açığa çıkarmaktadır [35]. Karbon atomu sayısı değişiminin saf parafinlerin ergime noktası ve gizli füzyon ısıları değerlerine olan etkisi örnek olarak Çizelge 2.3'de verilmiştir. Karbon atomu sayısının değişimine göre saf parafinlerin fiziksel yapıları da değişmektedir. Doymuş hidrokarbon olan saf alkan parafinlerin karbon atomu sayısı 1-4 arasında olduğunda oda sıcaklığında gaz halde bulunurlar [40, 42]. Karbon atomu sayısı 5-17 arasında iken parafinik alkanlar sıvı halde bulunurlar [40, 42]. Son olarak karbon atomu sayısı 17'den büyük olduğunda mumsu katı halde bulunurlar [40, 42].

Çizelge 2.3. Farklı karbon atomu sayısına sahip saf parafinlerin ergime noktaları ve gizli füzyon ısıları değerleri [35]

Parafindeki toplam karbon sayısı	Ergime noktası (°C)	Gizli füzyon ısısı (kJ/kg)
14	5,5	228
15	10	205
16	16,7	237,1
17	21,7	213
18	28	244
19	32	222
20	36,7	246
21	40,2	200
22	44	249
23	47,5	232
24	50,6	255
25	49,4	238
26	56,3	256
27	58,8	236
28	61,6	253
29	63,4	240
30	65,4	251
31	68	242
32	69,5	170
33	73,9	268
34	75,9	269

Saf parafinlerin, GID uygulamalarında geniş bir ergime sıcaklık aralığına sahip olmalarına karşın, elde edilme aşamasında yüksek arıtma gerektirmesi ve buna bağlı olarak maliyetlerinin çok yüksek olması kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Saf parafinler yerine ham petrolün damıtılmasındaki yan ürün olan ortalama enerji depolama yoğunluklu daha ucuz yapıdaki teknik sınıf (ticari) parafin mumu (parafin wax) kullanılmaktadır [31]. Teknik sınıf parafin mumları, temel olarak farklı karbon atomu sayılarına sahip parafin karışımlarıdır [31-41]. Ticari parafin mumları ucuz, kolay bulunabilir, güvenli, kimyasal olarak kararlı, uzun kullanım ömrüne sahip, ekolojik olarak zararsız, kokusuz, tatsız ve zehirli özellik göstermeyen organik maddelerdir [31-42]. Bunun yanında kimyasal olarak kararlı ve faz ayrışması göstermezler [31-42]. İnorganik FDM grubunda yer alan tuz/tuz hidratların aksine enerjinin geri kazanılması sırasında aşırı soğuma davranışı göstermedikleri için bünyesine çekirdekleştirici eklenmesine gerek yoktur [31-42]. Geniş sıcaklık aralıklarında enerji depolama uygulamaları için uygun bir GID malzemesi olarak araştırmacılar tarafından sürekli tercih edilmektedir.

GID sistemlerinde kullanılması sırasında birçok öne çıkan yönü olmasına karşın, geliştirilmesi ve önlem alınması gereken bir takım olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Metaller üzerinde korozyona sebep olmaz fakat enerji depolama ünitesi plastik ise kullanılan depo duvarlarının yumuşamasına sebep olmaktadır [31-42]. Bunun yanında düşük ısı iletkenliğe sahip olması en istenmeyen termofiziksel özelliğidir [29-42]. Ayrıca düşük yoğunluk ve yaklaşık %10 hacimsel değişim de olumsuz özellikleridir [29-42]. Enerjinin depolanması ve geri kazanılması düşük ısı iletimi nedeniyle istenilen hızda meydana gelmemekte ve istenilen enerji depolama miktarlarına ulaşamamaktadır. Bu problemi aşmak için enerji depolama ünitesi içerisine kanatçık ekleme, metal köpük ekleme, yüksek ısı iletkenliğe sahip nano parçacık ekleme uygulamaları yapılmaktadır [29-42]. Bunun yanında FDM içerisine karbon nano tüp yerleştirme ve FDM'yi makro veya mikro boyutta kapsülleyerek depolama ünitesinde kullanma da gerçekleştirilmektedir [29-42].

2.3. Termokimyasal Isı Depolama

Termokimyasal enerji, endotermik (ısı alan) ve ekzotermik (ısı veren) kimyasal reaksiyon sırasında depolanan (emilen şarj edilen) ve geri verilen (salınan, deşarj edilen) reaksiyon ısısıdır [30, 33, 35, 38, 40]. Termokimyasal enerji depolama (TKED), kimyasal bileşiklerin bağ enerjisinin, tersinir kimyasal reaksiyonlar sırasında ısı enerji olarak depolanmasına

dayanmaktadır [30, 33, 35, 38, 40]. Depolama sisteminin ömrü teorik olarak sınırsız kabul edilmektedir [35]. Bu sistemde, ısı depolama kapasitesi genellikle yüksektir, çünkü tersinir kimyasal reaksiyonda moleküler bağların kırılması ve yeniden oluşturulması sırasında yüksek kimyasal enerji oluşmaktadır [33, 35]. TKED sistemlerinde depolanan ısı miktarı, depolama malzemesinin miktarına, endotermik reaksiyon ısısına ve dönüşüm derecesine bağlıdır [35]. TKED, kimyasal reaksiyonlar, kimyasal ısı borusu ve kimyasal ısı pompası kullanılarak gerçekleştirilebilir (Bkz. Şekil 2.1) Bu enerji depolama sistemi, DID ve GID sistemlerinden daha karmaşık bir yapıda olmalarında dolayı çok fazla tercih edilmemektedir [33, 35]. Bunun yanında eğer TKED sistemlerinde enerji depolama işlemi yapılacak ise kullanılacak kimyasal bileşikler güvenli ve depolama malzemesiyle uyumlu yani aşındırıcı olmamalıdır [33, 35]. Bu tür depolama çok çekici avantajlar sunmasına karşın tersinir termokimyasal reaksiyonların gelişimi çok erken bir aşamadadır.

3. GİZLİ ISI ISIL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNDE ISI TRANSFERİ İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Gizli ısı ısııl enerji depolama (GIIED) sistemlerinde, enerji depolama malzemesi olarak FDM'ler yoğun bir kullanım alanına sahiptir. Bunun yanında GIIED sistemleri yüksek ısııl enerji yoğunluğu ve neredeyse izotermal süreçte depolama işlemini gerçekleştirdiği için diğer IED sistemlerine göre daha iyi performans sunmaktadır. Kullanım yoğunluğu sık olmasına karşın üzerinde durulması ve geliştirilmesi gereken olumsuz yönü düşük ısı iletimine sahip olmalarıdır. Bu olumsuz durumu engellemek için bir takım ısı transferi iyileştirme yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler aktif ve pasif olarak iki ana grupta yer almaktadır [43]. Pasif ısı transferi iyileştirme yöntemleri, aktif sistemlere göre maliyet ve donanım artışı gerektirmediği için daha fazla tercih edilmektedir. En genel haliyle kullanılan yöntemler aşağıda maddeler halinde listelenmiştir [34, 43, 44]:

Aktif sistemler

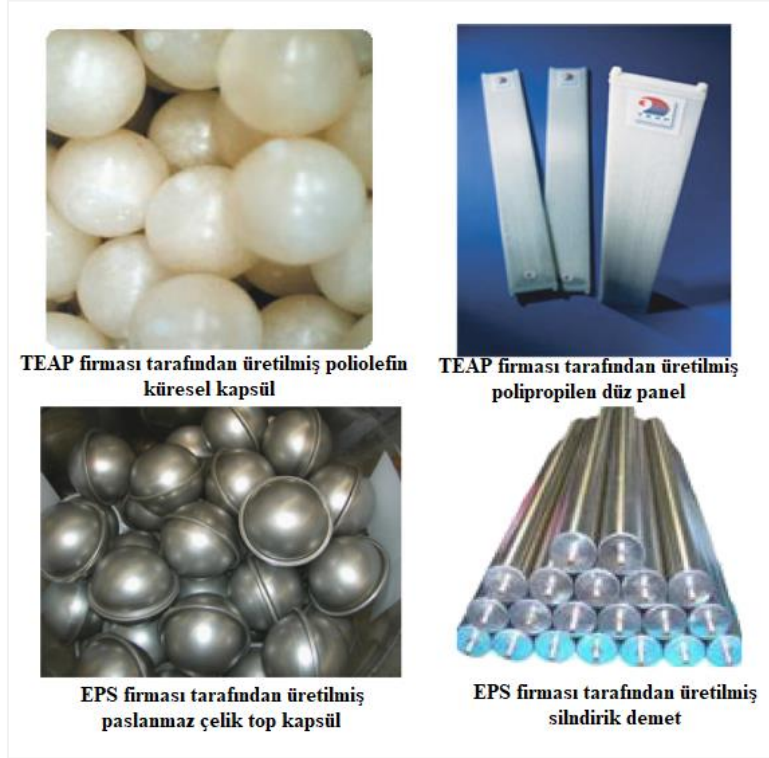
- Karıştırıcı kullanma,
- Sıyırıcı kullanma,
- Titreşim verici kullanma,

Pasif sistemler

- FDM'leri kapsülleme,
- GID ünitesi içerisinde kanatçık ve genişletilmiş yüzey kullanma,
- GID ünitesi içerisinde bünyesine FDM gömülmüş gözenekli matris kullanma,
- FDM ile beraber yüksek ısı iletkenliğine sahip parçacık ekleme,
- GID ünitesi içerisinde birden fazla FDM kullanma,
- FDM ile grafit kompozit malzemeler oluşturma,
- Isı borusu kullanma,

Isıl iyileştirmede kullanılan farklı malzemeler Resim 3.1'de örnek olarak verilmiştir [37].

kalsiyum karbonat ve titanyum dioksit gibi metaller kap malzemeleri olarak kullanılmaktadır [34].



Resim. 3.2. Düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılan FDM'lerin kapsüllemesi için ticari olarak farklı firmalar tarafından üretilen kap malzemeleri [45]

Kapsülleme işlemi, mikro ve makro kapsülleme olmak üzere iki farklı yöntem ile yapılmaktadır [41]. Mikro kapsülleme, 1-1000 μm çapındaki çok sayıda FDM parçacığının katı bir kabuk içine alınması ve daha sonra sürekli bir matris içinde düzenlenmesi olarak ifade edilmektedir [41, 46]. Mikro kapsülleme tekstil [47, 48], kozmetik [49], ilaç [50, 51] ve binalarda [52, 53] geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu kapsülleme sistemi, matris malzemelerinin düşük ısı iletkenliği nedeniyle düşük ısı transferi oranı ve aşırı soğuma ihtimalinin yüksekliği gibi problemler yaşamaktadır [41]. Bu düşük ısı transfer hızının bir başka nedeni de taşınım (konveksiyon) akımlarını engelleyen ve tüm ısı transferini sadece iletim yoluyla olmaya zorlayan matrisin rijitliğidir [41]. Bunun yanında yüksek maliyetli bir araştırma çalışmasına ihtiyaç duymaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde, en uygun mikro kapsül kabuk malzemeleri üre-formaldehit reçinesi, melamin-formaldehit reçinesi ve poliüretan olarak ifade edilmiştir [41, 54]. Makro kapsülleme, çeşitli şekil ve boyutlarda bulunabilmesi nedeniyle çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu esas olarak sıvı FDM'yi herhangi bir sızıntı oluşturmada tutmak ve çevre ile temastan dolayı bileşimindeki

değişiklikleri önlemek için kullanılmaktadır [41]. Ayrıca, makro kapsülleme kullanılan kap yeterince rijit ise sisteme mekanik kararlılık da katmaktadır [41].

3.2. Kanatçık (fin) ve Genişletilmiş Yüzeyler Kullanma Yöntemi

GID sisteminde ek ısı transferi yüzeyi sağlamak için genişletilmiş yüzeyler veya kanatçıklar kullanılmaktadır. GID uygulamalarında, gövde borulu veya eş merkezli çift borulu (iç içe borulu) ısı değiştiricisi kullanıldığında, genellikle FDM boruların dış yüzeylerinde ve iç boru yüzeyi ısı transferi yüzeyi olarak görev yapmaktadır. Ergime sırasında (enerji depolama) sıcak ITA ile karşılaşan bölgeler daha hızlı faz değiştirerek ergirler. Katılma sırasında (depolanan enerjinin geri kazanımı) ise öncelikle ITA'nın geçtiği boru cidarına yakın bölgelerden ısı transferi hızlı olmaktadır. Hızlı soğuyan bölgedeki FDM katılarak, sıvı FDM'nin bünyesinde depolanan ısı enerjinin ITA'ya aktarılmasını ısı direnç oluşturarak başka bir deyişle yalıtım gibi davranarak zorlaştırmaktadır. FDM'nin depolandığı kısımdaki boruların dış yüzeylerine kanatçık eklenmesi ile sıvı FDM, ısı transferi yüzeyi ile daha iyi bir ısı teması sahip olacak ve böylece ısı direnç azaltılmış olacaktır [44, 55]. Yüksek sıcaklık GID sistemlerinde kanatçıklar daha çok tercih edilmektedir [44, 55]. Yüksek sıcaklık GID sistemlerinde kullanılan FDM'lerin zarar görmemesi için yüksek maliyetli muhafaza malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır [34]. Ancak kapsüllemeye oranla kanatçıklar, daha az malzeme kullanımına imkân sağlamaktadır [34]. Kanatlar genel olarak çelik, bakır, grafit folyo, alüminyum vb. malzemelerden imal edilmektedir. Grafit folyo, yüksek iletkenlik, düşük yoğunluk ve nitrat tuzlarına ve nitrite karşı yüksek sıcaklıklarda iyi korozyon direnci göstermektedir [34]. Grafit folyo, çelik kanatlara kıyasla aynı performans için daha az hacim kaplamaktadır. Dolayısıyla grafit kanatların maliyeti çelik kanatlara göre çok daha düşüktür. 400 °C'nin altındaki sıcaklıklarda alüminyum da kanatçık malzemesi için uygun yapıdadır [34]. Maliyetleri biraz yüksek olmasına karşın tercih edilen bölgelerde bakır kanatçıklar da kullanılmaktadır.

3.3. FDM İçerisine Gömülü Gözenekli Matrisler Ekleme Yöntemi

Bu yöntemde, alüminyum, bakır gibi malzemelerden üretilmiş metalik matrisler ya da grafit, metal köpükler gibi doğal olarak gözenekli yapıdaki malzemeler FDM içerisine gömülerek GIİED sisteminde ısı transfer oranını arttırmak için kullanılmaktadır [34]. Kullanılan gözenekli yapının ısı transferi üzerindeki performansı, matrisin hem gözenek yapısına

(gözenek boyutuna ve gözenek yoğunluğuna) hem de ısı iletkenliğine bağı olarak değışmektedir [34, 56]. Mesalhy ve diğlereri [56] tarafından yapılan bir sayısal çalışma ile bu bilgi doğrulanmıştır. Çalışmada kullanılan saf FDM’lerde, ergime işlemine doğal konveksiyon hâkim olduğundan, FDM’nin bulunduğu kabın altı kısmındaki füzyon hızı üst kısım ile karşılaştırıldığında daha düşük çıkmıştır [56]. Gözenekli bir matrisin kullanılması başka bir ifade ile ısı iletkenliğin yükseltilmesi kabın alt kısmındaki FDM’nin ergime hızını arttırmıştır [56]. Ancak gömülü matrisin varlığı sıvının hareketini engellemekte ve doğal taşınım hareketlerini sönümlemektedir [34, 56]. Matrisin gözenek boyutu ne kadar yüksek olursa doğal taşınım hareketlerini sönümleme etkisi de o kadar az olacaktır [34, 56]. Böylece daha iyi performans iyileştirmesi elde edilmiş olacaktır [34, 56].

Yüksek gözeneklilik, yüksek ısı iletkenlik, yüksek erime noktası, düşük yoğunluk ve kimyasal direnç özelliklerine sahip olan genişletilmiş grafit (GG) son GIIED sistemlerinde son zamanlarda aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır [34, 55, 56]. Gözenek yapısının büyük olması ergimiş FDM’nin bu gözenekler tarafından emilmesi (absorplanması) demektir. Ergimiş FDM ve GG yapısı birlikte kompozit FDM’yi oluşturmaktadır [34, 55, 56]. FDM kompozitinin ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi, FDM ve GG karışımının oranına bağlıdır [55] . GG’nin, FDM’nin ısı iletkenliğini geliştirmek için kullanımı, organik bileşikler gibi düşük ergime noktalı FDM’ler ile sınırlı değildir; ayrıca tuzlu bileşikler ve ötektik karışımlar gibi yüksek ergime noktalarına sahip FDM’ler için de kullanılmaktadır [55, 57]. Karbon fiberler (KF) de, GID sistemlerinde ısı iletkenliğini arttırmak için kullanılabilecek potansiyel bir malzeme olarak kabul edilmektedir [34, 37, 45].

3.4. FDM İçerisine Yüksek Isı iletkenliğe Sahip Parçacıklar Ekleme Yöntemi

Isı transferi hızını yükseltmek için kullanılan bir başka yöntem ise FDM içerisine yüksek ısı iletkenliğe sahip parçacıklar eklemektir. Sıvı fazdaki FDM’nin viskozitesi yüksek olduğunda ve FDM ve grafit gibi ısı iletken katkı malzemeleri için yoğunluklar benzer olduğunda, katkı parçacıkları ergimiş haldeki FDM bünyesine düzenli bir şekilde dağılarak iyi bir karışım oluşturabilmektedirler [34, 45]. Böylece ısı transferi iyileştirme çalışması başarılı ile sonuçlanmaktadır. Grafit ile FDM bileşiklerinin kullanılması, GID sistemlerinde performansın iyileştirilmesi için verimli ve başarılı olduğu kanıtlanmış bir yöntemdir [55]. FDM-grafit kompozitler, yalnızca ısı işlem, kurutma, harmanlama, öğütme ve sıkıştırma vb. zaman ve enerji tüketen işlemler gibi çeşitli kimyasal ve mekanik işlemlerle

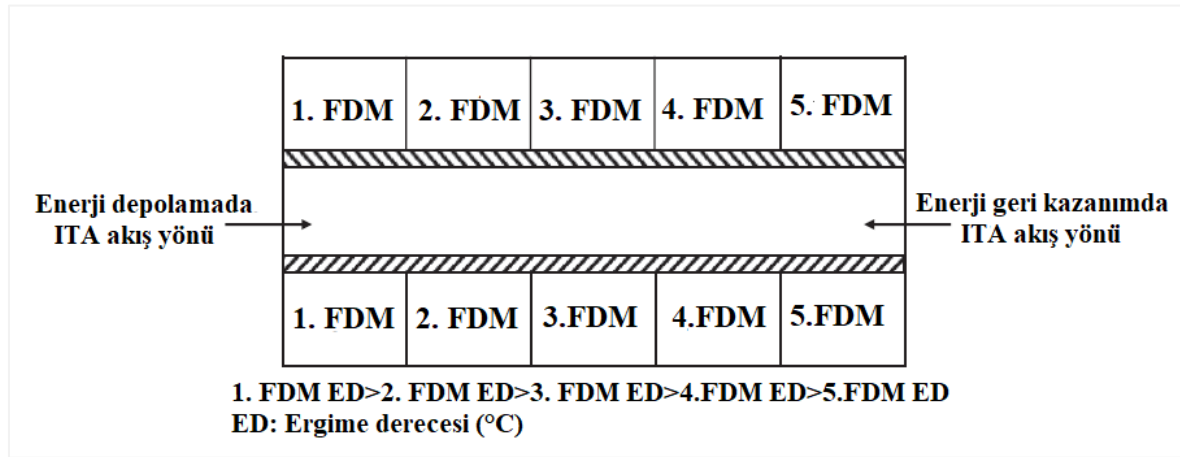
hazırlanmaktadır [55]. FDM-grafit kompozitler yerine yüksek ısı iletkenliğe sahip parçacıkların (partiküllerin) FDM içerisine dağıtılması, FDM'nin ısı iletkenliğini arttırmak için çok daha basit bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [55]. Yüksek viskozite ve yoğunluğun benzerliği nedeniyle, FDM içerisine dağılmış parçacıklar sıvı fazda asılı kalmaktadır [34, 35]. Böylece sıvı FDM ile beraber yeni bir yapı oluşturarak katılaşmaktadır. Yüksek viskozite ve benzer yoğunluğa sahip olmalarından dolayı, enerji depolama ve geri kazanım döngüsünde katkı malzemelerinin çökmesi sorunu ile karşılaşılmadan güvenli bir işletim süreci sağlanmaktadır. Düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılan organik malzemelerin yanında yüksek ergime noktalı tuzlar ve ötektik karışımlar için de katkı maddesi kullanılarak ısı iletkenlik geliştirilmektedir. Fakat ergime için gerekli olan yüksek ısıdan dolayı, ergitme işlemi maliyetli bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır [34]. Bu nedenle, grafit parçacıkları ve tuzlar toz halinde karıştırılmakta ve daha sonra oda sıcaklığında sıkıştırılmaktadır [34, 35]. Bu yöntemle soğuk sıkıştırma denilmektedir [34, 35]. Soğuk sıkıştırma işlemi ile yapılan kompozit FDM'ler literatür çalışmalarında yer almalarına karşın karışımlarda en küçük saf olmayan maddelerin varlığı veya en küçük mekanik gerilimlerin varlığı tuz sızıntısına yol açtığından dolayı, soğuk sıkıştırılmış bileşikler her zaman güvenilir kararlılığa sahip olmamaktadırlar [34].

Nanomalzemeler de FDM'nin ısı transferi hızını yükseltmek için katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Nanomalzemeler FDM'ye eklendikten sonra oluşan yeni maddeye nano iyileştirilmiş faz değiştiren malzeme (NiFDM) denilmektedir [44]. Katkı maddesi olarak küçük hacimsel oranlarda Al, Zn, Cu, Fe, CuO, Al₂O₃, TiO₂, ZnO, FeO, CdSe, ZnS, Cu nano teller ve Ag nano teller kullanılmaktadır [32, 34, 44]. Bakır ve gümüş nano teller genellikle organik FDM'ler ile kullanılırken oksitler inorganik tuzlarda tercih edilmektedir [34].

3.5. Çoklu FDM'nin Tek Sistemde Kullanılması Yöntemi

Enerji depolama ve enerji geri kazanımı sürecindeki ısı transfer hızı, ITA'nın sıcaklığı ve FDM'nin ergime noktası arasındaki farka bağlıdır. GID ünitesi içerisinde tek bir FDM kullanıldığında, ITA'nın akış yönündeki sıcaklık farkı giderek azalmaktadır. Bu, akış yönü boyunca düşük bir ısı transfer hızına ve ünitenin düşük enerji depolama performansı sergilemesine neden olmaktadır [34]. Çünkü sıcak olarak GID ünitesi içerisine giren ITA, ilk temas ettiği bölgeden FDM'nin ergimesini sağlayacaktır. FDM'nin depolandığı bölgenin sonuna doğru, ITA'nın sıcaklığı giderek düşecek ve istenilen homojen ergime şartları

sürdürülemeyecektir. Çoklu FDM yönteminde ise birden fazla farklı ergime derecesine sahip FDM aynı GID ünitesi içerisinde kullanılarak ITA'nın sıcaklığının akış yönü boyunca kontrol edilebilir seviyede bir düşüş göstererek yaklaşık sabit kalmasını sağlamaktadır. Farklı ergime derecelerine sahip çoklu FDM'leri, şarjın akış yönünde ergime noktalarına göre azalan sırada GID ünitesi içerisine makro kapsüllenerek yerleştirilirse, ITA sıcaklığı akış yönünde düşse bile ergime işlemi sırasında hemen hemen sabit bir sıcaklık farkı oluşacaktır [34]. Böylece ITA'dan FDM'ye neredeyse sabit bir ısı akışı meydana gelecektir. Deşarj işlemi sırasında, ITA şarjdaki akış yönünün tersine olacak şekilde GID ünitesi içerisinden geçerse, çoklu FDM grubu ergime noktalarının arttığı sıralamada kalacak ve FDM'den ITA'ya şarj sürecinde olduğu gibi neredeyse sabit bir ısı akışı meydana gelecektir [34]. Örnek bir gövde borulu GID ünitesinde çoklu FDM kullanımı Şekil 3.1'de gösterilmiştir [55]. GID sisteminin performansını yükseltmek için çoklu FDM kullanılması gelecek vadeden bir yaklaşımdır. Fakat burada en önemli nokta enerji depolama ve geri kazanım performansını en yükseğe ulaştıran FDM kombinasyonunu belirlemektir [55]. Çoklu FDM kombinasyonunun belirlenmesinde de en önemli parametreler, FDM'nin ergime sıcaklığı (derecesi) ve FDM oranıdır [55].

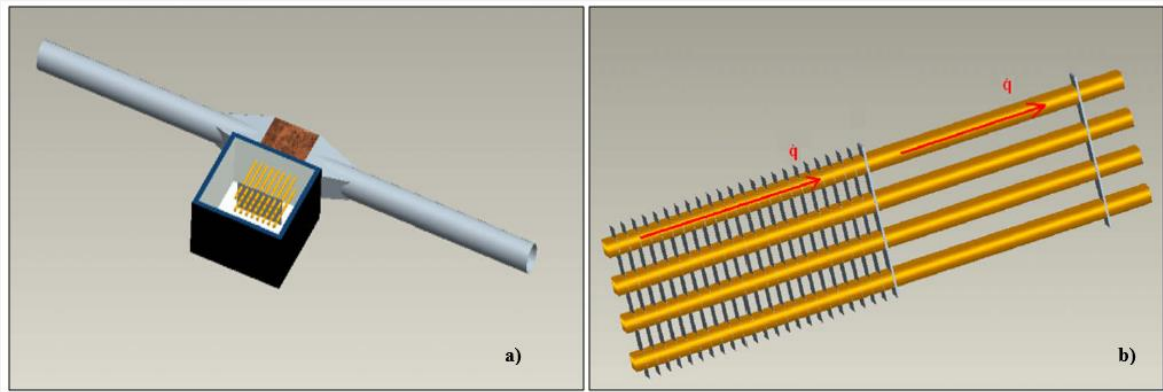


Şekil 3.1. Gövde borulu GID ünitesinde çoklu FDM kullanımı

3.6. Isı Borularının Kullanılması Yöntemi

Isı boruları, yüksek ısıl iletkenliğe sahip oldukları için gövde borulu GID sistemlerinde FDM ile birlikte kullanılarak GIIED sisteminin performansını artırmak amacıyla kullanılmaktadır [34]. Isı boruları, ITA ile FDM arasında termal kanallar görevi görmektedir. Isı borusu, enerji depolama sürecinde sıcak ITA'dan alınan enerjiyi FDM'ye aktararak ergimenin

meydana gelmesini sağlamaktadır. Enerji geri kazanım sürecinde ise ergimiş haldeki FDM'den bünyesinde depoladığı ısı enerjisini önce kendi yapısındaki çalışma akışkanına yükler ve sonrasında yoğunlaşma bölgesindeki ITA'ya aktararak ısı transferini gerçekleştirmektedir. Bir ısı borusunda, evaporatör bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi olmak üzere iki bölge bulunmaktadır [34, 58, 59]. Çalışma sıvısı örneğin cıva, ısıyı taşımak için bölümler arasında dolaşmakta ve gittiği bölgelerde buharlaşarak ısı almakta ve yoğunlaşarak ısı vermektedir [34]. Isı borularının çalışabilmesi için yoğunlaşma ve buharlaşma bölgeleri arasında sıcaklık farkının olması gerekmektedir. Şekil 3.2'de örnek bir ısı borulu kanatlı yapının gövde borulu GID sisteminde kullanımı gösterilmiştir. Isı borusu, çalışma alanlarının dar olduğu ve enerji kaynaklarının yetersiz olduğu durumlarda daha çok tercih edilmektedir [58]. Enerji depolama uygulamalarında örneğin güneş enerjisinin ısı olarak depolanarak, kolektör veriminin iyileştirilmesi için ısı boruları tercih edilmektedir [58].



Şekil 3.2. a) Gövde borulu bir ısı değiştiricinde ısı borusu kullanımı b) Kullanılan ısı borusunun kanatlı yapısı [59]

3.7. Farklı Isı Transferi İyileştirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Genel olarak, GIIED sistemlerinde kullanılan FDM'nin ısı iletkenliğini artırma yöntemleri iki kategoriye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki yüksek iletkenliğe sahip sabit dolgu ve katkı maddeleri; diğeri ise kanatçık kullanımı ve FDM kapsülleme gibi dışsal iyileştirme yöntemleridir. Sabit dolgu/katkı maddelerine gelindiğinde, allotrop çeşitliliği, düşük yoğunluk, ısı iletkenliği özelliklerine sahip karbon malzeme, seçim için oldukça az adaya sahiptir. Metal dolgu/katkı maddeleri daha yüksek ısı iletkenlik artışına sahip olmalarına karşın kimyasal aktivite ve yüksek yoğunluk nedeniyle birçok durumda FDM'ye dâhil edilmeleri sınırlıdır. Kanatlar veya kanatçıklar doğrudan ısı transferini arttırmak için FDM

içeren GID ünitesi içerisinde kullanılmakta ve eşdeğer ısı iletkenlikleri çok etkileyici değerlere ulaşabilmektedir. Farklı iyileştirme yöntemlerinin hangisinin en uygun olduğunun seçimi, kullanılan FDM'nin türüne, FDM ve iyileştirme yönteminin maliyetine, kullanılacak iyileştirme yöntemindeki malzemenin ön hazırlık gerektirip gerektirmediğine, uygulanacak depolama şartlarına, çalışma sıcaklık aralığına, kullanım ömrüne vb. faktörlere bağlı olarak yapılmaktadır [60].

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tez çalışması kapsamında dikdörtgen bir GID ünitesinde yay tipi ısı transferi artırıcı (YTITA) kullanılarak GID malzemesi olarak seçilen FDM'nin ergime ve enerji depolama performansı incelenmiştir. Bunun yanında zamandan ve deney maliyetlerinden tasarruf etmek için Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile optimizasyon işlemi yapılmıştır. Yapılan optimizasyon işleminde en az deney sayısı ile en verimli enerji depolama işleminin gerçekleştirildiği en uygun deney şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Tezin bu başlığının altında verilecek olan literatür araştırmalarında daha çok kare ve dikdörtgen gibi bir kapta veya araştırmacılar tarafından ifade edildiği gibi boşlukta bulunan FDM'nin ergime ve enerji depolamasının incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Elbette dairesel, silindirik veya farklı geometrilere sahip enerji depolama sistemleri literatür çalışmalarında mevcuttur. Fakat yapılan tez çalışmasıyla uyumlu olması bakımından kare veya dikdörtgen ünitelerdeki GIİED sistemlerinin performansları ve performans iyileştirme yöntemleri bu bölümde irdelenmiştir. Yapılan literatür taramasında, kanatçık kullanılarak enerji depolaması yapılan çalışmalar daha ön planda verilmiştir.

Acır ve Canlı, kare bir GIİED ünitesi tasarımı yapmış ve FDM olarak parafin wax (PW) kullanmışlardır. FDM'nin düşük ısı iletkenlik problemini yenip, GIİED ünitesi içerisindeki FDM'nin ergimesini daha uyumlu hale getirmek için üç farklı kanat sayısı (3, 5 ve 7) ve üç farklı kanat kalınlığı (1 mm, 1,5 mm ve 2 mm) dikkate almışlardır. Laboratuvar şartlarında kızıl ötesi lamba ile oluşturdukları üç farklı ısı akısı (800 W/m^2 , 900 W/m^2 ve 1000 W/m^2) altında FDM'nin ergime davranışını incelemişlerdir. Araştırmacılar, kanat sayısı artışının FDM'nin ergime süresine olumlu etki ederek kısalttığı fakat kanat kalınlığı artışının ise olumsuz katkı sağlayarak ergime süresinin uzamasına neden olduğu sonucuna ulaşmışlardır [5, 6]. Çalışmanın devamında ise tasarlanan GIİED ünitesinde depolanan enerji miktarları hesaplanmış ve kanat sayısı ve kalınlık değişiminin enerji depolama verimi üzerine olan etkisi detaylı incelenmiştir [8]. Ergime süresinde meydana gelen düşüş, GIİED sisteminin enerji depolama verimini yükseltmiştir. Ergime süresinin kısalması enerji depolama ünitesinden çevreye olan ısı kaybını azalttığı için enerji depolama verimi yükselmiştir [8].

Xu ve diğerleri, kare bir boşluk içerisinde bulunan FDM (parafin)'nin ve metal köpük-FDM ikilisinin ergime davranışını analitik olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada metal köpük

malzemelerin gözenek boyutu değişimi, gözenek yoğunluğu değişimi, katı yapının ısı iletkenlik değişimi ve çamurumsu (lapa) bölge değişiminin ısı enerji depolama süreci üzerindeki etkisi incelenmiştir. Gözenekli ortam içeren veya içermeyen bir FDM'nin sıcaklık, akış alanı ve katı-sıvı ara yüzü teorik olarak değerlendirilmiş ve temel parametrelerin ergime süreci üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. En uygun metal köpük-FDM kompozit yapısı belirlendikten sonra bir IED cihazı tasarlanmıştır. Termodinamik analiz yapılarak, optimal FDM sıcaklığı ve optimal ısı transferi akışkan sıcaklığı bağıntıları analitik olarak türetilmiştir [11].

Sebti ve diğerleri, FDM (parafin) içerisine farklı hacimlerde Cu parçacıklar ekleyerek NiFDM'ler oluşturmuş ve kare bir boşlukta bulunan NiFDM'lerin ergime davranışını 2 boyutlu sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışmada Cu parçacık hacim yüzdesi, boşluk boyutu ve sıcak yüzeylerin sıcaklıklarının NiFDM'nin ergime süresi ve ısı transferi mekanizmasına olan etkisi detaylı incelenmiştir. Çalışma sonucunda, geleneksel FDM ile karşılaştırıldığında yapısında Cu parçacık bulunan yeni NiFDM'lerin ısı iletkenlikleri artmış ve ısı transferinin iyileştirilmesine ve daha yüksek ergime hızlarına ulaşılmasına neden olmuştur. Bunun yanında Cu parçacıklarının FDM içerisindeki hacim yüzdeleri arttıkça, NiFDM'nin ısı transfer hızı artmış ve ergime süresi azalmıştır. Ergime sıcaklığı ile ısı kaynağı olarak kullanılan duvarın sıcaklığı arasındaki fark yükseldikçe NiFDM'nin ergime sürecini de hızlandırmıştır [12].

Motahar ve diğerleri, FDM olarak seçtikleri n-oktadekanın yapısına dağılmış halde TiO_2 parçacıkları ekleyerek, dikey yönden sabit oranlarda ısıtılan dikdörtgen bir muhafazadaki NiFDM'nin ergime davranışını incelemişlerdir. Isıtma işlemi dikey yöndeki sağ duvardan farklı ısıtıcı güçlerinde yapılmıştır. Deneyler, $0,57 \times 10^8$ - $43,2 \times 10^8$ Rayleigh ve 5,7-23,8 Stefan sayı aralıklarına karşılık gelen şartlarda ve hacimce %2-4 TiO_2 içeren şartlarda yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, ergimenin ilk safhasında, iletimle ısı transferinin daha yoğun olduğunu daha sonrasında ise doğal taşınım ile ısı transferinin sistemde daha hâkim bir rol üstlendiğini ortaya koymuştur. Fakat FDM/ TiO_2 yüzdesinin artırılması, NiFDM'nin ısı iletkenliğini yükseltmesine rağmen saf FDM'ye göre NiFDM'nin viskozitesindeki artıştan dolayı doğal taşınım ile ısı transferi hareketlerini bozmuştur. Bunun sonucunda ergime hızı da düşmüş ve ergime süresi uzamıştır. $10\,000\text{ W/m}^2$ 'lik ısı akısı altında saf FDM'ye göre NiFDM'nin ergime süresi %1, %2 ve %4 hacimsel yüzdelerdeki katkı maddesi için sırasıyla %40, %36 ve %10 oranında düşmüştür [13].

Li ve Yu, iç kanatçıklara sahip bir kübik boşlukta bulunan FDM'nin (galyum) doğal konveksiyon ergimesini Lattice Boltzmann yöntemine göre sayısal olarak detaylı şekilde incelemişlerdir. Kübik yapıdaki kanatların ergime süreci üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için, hem çift kanatçık hem de ağaç biçimli tek kanat tasarımlarını kullanmışlardır. Sayısal çalışmada farklı kanat geometrileri kullanılmış fakat toplam kanat hacmi sabit tutulmuştur. Elde edilen verilere göre, kanatçıkların varlığı sadece ısı transferi performansını arttırmakla kalmayıp, kanatsız duruma kıyasla depolanan toplam enerji miktarını da benzer şekilde korumuştur. Çünkü IED ünitesi içerisine kanat eklenmesi ısı iletkenliği iyileştirmekte fakat toplam FDM miktarını azalttığı için depolanan enerji miktarında düşüşe sebep olmaktadır. Kullanılan kanat tasarımları vasıtasıyla gizli ısıнын yanında yüksek miktarda da duyulur ısı depolanması mevcut çalışmada sağlanmıştır. Sayısal çalışmadaki kanat yapılarının değiştirilmesiyle de kanat sayısını artırmak yerine kanat geometrisinin enerji depolama kapasitesi üzerindeki etkisi açıkça gösterilmiştir [22].

Kamkari ve Shokouhmand, tarafından yatay kısmi kanatçıkları olan ve olmayan şeffaf bir dikdörtgen muhafaza içindeki FDM'nin (laurik asit) ergime davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Kanatçıklar şeffaf muhafaza içerisinde sağ duvarın üzerine monte edilmiştir. Kanatçıkların bulunduğu duvar izotermal bir şekilde ısıtılmış ve diğer duvarlar tamamen yalıtılmıştır. İzotermal duvar 55°C, 60°C ve 70°C derecelik üç farklı sıcaklık değerine ulaşıncaya kadar ısıtılmıştır. Sıcaklık geçmişleri, kanatçık sayısı arttıkça termal olarak tabakalı bölgenin küçüldüğünü ortaya koymuştur. Deneysel çıktılar kullanılarak ergime süresince ergime kesirleri (oranları), ısı transferi oranları ve Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Nusselt sayısı ve ergime kesirini tahmin edecek iki farklı korelasyon eşitsizlikleri tanımlanmıştır. Bunun yanında ergime iyileştirme oranı ve toplam kanatçık etkinliği tanımlanarak hesaplama yapılmıştır. Araştırmacılar kanatçık sayısının artmasıyla, yüzey ortalama Nusselt sayısının düşmesine rağmen ergime süresinin düştüğünü ve toplam ısı transferi oranının yükseldiğini ortaya koymuşlardır. Kanatsız tasarıma göre bir ve üç kanatlı yapıdaki FDM'nin ergime süresi sırasıyla %18 ve %37 oranında kısaltılmıştır. Ergime iyileştirme oranı ve toplam kanatçık etkinliği kanat sayısının artması ile artmakta ve izotermal duvar sıcaklığının yükselmesi ile düşme eğilimi göstermiştir. Buradan kısmi kanatçık yapılarının düşük duvar sıcaklıkları için daha uygun kullanıma sahip olacağı sonucuna ulaşılmıştır [23].

Xu ve diğerleri, GIIED sisteminde kullanılan kanatçıkların parametre değişimlerinin katı-sıvı faz değişimi ısı transferi performansı üzerine olan etkisini doğrusal olmayan ve zaman

alıcı optimizasyon yöntemleriyle incelemek için genetik algoritma (GA) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin (HAD) yeni bir kombinasyonunu kullanarak incelemişlerdir. Araştırmacılar ele aldıkları optimizasyon probleminde, iki boyutlu kare bir boşluğun sol duvarına gelecek şekilde farklı boyutlardaki yatay kanatçıkları montajlamışlardır. FDM olarak parafin kullanılmıştır. Kanatların toplam kesit alanı kısıt olarak belirlenmiş ve kanatçıkların sayısı, konum ve uzunluk/kalınlık değerleri değiştirilmiştir. Kare boşluktaki doğal taşınım hareketlerinin FDM'nin ergimesine etkisi HAD analizlerinde dikkate alınmıştır. Araştırmacılar, kanat kalınlığı serbest olduğunda, kanat uzunluğunun mümkün olduğu kadar uzun olması gerektiği çıkarımını yapmışlardır, çünkü toplam ergime süresi her bir tam uzunluktaki kanatçık tarafından %50'den fazla azaltılabilir. GID sisteminde doğal taşınım şartları yok iken uniform (düzgün, eş oranlı, intizamlı) şekilde kanatçık diziliminin kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. Fakat doğal konveksiyonun varlığı bu düzenlemeyi biraz etkilemektedir. Araştırmacılar tarafından, ergime bölgesi kare boşluğun dibinde olduğu için hafifçe aşağı doğru hareket eden kanatçık toplam ergime süresini daha da kısaltabilir sonucuna ulaşılmıştır. Kanat kalınlığı sınırlı olduğunda, en optimal kanat sayısı toplam kanat uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Toplam kanat uzunluğu 1,3 mm'den küçük ise tek kanat, 1,3-2,6 mm arasında ise iki kanat, 2,6-3,6 mm arasında ise üç kanat ve 3,6 mm'den büyük ise dört kanat en optimal kanat sayısı olarak yapılan çalışma şartları için belirlenmiştir [24].

Fekadu ve Assaye, üç tarafı adyabatik ve bir tarafı izotermal olarak sabit sıcaklık değerine sahip dikdörtgen bir muhafazada bulunan FDM'nin (laurik asit) ergime hızının iyileştirmesini farklı açılarda eğimli kanatlar kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Alüminyum malzemeden seçilmiş kanatlar dikdörtgen hacmin alt yüzeyine yukarı yönde montajlanmış ve aynı duvardaki sıcaklık 333,5 K değerinde sabit tutulmuştur. Ergime hızının iyileştirilmesi çalışmasında, öncelikle 4 mm sabit kanat kalınlığında ve sabit kanat uzunluğu ve kanat genişliği altında en uygun kanat sayısı belirlenmiştir. En uygun kanat sayısı belirlenirken dikdörtgen hacmin içerisindeki toplam FDM miktarının değişmemesi için kanat boyları kanat sayısı arttıkça azaltılmıştır. En yüksek ergime hızına sahip kanat sayısı 2 olarak bulunduktan sonra kanatların dikey eksene göre 35°, 45° ve 60°'lik açılar altında FDM'nin ergime hızını nasıl etkilediği ayrıca incelenmiştir. En uygun kanat sayısının 2 olarak belirlendiği eğimsiz yapıdaki kanatlı GID ünitesinin ergime süresi, kanatsız yapıya göre %43 oranında daha düşük bulunmuştur. Benzer şekilde 45°'lik kanatlı yapı için %31 oranında ve 60°'lik kanatlı yapıda da %5,12 oranında ergime sürelerinde kanatsız yapıya

göre bir düşüş sağlanmıştır. Ergime sürelerine göre bir sıralama yapıldığında 45° 'lik kanatlı yapı, sonra 60° 'lik kanatlı yapı ve en son 35° 'lik kanatlı yapı gelmektedir. Süre olarak bakıldığında ise örnek olarak 45° 'lik açıya sahip kanatlı GID ünitesindeki FDM'nin ergime süresi dikey yönde kanatlara sahip GID ünitesinden yaklaşık 1800 s daha kısa bulunmuştur. Açılı kanat kullanıldığında en uygun açının 45° olacağı araştırmacılar tarafından tavsiye edilmiştir [25].

Groulx ve diğerleri tarafından bir fotovoltaiik (FV) panelin performansını iyileştirmek için panel arkasına iki alüminyum plaka arasında olacak şekilde FDM (RT25) yerleştirilmiş ve FDM'nin içerisine ısıyı uyumlu göndermek için de alüminyum kanat eklenmiştir. Araştırmacılar yaptıkları bu iki boyutlu sayısal çalışmada FV üzerine iki saat süre boyunca 1000 W/m^2 akıda güneş ışınlamı geldiğini dikkate almışlardır. Kanatçık, FDM'nin muhafaza edildiği bölge içerisinde öncelikle üst plakanın tam ortasında ve FDM'nin ortasına kadar gelecek şekilde eklenmiştir. Sonraki tasarımda alt plakanın tam ortasında ve FDM'nin ortasında kadar gelecek şekilde yer almıştır. Son tasarımda ise üst ve alt plakalarını ikisine de temas edecek şekilde tam ortalarından boydan boya eklenmiştir. Bunun yanında FV/FDM GID ünitesinin düşeyle yaptığı değişik açılardaki performansı da incelenmiştir. GID ünitesi, 0° ile 90° arasında 15° 'lik açılarla değişecek şekilde düşey yönde sağ tarafa doğru döndürülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda FV/FDM GID ünitesindeki en verimli ısı dağılımı, FDM'nin depolandığı hacim içerisindeki alt ve üst yüzeylerin ikisine beraber temas eden kanat yapısından elde edilmiştir. Eğim açısı düşeyden 0° ile 75° arasında değiştiği sürece, 80 dakikalık bir stabilizasyon süresi boyunca ön ve arka plaka sıcaklıklarının düşük değerleri korunabilmiştir. 75° 'lik eğim açısına sahip FV/FDM GID ünitesinin ön ve arka yüzey sıcaklıkları 310 K ve 306 K olarak bulunmuş ve bu değerler 90° 'lik eğim açısına sahip tamamen yatay pozisyonundaki tasarımdan yaklaşık 6 K daha düşük bulunmuştur. Tamamen yatay pozisyonundaki yapıda ısı transferi sadece iletim ile meydana geldiği için FV panelin üst yüzey sıcaklığını iletim ve doğal taşınımın beraber yer aldığı yapıdaki kadar hızlı gerçekleştirememiştir [26].

Sheikholeslami ve diğerleri, kare bir IED tankı içerisinde bulunan sıcak sudan faz değişim yolu ile ısı enerjisi geri kazanımının sayısal incelemesini Standart Galerkin Sonlu Elemanlar Metodu'nu (SGSEM) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bunun yanında doğadan esinlenerek tasarladıkları kar tanesi kristal yapısındaki kanatçık yapısıyla da GIIED ünitesinden ısı geri kazanım performansı iyileştirmesi çalışmasını da gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada daha da

ileriye giderek hem alüminyumdan yapılmış kar tanesi geometrili kanatçık içeren hem de Cu parçacık eklenmiş GIIED ünitesinden ısı geri kazanım sürecinin sayısal incelemesini yapmıştır. Yenilikçi kanat yapısının geleneksel düz kanatlarla karşılaştırma analizi de ayrıca yapılmıştır. Araştırmacılar, düz ve kar tanesi şekilli kanatçık kullanımının kanatsız tasarıma göre FDM'nin katılma sürecini 4,5 ve 7,8 kat daha hızlı hale getirdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca hacimce %0,025 ve %0,05 oranlarında Cu parçacıkların sisteme eklenmesi, ısı transferi yükseltici içermeyen duruma göre FDM'nin katılma sürecini 1,1 ve 1,2 kat daha hızlı hale getirmiştir. Uygun yapıya sahip kanatçık kullanımı, hem maksimum enerji depolama kapasitesi hem de katılma hızı açısından nanoparçacık eklenmesi durumuna kıyasla GIIED sisteminin ısı geri kazanımı için daha iyi bir iyileştirme tekniği olduğu sonucuna ulaşılmıştır [27].

Wang ve diğerleri, dikey FDM muhafazası içerisinde bulunan FDM'nin (laurik asit) ergime davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. FDM'nin düşük ısı iletkenliğini iyileştirmek için dikey olarak kullanılan FDM deposunun içerisinde çift parçalı yatay kanatçıklar kullanmak yerine “L” şeklinde yeni tasarladıkları tek parçalı kanatçık kullanmayı tercih etmişlerdir. “L” şeklindeki kanatçığın FDM muhafazası içerisinde kapladığı alan ile çift yatay kanatçıkların kapladıkları alan aynı olacak şekilde boyutlandırılmıştır. “L” şeklindeki kanatçık 10 farklı şekilde boyutlandırılarak, FDM muhafazası içerisinde önce alt konumda ve sonra üst konumda olacak şekilde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. FDM'nin ergimesi için gereken ısı iletkenliği muhafazanın sol dikey duvarının 343 K sıcaklık değerinde sabit tutulması ile sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, yeni önerilen “L” şeklindeki kanatçığın FDM muhafazası içerisinde alt bölgedeki konumunun en iyi ergime süresini verdiği bildirilmiştir. “L” şeklindeki kanatçığın yataydaki boyu 40 mm ve düşeydeki boyu 20 mm olduğunda ergime süresinde yaklaşık %45 düşüş meydana getirilmiştir [28].

Prim, ticari soğutucularda enerji tasarrufu sağlamak ve depolanan gıda kalitesini iyileştirmek için farklı ergime sıcaklıklarına sahip FDM plakaları, depolama ünitesi içerisine ve çevresine montajlamıştır. Araştırmacı tarafından deneysel ve sayısal çalışmalar yapılarak en uygun FDM ve depolama ünitesi malzemesi belirlenmiştir. Araştırmacı tarafından ticari dondurucular, soğuk kaplar ve dondurma kapları gibi düşük sıcaklıklı IED sistemlerinin uygulanmasına dayanan çeşitli sonuçlar sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre, önerilen soğuk uygulamalarda, depolama ünitesi iç sıcaklığı ve depolanan ürün sıcaklığı dalgalanmalarının ve yükselmesinin azaltılmasına ve dolayısıyla donmuş gıdaların

depolama ve nakliye koşullarının iyileştirilmesine dayalı olarak FDM kullanımının faydasını kanıtlanmıştır [39].

Tardy ve Sami, bir klima santralinde bulunan ısı değiştiricideki verimi arttırmak için IED uygulaması üzerine matematiksel bir çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar, ısı değiştiricisindeki soğutma verimini artırmak için ısı borularından oluşan bir ünite tasarlamış ve bu üniteyi FDM (buz) ile doldurmuşlardır. IED sistemi ve ısı değiştiricisi arasındaki ısı transferi mekanizması termodinamik denklemler halinde ispatlanmış ve türetilen matematiksel ifadelerin doğruluğu deneysel olarak test edilmiştir. Türetilen denklemlerin fiziki olayları ifade etme potansiyelinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır [59].

Tian ve diğerleri, dikdörtgen bir hacim içerisine sağ yüzeye gelecek şekilde bakır, alüminyum, karbon çeliği ve çelik 302 malzemelerinden oluşan iki adet kanatçık ekleyerek FDM'nin (laurik asit) ergime süresi üzerindeki değişimini sayısal olarak incelemişlerdir. Yaygın olarak kullanılan yüzey ortalamalı Nusselt sayısı, ergime süresi, toplam depolanan enerji ve ortalama güç göstergeleri ile araştırmacılar tarafından önerilen kütle başına depolanan enerji ve depolanan enerji başına maliyet göstergeleri, kanat malzemesinin FDM üzerindeki ısı iletme etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır. Kanatlı IED sistemindeki FDM'nin kanatsız yapıya göre daha hızlı ergidiği ve ergime süresinin bakır, alüminyum, karbon çelik ve çelik 302 kanatçıkların eklenmesiyle sırasıyla %41,6, %41,0, %40,1 ve %37,2 oranında azaldığı bulunmuştur. Kütle başına depolanan enerjide önemli miktarda azalma kanatçıkların eklenmesiyle sağlanmış ve hesaplanan düşüş miktarı sırasıyla bakır kanatçıklar için %27 oranında ve alüminyum kanatçıklar için %9,4 oranında olmuştur. Depolanan enerji başına maliyet oranı kanatsız duruma göre %5,6 kadar bakır kanatçıklar için daha yüksek bulunmuştur. Çünkü bakırın temin maliyetleri diğer kanatçık malzemelerine göre daha yüksektir. Kanatçık malzemesinin seçiminde benimsenen göstergelerin çok büyük etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. Yalnızca yaygın olarak kullanılan dört gösterge dikkate alındığında, bakır ve karbon çeliği kanatçık malzemeleri şiddetle tavsiye edilirken, altı gösterge beraber değerlendirildiğinde ise alüminyum kanatçık malzemesinin daha kullanışlı olacağı araştırmacılar tarafından belirlenmiştir [61].

Ali, elektronik bileşenlerin pasif soğutulması için nanoparçacıkla güçlendirilmiş FDM (RT-35HC) ve ısı borusu ile desteklenen ısı alıcının deneysel araştırmasını yapmıştır. Deneysel çalışmada temel FDM olan RT-35HC içerisine kütlece %0,003 ve %0,006 oranlarında

grafen oksit nanoparçacıkları eklenmiş ve elde edilen kompozit FDM, üzeri açık bir dikdörtgen kabın içerisine boşaltılmıştır. Belirtilen kabın içinde elektronik cihazların ısınmasını modelleyecek 1 kW/m^2 , $1,5 \text{ kW/m}^2$ ve $2,5 \text{ kW/m}^2$ gibi farklı ısıtma yüklerinde çalışabilen ısıtıcı plaka ve bu ısıtıcı plakadaki sıcaklık dağılımını düzenleyecek ısı borusu sistemi de yer almaktadır. Nanoparçacıkla güçlendirilmiş kompozit FDM ve ısı borusu ile desteklenen ısı alıcısının, 1 kW/m^2 ısıtma yükü altında boş ısı alıcıya göre içinde bulunduğu muhafazanın en altındaki maksimum sıcaklık değeri kütlece %0,003 oranında grafen oksit içeren tasarımda %29,53 oranında ve kütlece %0,006 oranında grafen oksit içeren tasarımda ise %34,06 oranında düşüş göstermiştir. Benzer şekilde $1,5 \text{ kW/m}^2$ ısıtma yükü altında ise kütlece %0,003 oranında grafen oksit içeren tasarımda %36,29 oranında ve kütlece %0,006 oranında grafen oksit içeren tasarımda ise %36,45 oranında azalma meydana gelmiştir. Bunun yanında en yüksek ısıtma yükü olan $2,5 \text{ kW/m}^2$ değerinde ise anlık olarak en yüksek sıcaklık düşüşü %42,81 oranında olmuştur. Enerji depolama sürecinin tamamına bakıldığında ise aynı ısıtma yükü altında sıcaklık değerindeki düşüş kütlece %0,003 oranında grafen oksit içeren tasarımda %32,95 oranında ve kütlece %0,006 oranında grafen oksit içeren tasarımda ise %37,54 oranında hesaplanmıştır. Bu nedenle, RT-35HC tabanlı nanoparçacıkla güçlendirilmiş kompozit FDM destekli ısı alıcılardan en iyi verim düşük güç seviyesi altında kullanılması durumunda elde edilecektir. Daha yüksek güç seviyelerinde ise kullanılacak olan nanoparçacıkların aglomerasyonu (birlikte durma isteği, topaklanma) nedeniyle ısı iletkenlik azalacağı için ısı alıcısı olarak kullanılmaları çok uygun olmayacaktır [62].

Aqib ve diğerleri, FDM'lerin düşük ısı iletkenliğinin sebep olduğu kullanım alanlarının daralması sorununa çözüm bulmak için FDM (PT-58, parafin wax) içerisine kütlece %2, %4 ve %6 oranında metalik esaslı alümina (Al_2O_3) ve metal esaslı olmayan çok duvarlı karbon nanotüp eklemişlerdir. Kompozit FDM olarak da adlandırılabilen yeni FDM karışımının etkinliği bir ısı alıcıda test edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, ısı alıcıda saf FDM kullanılması durumunda ısı alıcının en üst noktasının sıcaklığı en yüksek $61,53^\circ\text{C}$ değerine ulaşabilmekte iken Al_2O_3 katkılı FDM kullanılması durumunda ise en üst noktanın sıcaklığı kütlece %2 oranında Al_2O_3 için $62,65^\circ\text{C}$, %4 oranında Al_2O_3 için 63°C ve %6 oranında Al_2O_3 için ise 64°C olarak bulunmuştur. Bunun yanında çok duvarlı karbon nanotüp kullanılması durumunda ise ısı alıcının en üst noktasının sıcaklığı sırasıyla %2 için 68°C , %4 için $69,86^\circ\text{C}$ ve %6 için $70,55^\circ\text{C}$ değerlerine ulaşmaktadır. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışma ile yeniden üretilen çok duvarlı karbon nanotüp içeren FDM yapısı ısı

alıcının güvenli çalışma süresini uzatmakta ve çalışma sıcaklığı yükseltilmiş olmaktadır [63].

Gong ve diğerleri, izotermal olarak ısıtılmış bir dikey duvar ile dikdörtgen bir boşlukta bir FDM'nin serbest konveksiyon baskın ergimesini sabit kafes birincil değişken metoduyla kombine edilmiş akım çizgisi/Petrov-Galerkin sonlu elemanlar tekniğini kullanarak matematiksel olarak simüle etmişlerdir. Entalpi-gözeneklilik modeli, katı/sıvı ara yüzeyindeki akışın evriminin fizikini açıklamak için kullanılmıştır. Momentum denklemlerindeki sıkıştırılabilirlik kısıtını bertaraf etmek için bir ceza formülasyonu kullanılmıştır. Ergime işlemi sırasında uygun bir aşamada FDM'nin depolandığı kabın ters çevrilmesi, FDM'de serbest konveksiyon kontrollü ısı transferinin artırılması için basit ama etkili bir teknik olarak önerilmiştir. Sunulan teknik, bir takım özel tasarımlar için FDM'nin %50 oranında daha fazla enerji depolamasına imkân sağlamıştır [64].

Shatikian, zeminden ısıtılmalı dikdörtgen bir hacim içerisinde bulunan FDM'nin (parafin wax) kanatçık varlığı altında ergime ve katılaşma davranışını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, depo ünitesinin üst kısmını açık bırakarak, FDM'nin hacimsel genişleme davranışını da incelemiştir. Alüminyumdan imal edilen kanatların boyu 5 mm ile 10 mm arasında, kanat kalınlığı 0,15 mm ile 1,2 mm arasında ve FDM tabakasının iki kanat arasındaki kalınlığı 0,5 mm ile 4 mm arasında değişecek şekilde parametrik olarak değiştirilerek ergime, katılaşma zamanları ve depolanan enerji miktarları her bir tasarım için hesaplanmıştır. Deneyler FDM'nin ergime sıcaklığından 6°C ile 24°C arasında daha büyük olacak şekilde ayarlanmıştır. Yapılan sayısal çalışma ile FDM'nin zamana bağlı faz değişimi süreci detaylıca açıklanmıştır. Dikdörtgen kabın taban sıcaklığı ile katı haldeki FDM sıcaklığı farkının ve kanatların yükseklik ve kalınlıkları ile FDM'nin kalınlık değişiminin faz değişimine etkisi Stefan ve Fourier boyutsuz sayıları da dikkate alınarak detaylı bir şekilde araştırılmıştır [65].

Vadwala, IED sisteminde kullanılan FDM'nin (parafin wax) sahip olduğu düşük ısı iletim katsayısı değerini yükseltmek için IED sistemi içerisine yüksek gözenekli açık hücreli bakır köpük eklemiş ve meydana gelen değişimi deneysel olarak incelemiştir. Bakır köpük kullanımı ile saf FDM'nin 0,21 W/mK olan ısı iletim katsayısı değeri, yaklaşık 18 kat yükselerek 3,8 W/mK değerine ulaşmıştır. Aynı miktarda FDM içeren ve köpük kullanılan IED sistemindeki FDM'nin tamamının ergimesi için gereken süre metal köpük içermeyen

sistemle karşılaştırıldığında %36 oranında azaltılmıştır. Bakır köpük kullanımının ergime ve katılaşma süreçlerindeki ısı transferine etkisi ısı taşınım katsayısı hesaplanarak analiz edilmiştir. Sistemde kullanılan bakır köpük malzeme hem FDM içerisinde hem de FDM'nin katılaşması için kullanılan hava kanalına eklenerek ısı taşınım katsayısının artmasını sağlamıştır. Bunun yanında FDM'nin ergimesi sırasında FDM içerisindeki sıcaklık dağılımını tahmin etmek için sayısal bir kod araştırmacı tarafından geliştirilmiştir [66].

Bouadila ve diğerleri, sulu güneş kolektörlerinin güneş battıktan sonra bir süre daha verimli şekilde çalışabilmesi amacıyla bünyesine FDM (parafin) eklemişlerdir. FDM, iki adet bakır dikdörtgen bölme içerisine hacimce %80 oranında doldurulmuş ve kolektörün emici yüzeyinin arkasına orantılı bir şekilde montajlanmıştır. Tasarlanan sistem deneysel olarak farklı hava şartları altında incelenmiştir. Yapılan tasarım ile farklı hava koşullarında yapılan ölçümler, FDM'nin güneş kolektörünün gece performansını artırmaya katkıda bulunduğunu göstermiştir. Kolektör çıkış sıcaklığının küresel güneş radyasyonu dalgalanmalarından etkilenmediği araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir. Kolektör güneş battıktan sonra 5 saat boyunca 400 W civarında üniform bir faydalı ısı kaynağı olarak çalışmaya devam etmektedir. Entegre güneş enerjisi gizli depolama kolektörünün enerji verimliliği %25 ile %35 arasında değişim göstermiştir. FDM ile doldurulmuş boşlukların içindeki sıcaklık tabakalaşmasının bir analizi de gerçekleştirilmiştir [67].

Kousksou ve diğerleri, alt yüzeyi dalgalı ve sabit sıcaklıkta tutulan dikdörtgen kapalı bir muhafaza içindeki FDM'nin (katı galyum) ergimesini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Yapılan sayısal modelde bulunan dikdörtgen kabın üst ve yan duvarları yalıtılmış ve altı duvar sıcaklığı 38,3°C'de sabit tutulmuştur. Sonrasında muhafaza içerisine 28,3°C sıcaklıkta katı galyum doldurulmuştur. Katı-sıvı faz değişimine bağlı doğal konveksiyonu çözmek için yapılandırılmamış sonlu hacim yöntemi ve entalpi gözeneklilik tekniği kullanılarak sayısal bir kod geliştirilmiştir. Kullanılan sayısal kodun geçerliliği, literatür çalışmaları ile karşılaştırılarak belirlenmiştir. Dalgalı yüzeyin genliğinin akış yapısı ve ısı transfer özellikleri üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak dalgalı yüzeyin genlik değerinin yükselmesi ile ergime hızının arttığı bulunmuştur. Çünkü dalgalı yüzeyin genliğinin artması ısı transferi yüzey alanının da artması anlamına gelmektedir [68].

Ebrahimi ve Dadvand, yapmış oldukları sayısal çalışmada dikey yan duvarlara gömme şekilde monte edilmiş iki ısı kaynağı (sıcak bölge) ve iki ısı alıcı (soğuk bölge) çiftinin farklı

düzenlemeleri ile kare bir boşlukta nano parçacık ile güçlendirilmiş FDM'nin (parafin wax) ergime davranışını incelemişlerdir. FDM'nin düşük ısı iletimi problemini bertaraf etmek için FDM içerisine hacimce %2 ve %5 oranlarında Al_2O_3 (alümina) parçacığı eklenmiştir. Temel korunum denklemleri, katı-sıvı ara yüzünü izlemek için bir entalpi gözeneklilik tekniği ile basınca dayalı bir sonlu hacim yöntemi kullanılarak düzgün olmayan bir ağ üzerinde çözülmüştür. Isı kaynaklarının ve ısı alıcıların farklı konumlarının kullanılması ile dört farklı sayısal model oluşturulmuştur. I. modelde ısı kaynakları sol tarafta ve ısı alıcılar sağ tarafta; II. modelde ısı kaynaklarından biri sol alt tarafta ve diğeri sağ üst tarafta ve benzer şekilde ısı alıcılar ısı kaynaklarının tersi şeklinde; III. modelde ısı kaynakları sağ ve sol alt kısımda ve ısı alıcılar sağ ve sol üst kısımda; IV. modelde ise ısı kaynakları sağ ve sol üst kısımda ve ısı alıcılar sağ ve sol alt kısımda olacak şekilde montajlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, aynı ergime süresinde II. modelin en yüksek ergime yoğunluğuna ve IV. modelin en düşük ergime yoğunluğuna sahip olduğu bulunmuştur. Bunun yanında FDM içerisine eklenen %2 oranındaki Al_2O_3 nano parçacığı FDM'nin ısı iletim katsayısını yükselterek ergimenin en hızlı olmasını sağlamıştır [69].

Darzi ve diğerleri, iki boyutlu açık bir dikdörtgen boşlukta bulunan FDM'nin (RT27-parafin) sınırsız ergime ve katılaşma davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal analizler boşluğun üç farklı en boy oranı dikkate alınarak yapılmıştır. Ergimenin ilk başlarında sıcak yüzeye temas eden sıvı FDM tabakasının çok ince olduğu durumda iletim ile ısı transferi daha etkin rol oynamaktadır. Katı haldeki ergimemiş FDM'nin yoğunluğu sıvı FDM'den daha yüksek olduğu için dikdörtgen boşluğun dibine doğru batmaktadır. Dikdörtgen boşluğun en boy oranının yükseltilmesi ergime hızında önemli değişiklikler meydana getirmemiştir. Fakat en boy oranının artırılması katılaşma hızını artırmış ve böylece toplam katılaşma süresi kısalmıştır. Ergime işlemine göre doğal konveksiyon hareketlerinin katılaşma sürecinde yer almaması tam katılaşma süresinin ergime süresinden çok daha uzun olmasına neden olmuştur [70].

Yatağanbaba, pleksiglass malzemeden ürettiği dikdörtgen bir küp içerisinde bulunan iki farklı FDM'nin (tuz hidrat- $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (kalsiyum klorür hekzahidrat) ve parafin-n-heptacosane) gözenekli ortam bulunması ve bulunmaması şartları altında ergime davranışını incelemiştir. Isı kaynağı olarak elektrikli ısıtıcı kullanmış ve ısı kaynağının kabın sol yan, alt ve üst duvarlarında bulunması durumlarında FDM'lerin sergilediği ergime davranışını incelemiştir. Yapmış olduğu sayısal çalışma ile de elde ettiği deneysel sonuçları

karşılaştırmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, ısıtma konumunun FDM'lerin ergime süresinde oldukça büyük etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Altan ısıtma durumunda doğal taşınım hareketlerinin etkisi ile ergime hızı diğer ısıtma konumlarına göre daha yüksek bulunmuştur. Gözenekli ortamın kullanılması FDM'lerin düşük ısı iletim katsayısını yükseltmektedir. Gözenek yoğunluğunun artması ortamın iç yüzey alanında ve etkin ısı iletkenlikte artış meydana getirmesine karşın ısı geçirgenlik azaldığı için doğal taşınım hareketleri zorlanmaktadır [71].

Zennouhi ve diğerleri, dikdörtgen boşluğun düşeyle yaptığı farklı açılardaki (90° , 60° , 30° ve 0°) konumunun FDM'nin (galyum) ergime davranışına olan etkisini iki boyutlu sayısal olarak incelemişlerdir. Katı-sıvı faz değişimine bağlı doğal taşınım hareketlerini çözmek için yapılandırılmamış ağ yapısı, sonlu hacim yöntemi ve entalpi gözeneklilik tekniği kullanılarak geliştirilen sayısal bir kod kullanılmıştır. Türetilen sayısal kodun doğruluğu literatür çalışmaları ile test edilmiştir. Sayısal çalışma sonucunda, boşluğun düşeyle yaptığı eğim açısının 90° 'den 0° 'ye düşürülmesi FDM'nin ergime hızını yükseltmiştir [72].

Joneidi ve diğerleri, dikdörtgen boyutlu bir hacme konulan FDM'nin (RT35) ergime davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. FDM'nin hacimsel genişlemesini tolere edebilecek kadar boşluk hacim içerisinde tesis edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada 4, 4,5 ve 5,6 W değerlerindeki farklı ısı akısı hacmin alt yüzeyine uygulanmış ve hacmin yatayla yaptığı açı 0° , 45° ve 90° olacak şekilde değiştirilmiştir. Deneysel araştırma sonucunda, alt yüzeye uygulanan ısı akısının artması ergime süresinin azaltmakta ve ısı transfer hızının ve ısıtıcı sıcaklığının arttığını göstermektedir. FDM'de meydana gelen ergimenin başlangıcında iletimle ısı transferi baskın durumdayken sıvı FDM oluşmaya başladıktan sonra taşınım ile ısı transferi daha ön plana çıkmıştır. Ergime sınırı ısıtıcının karşı duvarına yaklaştıkça taşınım ile ısı transferinin etkisinin azaldığı da gözlemlenmiştir. Isıtıcının açısı arttıkça toplam ergime süresi, ısıtıcının ortalama sıcaklığı, FDM'nin ortalama sıcaklığı ve bakır levhada depolanan nihai enerji miktarında da artış meydana gelmiştir [73].

Kamkari ve Groulx, dikdörtgen bir muhafaza içerisine bir ve üç adet kanat ekleyerek FDM'nin (laurik asit) ergime hızındaki değişimi, farklı muhafaza eğim açıları altında deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Şeffaf akrilik malzemeden imal edilen dikdörtgen muhafazanın sağ yan yüzeyi alüminyum plakadan imal edilmiş ve ergime işlemi muhafazanın 90° (dikey), 45° ve 0° (yatay) eğim açıları için değerlendirilmiştir. Eğimli muhafazalarda

katı-sıvı ara yüzünün evrimi, muhafaza eğim açısının azaltılmasıyla sıvı FDM’de gelişen girdaplı akış yapılarının ergime hızını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Hem kanatlı hem de kanatsız muhafazalar için, eğim açısının azaltılması ergime hızının artırmıştır. Kanatsız dikey muhafazaya kıyasla, kanatsız yatay ve 3 kanatlı dikey muhafazalar tarafından elde edilen ısı transferi iyileştirmeleri sırasıyla %115 ve %56 olarak hesaplanmıştır. Bu ısı davranış ergime hızını arttırmak için dikey muhafazaya kanat eklemektense muhafazanın basitçe eğilmesiyle daha etkili bir sonuç alınabileceğini açıkça göstermiştir. İncelenen farklı tasarımlar arasında, 3 kanatlı yatay muhafaza, maksimum ısı transfer oranını ve dolayısıyla minimum ergime süresine sahip olmuştur [74].

Wang ve diğerleri, farklı eğim açılarındaki dikdörtgen bir boşlukta FDM’nin (RT60) ergime sürecini sayısal olarak incelemişlerdir. Boşluğun bir tarafı ısıtılırken diğer tarafları adyabatik olarak kabul edilmiştir. İncelenen eğim açıları arasında 0° (alt yatay ısıtma), 30° , 60° , 90° (dikey ısıtma), 120° , 150° ve 180° (üst yatay ısıtma) konumları kullanılmıştır. Tüm eğim açıları için katı-sıvı ara yüzünün gelişimi ve ergime işlemi sırasındaki sıcaklık değişimleri araştırmacılar tarafından tartışılmıştır. Yapılan sayısal çalışma eğim açılarının FDM’nin ergime davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Bunun yanında açı değerinin 0° ’den 180° ’ye yükseltilmesi, tam ergime süresinin doğrusal olmayan bir şekilde artmasıyla sonuçlanmıştır [75].

Bouhal ve diğerleri, FDM (galyum) unsurlarını pasif güneş binalarına entegre etmek amacıyla deneysel ve sayısal bir çalışma yapmışlardır. Bu amaca ulaşmak için, başlangıçta soğuk bir sıcaklığa ayarlanmış dikdörtgen bir muhafazayı dolduran faz değişim malzemesinin ergimesinin karmaşık davranışını tanımlamak için birkaç sayısal çalışma yapılmıştır. Boşluk, 38.3°C sıcaklıkta sağ yan duvardan dikey olarak ısıtılırken, sol soğuk duvar 28.3°C soğuk sıcaklıkta tutulmuş ve yatay duvarlar yalıtılmıştır. Entalpi-gözeneklilik formülasyonuna dayalı bir geçici sayısal model, iki boyutlu HAD simülasyonları yoluyla ısı transferi ve ergime davranışlarını incelemek için kullanılmıştır. FDM’nin ısı transferini ve ergime sürecini geliştirmek için dikdörtgen ve üçgen şekilli kanatlar önerilmiştir. Ayrıca, hem termofiziksel özelliklerin hem de kanat kullanımının akış yapısı ve ısı transfer özellikleri üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. $Ra=10^6$ civarında bir Rayleigh sayısı için sıcaklık dağılımlarının yanı sıra, doğal taşınım kaynaklı akışa sahip ergimiş FDM kesri konturları tanımlanmış ve karşılaştırılmıştır. FDM’nin özgül ısı kapasitesi ve ısıl iletkenliğindeki artışa bağlı olarak ergime hızının da doğru orantılı olarak yükseldiği

sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen bulgular dikdörtgen kanat kullanımının artan ısı transferi yüzey alanı sayesinde FDM'nin ergime süresini üçgen kanatlara göre daha fazla kısalttığını ortaya koymuştur. Ergime süresi 35 dakikadan 32 dakikaya inmiştir. Bunun yanında üçgen kanat kullanımı ise dikdörtgen muhafaza içerisindeki ergime sürecini tek tipleştirerek homojen bir ergime sürecinin var olmasını sağlamıştır [76].

Fadi ve Eames, dikdörtgen bir test hücresinde bulunan FDM'nin (RT44HC) ergime davranışı farklı ısı akısı yoğunlukları altında deneysel olarak incelemiştir. Isı akısı dikdörtgen hücrenin sağ ve sol yan duvarlarından 675, 960 ve 1295 W/m² değerlerinde uygulanmıştır. Araştırmacılar, faz değişiminin sayısal modellerinin doğrulanması için doğru veriler sağlayan yeni bir deneysel test donanımı geliştirmiştir. Kontrollü bir ısı akısı sağlamak için mika ısıtıcılar ve bakır plakalar kullanılmıştır. Ergime davranışını gözle görünür kılmak için dikdörtgen hücre polikarbonat şeffaf levhadan üretilmiştir. Yüksek çözünürlüklü kamera kullanılarak katı-sıvı faz geçişi görsel hale getirilmiştir. Elde edilen bulgular taşınım ile ısı transferini yönlendiren ısı akısı büyüklüğü ile FDM'nin ergime kesri arasında güçlü bir korelasyonun olduğunu ifade etmiştir. FDM'ye uygulanan 675 W/m² değerindeki ısı akısının 960 W/m² değerine yükseltilmesi FDM'nin toplam ergime süresinin %26,3 oranında azalması sağlamıştır. Bernzer şekilde ısı akısının 1295 W/m² değerine yükseltilmesi durumunda ise toplam ergime süresi %42,10 oranında aşağıya düşmüştür. Elde edilen deneysel veriler ileride yapılması düşünülen sayısal çalışmalar için iyi bir referans noktası sunmuştur [77].

Yadav ve Samir, taşınabilir bir dikdörtgen muhafaza içerisinde bulunan FDM'nin (parafin wax) IED sistemi olarak kullanılması sırasında ısı akısı altında yapısında meydana gelen faz değişimini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Araştırmacılar, 1500, 1930, 2500 ve 3100 W/m² ısı akısı altında meydana gelen ergime davranışının binaların ısı depolaması ve ısı regülasyon uygulamaları için uygun olduğunu ifade etmişlerdir. Ergime işleminin başlangıcında FDM'nin ergimesi iletimle ısı transferi yoluyla olmakta iken zamanla taşınım ile ısı transferinin meydana getirdiği doğal taşınım hareketleri daha baskın hale gelmiştir. Doğal taşınım hareketlerinin varlığının artması, depo zemininde bulunan katı haldeki FDM'nin ergimesini zorlaştırmıştır. Bunun yanında, ısı kaynağından 330 dakika boyunca ısı verilmeye devam etmesine rağmen depo içerisindeki FDM'nin %29, %25, %17 ve %16 kadarlık kısmı sırasıyla 1500, 1930, 2500 ve 3100 W/m² ısı akılarında katı halde

kalmıştır. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışma ile 5-5,5 döngü ömrü için FDM'nin ergime davranışını ve depolanan enerji miktarlarını hesaplamışlardır [78].

Karami ve Kamkari, kanatlı (1 ve 3 kanat) bir dikdörtgen hacmin yatay eksenle yapmış oldukları eğim açıları 0° , 45° , 90° , 135° ve 180° değerlerinde döndürülmesi ile hacmin içerisinde bulunan FDM'de (laurik asit) kaldırma kuvveti kaynaklı taşınım hareketlerinin gelişimini sayısal olarak incelemişlerdir. Kontrol hacmi yaklaşımını kullanan zaman bağlı sayısal simülasyonlar faz alanları, akış alanları, sıcaklık dağılımları, ısı transferi oranları ve farklı kanat sayılarındaki ve depo eğimlerindeki modellerde depolanan enerji miktarını belirlemek için kullanılmıştır. Araştırmacılar, doğal konveksiyon akışlarının yoğunlaşması ve sıvı FDM'deki girdap sayısının artması nedeniyle dikdörtgen hacmin eğim açısının azalmasıyla ergime süresinin azaldığını ifade etmişlerdir. Kanatsız dikey depoya kıyasla en yüksek ergime süresinin düşüşü %72 oranla 0° eğim açısına sahip 3 kanatlı depoya elde edilmiştir. Dikdörtgen deponun eğim açısının artırılması depolanan toplam enerji miktarını yükseltmiş fakat kanat sayısının artırılması ise düşürmüştür. Çünkü kanat sayısının artması depo hacmi içerisinde bulunan FDM miktarını azaltmıştır [79].

Abdi ve diğerleri, alt yüzeyi 55°C , 60°C ve 70°C sabit sıcaklıkta tutulan iki boyutlu dikdörtgen bir muhafaza içerisindeki FDM'nin ergime hızını yükseltmek için 1, 3 ve 5 kanat kullanılması durumundaki ısı tranferi hızı ve enerji yoğunluğunu sayısal olarak incelemişlerdir. Enerji depolama çalışmasında kanatların boyu ve sayısı ile ilgili detaylı parametrik çalışma yapılmıştır. Araştırmacılar, ısı transferi yüzey alanını arttırmaya ek olarak dikey olarak yönlendirilmiş kanat kullanımının literatürdeki önceki çalışmalarda doğal taşınımın etkisini azaltma eğilimi gösteren yatay kanatların aksine, doğal taşınım mekanizmasını baskılamadığını ifade etmişlerdir. Kanat sayısının çoğaltılmadan sadece uzun kanat kullanarak daha yüksek ısı transferi oranı ve toplam ısı transferi katsayısının elde edilebileceği yapılan çalışma ile kanıtlanmıştır. Termodinamik olarak IED sistemine kanat eklenmesi toplam depolanan gizli ısı miktarını azaltmasına karşın, uygun kanat uzunluğunun ve sayısının belirlenmesi ile kabul edilebilir seviyelerde duyulur ısı da IED sistemi tarafından depolanabilmektedir. Yapılan çalışma ile bu konunun önemi ortaya konmuştur [80].

Sathe ve Dhoble, FV ısı yönetim sistemleri, yoğunlaştırılmış FV sistemleri, bina ısı yönetim vb. gibi çeşitli ısı uygulamalarda uygulanabilirliğini anlamak için FDM (parafin

wax ve laurik asit) dolgulu eğimli bir dikdörtgen deponun üst ve yan ısıtma şartları altındaki performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacıların temel amacı literatürde çok nadir bulunan, üstten ısıtma modu ile dikdörtgen depodaki FDM'lerin ergiyik ön yayılımını ve sıcaklık dağılımını deneysel olarak analiz etmektir. Deponun yatayla yaptığı eğim açı 30° ve 60° şartlarında ısı kaynağı ısı alıcı depo plakasının tam üstünde olacak şekilde ayarlanmıştır. Eğim açısı 90° olacak şekilde ayarlandığında ise ısı kaynağı ısı alıcı plakanın tam sağ tarafına denk getirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda farklı eğim açılarındaki dikdörtgen depo içerisinde meydana gelen ısı transferi mekanizmalarındaki en büyük etkinin taşınım akımlarından kaynaklandığı bulunmuştur. Eğim açısını artmasıyla FDM'nin ergime hızı da artmıştır. Fakat en yüksek eğim açısında ısı alıcı plakanın sıcaklığı diğer şartlardan daha düşük bulunmuştur. Ergimenin başlangıcında ısı alıcı plakadan FDM'ye olan ısı transferi yüksek olmasına karşın, ergimenin ilerlemesi ile bu hız düşmektedir. Laurik asit için 30° eğimli sistemdeki ergime süresi 60° ve 90° eğimli sistemlere göre sırasıyla yaklaşık %34 ve %50 daha fazla bulunmuştur. Benzer şekilde parafin wax için 30° eğimli sistemdeki ergime süresi 60° ve 90° eğimli sistemlere göre sırasıyla yaklaşık %33,96 ve %44,34 daha fazla bulunmuştur. Depolanan toplam enerji miktarı aynı FDM cinsi için tüm eğim açılarında yaklaşık benzer bulunmasına karşın yapı içerisindeki FDM'nin tamamının ergimesi için gereken süre hepsinde farklı bulunmuştur. Nusselt sayısı laurik asit için parafin waxa göre daha yüksek bulunmuştur. Heri iki sistem için ergimenin başlangıcına Nusselt sayıları yüksek olmasına karşın zamanla bu değerde düşüş meydana gelmiştir [81].

Chen ve diğerleri, üçgen şekilli çift kanat içeren ve FDM (laurik asit) doldurulmuş dikey olarak yönlendirilmiş dikdörtgen şekilli bir muhafazayı GIIED sistemi olarak ele almış ve FDM'nin ergime performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar, ele aldıkları tasarımda FDM'nin düşük ısı iletkenliğini yükseltmek için üçgen şekilli kanatların yanında hacimce %1, %2 ve %4 Al_2O_3 (alümina) nano parçacık ve %98 ve %95 gözeneklilik oranında Cu metal köpük kullanmıştır. Sayısal çalışmada saf FDM ve kanat, 3 farklı hacim yoğunluğunda Al_2O_3 -FDM ve kanat, 2 farklı gözeneklilik oranında Cu köpük-FDM ve kanat ve son olarak 3 farklı hacim yoğunluğunda Al_2O_3 -%95 gözeneklilik oranından Cu köpük-FDM ve kanat olarak toplamda 9 adet farklı model oluşturulmuştur. Yapılan çalışma aracılığıyla %1 ve %2 hacim oranlarındaki Al_2O_3 nano parçacığına sahip modeller FDM'nin ergime performansını iyileştirmiştir. Bunun aksine nanoparçacık hacim oranı %4 olan model, ergime performansını bozmuştur. Nanoparçacıklı FDM'nin bireysel olarak kullanılması durumunda, hacimce %1 oranında Al_2O_3 ihtiva eden model saf FDM-kanat

modeline göre yaklaşık 184 saniyelik zaman tasarrufu sağlayarak en iyi ergime süresine ulaşılmasını sağlamıştır. Gözenekli ortamın bireysel kullanımının FDM'nin ergime performansını önemli ölçüde iyileştirebileceği bulunmuştur. %95 gözeneklilik oranına sahip FDM-kanat modeli gözeneklilik oranının azalmasına bağlı olarak artan temastan dolayı meydana gelen ısı iletimindeki artışla, FDM'nin ergime performansının %98 gözeneklilik oranına sahip modelden 10 kat daha iyi olmasını sağlamıştır. Son olarak, nanopartiküllerin hacim oranları ne olursa olsun gözenekli ortamlara sahip modellere eklenmesi durumunda, FDM'nin dikdörtgen hacimdeki ergime performansını olumsuz etkilemiştir [82].

Oliveski ve diğerleri, kanatlı bir dikdörtgen boşluktaki FDM'nin (laurik asit) ergime sürecini, toplam kanat alanı ve FDM kütlesini sabit tutarak sadece kanadın en boy oranını değiştirerek sayısal olarak incelemişlerdir. Analiz parametrik olarak yapılan 78 farklı modelin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Sayısal model sonlu hacimler yöntemiyle oluşturulmuş ve kütlenin korunumu, momentumun korunumu, enerjinin korunumu ve entalpi-gözeneklilik modeli faz değişiminin modellenmesi için kullanılmıştır. İncelenen tüm modellerde, kanat boyundaki artış ve buna bağlı olarak kanat kalınlığındaki düşüş toplam ergime süresinde düşüş meydana getirmiştir. Kanatçık ve boşluk yüzey alanlarının oranlanması ile oluşturulan kanatçık/boşluk kesri arttıkça depolanan enerji miktarında düşüş meydana gelmiştir [83].

Abdi ve diğerleri, FDM'lerin düşük ısı iletim katsayı performanslarını iyileştirmek için alttan ısıtılmalı dikdörtgen bir hacim içerisinde bulunan FDM'nin (n-eicosane) içerisine dikey yönde 3 ve 5 kanatçık ekleyerek ergime ve katılaşma performanslarını deneysel olarak incelemiştir. Kullanılan kanatçıkların, enerjinin depolanma ve geri kazanılması süreçlerine olan etkileri farklılık göstermektedir. Araştırmacılar bu farklılıkları ortaya çıkarmak için 3 kanatlı tek uzunluğa sahip ve 5 kanatlı iki farklı uzunluk değerine sahip kanatçığın IED sistemine olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Dikey kanatçıkların depolama kapasitesinde benzer kayıplarla ergimeden ziyade katılaşma sürecinde daha etkili olabileceği ifade edilmiştir. Katılaşma sürecinde, doğal taşınım olmadığı için, ortalama güç, kıyaslama ile karşılaştırıldığında, depolama kapasitesinde %10'luk bir kayıpla maksimum %395 oranında artırılmıştır. Ergime durumunda, ortalama güç, depolama kapasitesinde %9'luk bir kayıpla maksimum %90 oranında yükseltilmiştir. Yüzey alanını dikey kanatçıklarla artırmak, taşınım hareketlerinin gelişimine katkıda bulunsa da, oldukça düşük bir iyileştirme potansiyeli göstermiştir. Genel olarak, depolama kapasitesindeki kayıp karşılığında kanat

hacmi kesrinin arttırılması, katılaşmayı önemli ölçüde artırırken, ergimede nispeten düşük iyileştirme etkisi göstermiştir [84].

Sinaga ve diğerleri, iki boyutlu bir dikdörtgen hacim içerisinde bulunan FDM'nin (laurik asit) ergime performansını iyileştirmek için kanatçık kullanılması sırasında meydana gelen değişimleri sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada dikdörtgen şekilli çift kanatçıkların belirlenen hacim içerisindeki en iyi ergime performansını sağlayan konumu belirlenmiştir. Dikdörtgen şekilli çift kanatçıkların FDM deposunun alt yarısında bulunduğu durum en iyi ergime performansını ve kanatsız duruma göre 1800 saniye tasarruf edilerek en kısa ergime süresini vermiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında kanat şeklinin ergime performansına etkisi incelemek için iki ikizkenar yamuk şekilli ve bir üçgen şekilli çift kanatçık, ilk aşamada belirlenen konuma eklenerek yeni modeller oluşturulmuştur. Fourier (Fo) sayısının 0,15 olduğu durumda en iyi Nusselt (Nu) sayıları üçgen şekilli çift kanat içeren modelden elde edilmiştir. Fo sayısının 0,15'den büyük olduğu modellerde ise Nu sayısı en düşük değerine ulaşmıştır. Üçgen şekilli çift kanatçığın kullanılması durumunda kanatsız duruma göre 1000 saniye tasarruf edilerek en iyi ergime performansına ulaşılmıştır. Ergimenin 2500 saniyesinden sonra iyileştirme oranları üçgen şekilli çift kanatçıklı model için daha iyi performansa sahip olmuştur [85].

Huang ve diğerleri, güneş enerjisi ve otomobillerin atık ısılarının geri kazanılmasında kullanılmasının düşünüldüğü kanatlı ve dikdörtgen şekilli bir dikey hacmin içerisinde bulunan FDM'nin (laurik asit) entalpi-gözeneklilik yöntemine dayanarak oluşturdukları sayısal modelini analiz etmişlerdir. Dikdörtgen depo içerisinde bulunan kanatçığın konumun ergime süresi üzerindeki etkisi araştırmacılar tarafından araştırılmıştır. Kanatçığın malzemesi alüminyum seçilmiş ve FDM deposunun sağ duvarına dikey şekilde alttan yukarı doğru gelecek şekilde her bir model için ayrı ayrı montajlanmıştır. Sonuçlar, kanatçık konumu arttıkça ergime süresinin 0,20 kanat konumunda minimuma ulaşmadan önce azaldığını, ardından arttığını ve sonunda kanatçiksız durumu aştığını göstermiştir. Kanadın ısı iletimi için etki aralığı alt yüzey ile sınırlı kalmaktadır. Alt yüzeyin yakınına yerleştirilen kanat ısı iletiminin artmasını sağlamış ve ergime süresi düşmüştür. Sıvı akış direnci kanat dikdörtgen depo içerisinde yukarı doğru hareket ettikçe artmaktadır. Üst yüzeye yakın monte edilen kanatçık üst kısımdaki ergimeyi hızlandırarak ısı tabakalaşma oluşumunu kolaylaştırmış ve doğal taşınımı zayıflatmıştır. Nu sayısı kanatlı modellerde kanatsız modele göre daha yüksek bulunmuştur [86].

Shafiq ve diğerleri, her iki yan duvarı ısıtılmış ve kanatlı dikdörtgen bir depo içerisinde bulunan FDM'nin (stearik asit) ergime davranışını sayısal olarak incelemiştir. Yapılan sayısal çalışmada kanatların her iki duvara eklenme açıları, uzunlukları ve şekilleri değiştirilmiş fakat toplam FDM hacmi tüm modellerde sabit tutulmuştur. Böylece her bir FDM deposunun depolamış olduğu gizli ısı miktarının aynı olması sağlanmıştır. Çalışmanın ilk modeli ısıtılmış duvarların her birine üçer adet olmak üzere ısıtılmış altı yatay kanatçık yerleştirilerek modellenmiştir. Üç farklı kanat açısı varyasyonu içeren model A, FDM'nin ergime süresini %16 oranında artırmış ve ortalama enerji depolama oranını %14,2 oranında azaltmıştır. Aksine model-S'nin düz ve açılı tip hibrit kanatçıklarının birleşimi, ergime oranını %18 ve ortalama enerji depolama oranını %19,8 oranında artırarak IEDÜ'nün ısı performansında kayda değer bir gelişme göstermesine imkân sağlamıştır. Farklı uzunluk ve kalınlıklara sahip düz kanat birleşimlerini kapsayan model-L'nin hepsinden daha etkili olduğu bulunmuştur. Optimum model-L'nin IEDÜ'nün ısıtma performansını %39,5 ve ortalama enerji depolama oranını %65,07 oranında artırmıştır. Ayrıca, optimum modelin geniş bir duvar sıcaklığı aralığı için sırasıyla Stefan sayısı ve Rayleigh sayısının bir fonksiyonu olarak ergime Fourier sayısı ve ortalama Nusselt sayısının iki yeni korelasyonu araştırmacılar tarafından önerilmiştir [87].

Kim ve diğerleri, açılı 3 kanatçıklı dikey yönlü dikdörtgen bir depoda bulunan FDM'nin (laurik asit) IED performansını incelemek için faz değişim sürecini entalpi-gözeneklilik modelini kullanarak sayısal olarak ifade etmişlerdir. Kanatçık açısının -40° ile 40° arasındaki değişiminin ısı transferi karakteristiği ve enerji depolama performansı üzerindeki etkisi araştırmanın temel amacı olarak belirlenmiştir. Kanatçıklar depo içerisinde aşağı ve yukarı yönlü olacak şekilde farklı açılarda modellenmiştir. O nedenle aşağı yönlü açılar negatif işaret ile yukarı yönlü açılar ise pozitif işaret ile ifade edilmiştir. Kanatçıkların aşağı yönlü olduğu modellerde, yukarı akış engellenmiş ve kanatların yukarı yönlü olduğu durumlarda, ısı tabakalaşmanın başlangıcından önce doğal taşınım hareketleri yoğunlaşmıştır. Enerji depolama işleminin son aşamasında, alt bölgede kalan katı FDM'nin miktarı artmış ve bu durum da ergime süresini uzatmıştır. Enerji depolama performansını değerlendirebilmek için ergime süresi, toplam depolanan enerji miktarı ve ortalama güç değerleri hesaplanmıştır. Kanatçık eğim açısının -30° ile -10° arasında olduğu modellerde, enerji depolama performansı 0° kanat açısına sahip modelin performansını aşmıştır. Böylece aşağı yönlü kanat kullanımını daha avantajlı olacağı ifade edilmiştir. -20° kanat açısına sahip model tarafından depolanan ortalama güç miktarı 0° 'deki kanat modelinden %19,3 daha fazla olmuştur [88].

Qin ve diğerkleri, dikdörtgen boyutlu küp şeklindeki bir IED sisteminde bulunan FDM'nin (RT42) ergime performansına etki eden açılı tek çelik kanadın deneysel ve sayısal incelemesini yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışma üç boyutlu olmasına karşın oluşturulan sayısal model iki boyutlu olarak kullanılarak FDM'nin ergime süreci modellenmiştir. Depo içerisinde kullanılan açılı kanatçık, etrafındaki katı haldeki FDM'nin sıcaklık dağılımına önemli derecede etki etmektedir. Yukarı yönlü $+30^\circ$ ve $+15^\circ$ açılı kanatçık içeren modeller yatay konumda kanatçık içeren model ile karşılaştırıldığında ergime süresini %4 ve %3,8 oranında uzatmıştır. Benzer şekilde yatay kanatçıklı model aşağı yönlü -15° ile -30° açılı kanatçık içeren modeller ile karşılaştırıldığında açılı kanatçıklı yapılar ergiyen FDM miktarının aynı ergime süresi için %5,2 oranında daha fazla olmasını sağlamıştır. Yapılan sayısal çalışmalarda farklı uzunluklardaki kanatçıklar ile de modelleme yapılmıştır. Tüm sayısal çalışma sonucunda aşağı yönlü -15° açılıya sahip ve en uzun kanatçık içeren model en kısa ergime süresine sahip olmuştur. Yapılan çalışma ile en düşük ısı kaybı ile en hızlı ergimenin nasıl sağlanabileceği belirlenmiştir [89].

Zhao ve diğerkleri, alttan izotermal bir şekilde ısıtılan ve diğerk duvarları yalıtılmış olan bir dikdörtgen kutuda bulunan FDM'nin (laurik asit) ergime davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Sabit bir kanat hacmi yüzdesi (%5) öncülüğünde, sabit bir kanat uzunluğu altında kanat aralığının etkisi alüminyum ve paslanmaz çelik olmak üzere iki farklı kanat malzemesi için sayısal olarak incelenmiştir. Daha sonra sabit kanat aralıkları ile belirlenen kanat malzemesi için kanat uzunluğu optimizasyonları da yapılmıştır. 25 mm'lik kanat uzunluğu için, optimum kanat aralığı kanat malzemesinden bağımsız olarak yaklaşık 7,5-10 mm ve 6,75-9 mm olarak bulunmuştur. Bunun yanında 10 mm'lik optimize dilmiş kanat aralığı için en iyi kanat uzunluğu alüminyum malzeme için 50 mm iken paslanmaz çelik malzeme için 31,25 mm olarak hesaplanmıştır. Optimum kanat uzunluğu açıkça kanat malzemesinin bir fonksiyonu olarak ele alınması gerekmektedirken yapılan bu çalışmada kullanılan malzemeler için eğilimler farklılık göstermiştir. Seyrek kanat dağılımı için, kanat aralığı arttığında, alüminyum kanatçıklar için optimum kanat uzunluğu artarken, aynı koşul altında paslanmaz çelik kanatçık için tam tersi yaklaşım ortaya çıkmıştır. Örneğin, 40 mm kanat aralığı ile alüminyum için en uygun kanat uzunluğu 43,75 mm ve paslanmaz çelik için 50 mm'dir. Bu ilgi çekici davranışı daha iyi anlamak için paralel olarak teorik bir analiz yapılmıştır. Kanat uzunluğu, kanat etkin uzunluk teorisi kullanılarak optimize edilirken, iki dikey kanatçık arasında oluşan ısıl olarak katmanlı bölgenin boyutunu en aza indirerek, ölçek

analizine dayalı olarak kanat aralığı için optimal değer aranmıştır. Çok kısa kanatçıklar veya uzun depolar için ve ayrıca optimum tank yüksekliği için de bir kriter belirlenmiştir [90].

Javidan ve diğerleri, yaptıkları sayısal çalışmada, FDM'lerin (RT24) kaldırma kuvveti ve viskozitesinin etkileri dikkate alınarak şeffaf iç duvarlı bir boşluk üzerindeki taşınım ve ısı transferi mekanizmalarını incelemişlerdir. Bu amaçla, hesaplamalarda yüksek doğruluğa sahip HAD yöntemi kullanılmıştır. Söz konusu duvar, içinde FDM'leri içeren boşluğun bulunduğu ve duvar üzerine çimento ve sıva katmanlarının yerleştirildiği tuğladan yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ısı akısının arttırılmasının taşınım ile ısı transferinin etkilerini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca ısı transferi uygulanarak parafin malzemelerin ergime süreci %31 oranında hızlanmıştır. Boşluğun iç duvarlarının şeffaflığından dolayı, ısı transferi yüzeyden yüzeye meydana gelmiştir. Bu nedenle ergimiş malzeme miktarı arttıkça ısı transferi etkileri artmıştır. Bunun nedeni RT24 malzemesinin sıvı halde katı malzemeye göre daha şeffaf olmasından kaynaklanmıştır. Ayrıca, ısı akısının 50 W/m^2 'den 100 W/m^2 'ye ve 300 W/m^2 'ye yükseltilmesi, ergime hızının sırasıyla %19.3 ve %27,2 artmasını sağlamıştır [91].

Masoumpour-Samakoush ve diğerleri, dikdörtgen ve üçgen kanatların birleşiminden oluşan yeni bir alüminyum kanatçık kullanarak dikdörtgen bir depodaki FDM'nin ergime sürecini sayısal olarak incelemişlerdir. Deponun sol duvarının, FDM'nin ergime sıcaklığından daha yüksek bir sabit sıcaklıkta olduğu varsayılmıştır. İç kanatların şeması, üçgen kanatların yüksekliği, sıcak duvar sıcaklığı ve doğal wax 811, RT42 ve n-eicosane gibi farklı FDM'ler gibi çeşitli parametrelerin ergime işlemi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. İncelenen çeşitli kanat geometrileri arasında, iki yatay dikdörtgen kanadın alt ve üst yüzeylerinde üçer toplamda 6 kanat olacak şekilde kullanılmasıyla ergime miktarı yaklaşık %57,56 oranında artmıştır. Kanat sayısı arttıkça ergime süresi azalmakta ve böylece daha yüksek enerji depolama hızına ulaşılmıştır. Farklı yüksekliklerde (artan veya azalan) üçgen kanatçıkların düzenlenmesiyle ergime süresi daha da kısaltılabilmektedir. Sıcak duvarın sıcaklığının, ergime süresi ile ters orantılı olduğu bulunmuştur. Yani sıcak duvar sıcaklığı ne kadar yüksekse, ergime süresi o kadar kısa olmuştur. Karşılaştırılan FDM'lerden doğal wax 811, daha düşük ergime süresi ve belirli bir süre içinde daha yüksek depolanan enerji ile daha iyi ısı performans göstermiştir [92].

Oliveski ve diğerleri, yaptıkları çalışmada dikdörtgen bir boşlukta bulunan bir FDM'nin (laurik asit) ergime ve katılma sürecinde, ısı iletkenliğini geliştirmek için kullanılan kanatçığın kanat en-boy oranı ve kanat konumlandırmasının etkisini ve bunların kümülatif etkilerini sıralı koşullar altında sayısal olarak analiz etmeyi amaçlamışlardır. En-boy oranları, aynı miktarda FDM kütlesini yani aynı ısı kapasitesini korumak için değiştirilmiştir. Sayısal analizler, enerji depolama ve geri kazanım koşulları için ayrı ayrı ve sırayla yapılmıştır. 4 farklı kanat en-boy oranı ve 3 farklı kanat konumu dikkate alınarak 24 farklı model oluşturulmuştur. Kanatçık, boşluğun alt kısmında yer aldığı zaman en yüksek en-boy oranına sahip olan model en düşük en-boy oranına sahip olan modelden %16 oranında daha yüksek ergime hızı göstermiştir. Benzer şekilde aynı kanatçık konumu için yüksek en-boy oranlı model düşük en-boy oranlı modelden %15 daha yüksek katılma hızına sahip olmuştur. Dikdörtgen boşluğun en altında bulunan kanatçık modelleri en üst konumda bulunan kanatçık modellerinden %16 ile %21 arasında daha fazla ergime göstermişlerdir. Ergimiş FDM'nin katılma miktarı dikdörtgen hacmin %90'nına ulaşana kadar kanatçık konumundan bağımsız şekilde ilerlemektedir. Bu değerden sonra kanatçık konumunun etkisi belirginleşmektedir. Yapılan çalışmada aynı FDM kütlesine ve kanat dizilimine sahip modeldeki FDM'nin tamamının katılma süresi ergime süresinden 6,4 kat daha yüksek bulunmuştur [93].

Laouer ve diğerleri, soğuk enerji depolama sisteminin modeli olarak eğimli bir dikdörtgen muhafaza içinde FDM'nin (su) ergime sürecini iyileştirmek için kanatçıklar ve hibrit nanoparçacık (Cu ve Al_2O_3) ekleyerek iki ısı transferi geliştirme tekniğinin potansiyelini sayısal olarak inceleme çalışmışlardır. FDM'nin faz değişimi ve ısı transferi, daha önce deneysel ve sayısal sonuçlarla doğrulanmış ve literatüre sunulmuş Kafes Boltzmann Metodu'na dayalı yerleşik bir kod kullanılarak modellenmiştir. Ergime süresindeki iyileştirme etkisi, kanat sayısı, kanat uzunluğu oranı (W/H) ve nanoparçacık hacim oranı gibi ana parametreler aracılığıyla araştırılmıştır. Isı transferi ve akışkan akışı, sıvı FDM kesri, ergime cephesinin geçici gelişimi, tam ergime için gereken süre ve ısı enerji depolaması detaylı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, W/H değeri 0,75 olan kanat uzunluğu oranı için ergime hızının, W/H değeri 0,25'e kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ayrıca, nanoparçacık yüklemesi ergime hızını daha da artırmıştır. En yüksek ergime hızı, tam ergime süresinde %33,5'lik bir düşüş ile 3 kanatçık ve hacimce %6 nanoparçacık konsantrasyonu içeren modelden elde edilmiştir. Kanat

uzunluğu oranını artırmak, depolanan ısı enerji miktarını artırmış ve ergime süresini %64 oranına kadar kısaltmıştır [94].

Sharifi ve diğerleri, içten bakır kanatlı dikdörtgen bir metal muhafaza içine yerleştirilmiş bir FDM'nin (octadecane) ergimesini incelemek için sayısal bir model geliştirmişlerdir. Faz değişimi için sıcaklık dönüştürme modelini kullanan sonlu bir hacim yaklaşımı, boşluk duvarları ve kanatlarındaki ve ayrıca ergimiş FDM içindeki eşlenik ısı transferini tahmin etmek için kullanılmıştır. Kanat sayısının, kanat uzunluğunun, kanat kalınlığının ve sıcak duvar sıcaklığının ergime süreci üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Yatay kanatçıklarda, faz değişiminin ilk aşamalarında hızlı ergime meydana gelmiş ve sonrasında ikincil yavaş ergime rejimi gözlemlenmiştir. Her iki ergime rejimi sırasında ergime oranlarını hızlı bir şekilde tahmin etmek için kullanılabilecek analitik regresyon denklemleri geliştirilmiş ve elde edilen regresyon tahminlerinin ayrıntılı modelin tahminleriyle iyi bir uyum içinde olduğu açıklanmıştır [95].

Biwole ve diğerleri, dikdörtgen bir IED ünitesi içerisindeki bulunan FDM'nin ısı iletkenliği iyileştirmek için kullanılan kanatçıkların sayı, boyut ve konumlarının optimizasyonunu yaparak FDM'nin katı-sıvı faz değişimi ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Modellenen tüm tasarımlarda toplam kanat kütlesi ve FDM kütlesi sabit tutularak, kanatlar yerleştirildiği sol dikey duvar 3 saat boyunca 1000 W/m^2 sabit ısı akısına maruz bırakılmıştır. FDM'deki ısı difüzyon denklemi eşdeğer ısı kapasitesi yöntemini kullanırken, FDM deposundaki doğal taşınım tahrikli FDM, Navier-Stokes momentumun korunumu denklemindeki değiştirilmiş bir viskozite ve ek bir hacim kuvveti terimi kullanan kaldırma kuvveti aracılığıyla modellenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kanatçık sayısının arttırılması, faz değişimi sırasında hem denge sıcaklığını hem de ön plakanın dengelenmesini azaltmış ve FDM'de enerjinin duyulur ve gizli formda depolanma süresini ve miktarını hızlandırmıştır. Daha ince fakat daha uzun kanatların kullanılması, kanat uzunluğu arttıkça dengelenme süresinin de artması dışında aynı etkiyi göstermiştir. Ayrıca, sabit kanat kütlesinde, değişen kanat aralığı, gizli ısı depolama performansı ve sıcak plakanın sıcaklık dengelenmesi üzerinde sıra dışı bir etki göstermiştir. Bunun yanında yüzey alanının, ön plaka ile FDM arasındaki ısı transfer hızının artmasında en büyük rolü oynadığı, daha güçlü doğal taşınımı teşvik edebilen konfigürasyonların daha yüksek ısı akışına yol açtığı ifade edilmiştir. Son olarak, ergime sırasında arka plakaya daha kolay ısı transferi sağlayan sistemlerin daha yüksek oranda duyulur ısının gizli ısıya göre FDM içerisine aktarıldığını;

kanat sayısı veya kanatçıklar arasındaki boşluk arttıkça da ön plaka sıcaklığının standart sapmasının azaldığını belirtmişlerdir [96].

Yukarıda verilen literatür incelemesinde FDM'lerin düşük ısı iletkenliğini geliştirmek için kanatçık kullanılmasının önemi belirtilmeye çalışılmıştır. Dikdörtgen bir hazne içerisinde dikey veya yatay olarak yönlendirilen açılı veya düz konumdaki kanatçıkların performanslarını incelemek için tekrar eden şartlar altında çok sayıda deneysel veya sayısal çalışma yapılmalıdır. Deney maliyetlerinden ve zamandan tasarruf etmek için günümüz şartlarında tüm deneyleri gerçekleştirmek yerine belirli sayıda deney yaparak diğer deney dizilimlerini tahmin eden optimizasyon tekniklerinin kullanımı önem kazanmıştır. Buradan hareketle, Taguchi deney tasarımı, Tepki yüzey metodu (TYM), Gri ilişkisel analiz (GİA) ve daha birçok farklı optimizasyon tekniği değişik araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Örnek olarak verilen optimizasyon tekniklerinden GİA metodu, istenilen sonuca ulaşmak için kurulan sistemdeki birden fazla faktör ve değişken arasındaki ilişkiyi tek seferde belirleme imkânı sağlamaktadır [97-102]. Çoğu optimizasyon tekniğinde performans parametrelerinden birinin iyileştirilmesi bazen diğerinin dezavantajlı duruma dönüşmesine sebep olabilmektedir. GİA yönteminin en büyük faydası hem eksik bilgilerin hem de belirsiz problemlerin çok doğru şekilde üstesinden gelebilmesidir [97, 103]. Özellikle yetersiz veya az sayıda verinin olduğu optimizasyon işleminde en efektif analiz metodu GİA olarak karşımıza çıkmaktadır [103]. GİA yöntemi ile birden çok parametrenin optimizasyonunun yapıldığı literatür çalışmalarından bazıları aşağıda verilmiştir.

Moran ve diğerleri, yaptıkları çalışma ile farklı biyokütle yakıtlarının küçük kazanlarda yakılmasının çevresel ve ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesi için yeni bir yöntem sunmuşlardır. Çalışma, temel birlikte yakma ürünü olarak peletlere ve tamamlayıcı ürün olarak orman kalıntılarına odaklanmıştır. Orman kalıntılarının birlikte yakılması ekonomik olarak verimli olsa da, yakıt karışımındaki orman kalıntılarının varlığından kaynaklanan performans ve zararlı emisyonlar açısından kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Farklı enerji ve emisyon değişkenlerinin ve ayrıca orman kalıntısı fiyatlarının GİA'sı, gri ilişkisel derece (GİD) olarak adlandırılan yeni bir tek değişkenin tanımlanmasına imkân sağlamıştır. Böylece, karmaşık çoklu yanıtların değerlendirilmesi ve optimizasyonu, standartlaştırılmış tek bir değişkenin optimizasyonuna dönüştürülebilmektedir. Farklı orman kalıntılarının GİA yöntemi aracılığıyla yapılan deneysel analizler, küçük pelet kazanlarında yakıt maliyetlerini

düşürmenin, performansı ve emisyonları ortalama standartlarda tutmanın bir yolu olarak çam kabuğunun odun peletleriyle birlikte yakılması olasılığını meydana çıkarmıştır [97].

Manivannan ve diğerleri, Taguchi deney tasarımı tabanlı GİA yöntemi kullanarak düz plakalı ısı alıcının çok amaçlı optimizasyonu için bir yaklaşım sunmuşlardır. İncelenen sonuç parametreleri elektromanyetik yayılan radyasyon, ısı direnç, ortalama ısı transfer katsayısı, basınç düşüşü ve düz plakalı ısı alıcının kütlesi olarak belirlenmiştir. Bu parametreler tasarlanan en iyi ısı alıcı tasarımını bulmak için araştırmacılar tarafından belirlenmiştir. Isı alıcı sayısal olarak bir bilgisayar programında tasarlanmış ve yayılan radyasyonun değeri simülasyon ile elde edilmiştir. Aynı ısı alıcı, ısı direnci, basınç düşüşünü ve ortalama ısı transfer katsayısını bulmak için Flotherm V7,2 yazılımı kullanılarak da modellenmiştir. Isı alıcıdan yayılan radyasyon miktarını ve ısı alıcının ısı direncini hesaplayabilmek için deneysel inceleme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca elde edilen deneysel bulgular ile simüle edilen model arasındaki uyum karşılaştırılarak simülasyon modelinin doğruluğu onaylanmıştır. Taguchi deney tasarımı yöntemi ile oluşturulan 6 faktörlü ve 3 seviyeli L_{27} ortogonal deney dizilimi kullanılarak simülasyon çalışmasına devam edilmiştir. Optimizasyon için ısı alıcının uzunluğu ve genişliği, ısı alıcıda bulunan kanatların yüksekliği, taban yüksekliği, kanat sayısı ve kanat kalınlığı faktörleri dikkate alınmıştır. Çok amaçlı optimizasyon problemi daha sonra GİA yöntemi kullanılarak tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürülmüş ve ısı alıcı geometrisinin optimum tasarım kriterleri elde edilmiştir. Ayrıca ANOVA analizi ile elde edilen optimum tasarımdaki her bir faktörün sonuca etkisi hesaplanmıştır [98].

Sreenivasulu ve SrinivasaRao, Al6061 alaşımının yüksek hız çeliği burgulu matkaplarla delinmesinde delme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve yuvarlaklık hatası üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ayrıca, Taguchi-GİA yöntemini kullanılarak delik kalitesi için optimal kontrol faktörleri belirlenmiştir. Kontrol faktörleri olarak kesme hızı, ilerleme hızı, matkap çapı, uç açısı ve kesme sıvısı karışım oranı dikkate alınmış ve deneysel denemeler için L_{18} (3×5) ortogonal dizilim belirlenmiştir. Deney tasarımı ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve yuvarlaklık hatasını en aza indirmek için GİA kullanılmıştır. 25,13 m/dk kesme hızı ve 0,3 mm/dev ilerleme hızı, 10 mm matkap çapı, 110° uç açısı ve %12 kesme sıvısı karışım oranında işlenmiş matkaplar ile minimum yüzey pürüzlülüğü ve yuvarlaklık hatası elde edilmiştir. Doğrulama deneyleri, GİA yönteminin Al6061 alaşımının delinmesinde delme parametrelerini hassas bir şekilde optimize ettiğini göstermiştir [99].

Kumbhar ve Sane, düzenli aralıklarla bükülmüş bantlara sahip bir çukur tüpte ısı transferi ve sürtünme faktörü analizi üzerine sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışma kapsamında inceledikleri performans parametreleri, çukurlu boru ve bükümlü bant aralığı ile ilgili çukur derinliği ve çukur aralığı ve düzenli boşluklu bükülü bantlarla ilgili bükülü bant ayırıcı uzunluğu dikkate alınmıştır. Isı transferi ve sürtünme faktöründen oluşan çok amaçlı optimizasyon sürecini gerçekleştirebilmek için GİA yöntemi burada kullanılmıştır. Isı transferi ve sürtünme faktörü üzerindeki en önemli etkiler, ısı transferinin gerçekleştiği boru üzerinde bulunan çukur aralığı ve bükümlü bant aralığının değişimi olarak araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir [100].

Acır ve diğerleri, GİA yöntemi kullanarak yeni tasarladıkları havalı güneş kolektörünün enerji ve ekserjisini etkileyen optimum parametreleri belirlemeye çalışmışlardır. Kolektörde kullanılan farklı engel mesafesinin (L), engel boşluk açısının (α) ve Reynolds sayısının (Re) değişiminin enerji ve ekserji verimleri üzerine olan etkisi araştırmacılar tarafından araştırılmıştır. Deneyler L_9 ortogonal deney dizilimi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve en optimal tasarım faktörü seviyesini sağlayan en düşük L ve α ile en yüksek Re sayısı için GİA yöntemiyle optimizasyon işlemi yapılmıştır. ANOVA analizi ilze parametrelerin katkı oranları hesaplanmıştır. Yapılan doğrulama deneyleri ile deneysel çalışmadan ve optimizasyon işlemi sonucu elde edilen verilerin kullanılması ile yapılan regresyon analizi sonuçlarının uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır [101].

Seo ve diğerleri, eğik kanatlı sıcak ısı değiştiricili termoelektrik jeneratör sisteminin ısı ve elektriksel performanslarını optimize etmek için gri ilişkisel tabanlı Taguchi analizini kullanmışlardır. Eğimli kanatlı sıcak ısı değiştiricili termoelektrik jeneratör sisteminin gri ilişkisel tabanlı Taguchi analizi için öncelikle deneysel bir çalışma yapılmıştır. Daha sonra elde edilen bulgular dikkate alınarak farklı çalışma şartları için sayısal yaklaşım dikkate alınmıştır. Düz kanatlı sıcak ısı değiştiricili termoelektrik jeneratör sisteminin ısı ve elektriksel performansı yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonuçları ile karşılaştırılmış ve elde edilen sayısal model sonuçları ile deneysel bulgular arasında %6'lık bir fark bulunarak doğruluğu kanıtlanmıştır. Eğik kanatlı sıcak ısı değiştiricili termoelektrik jeneratör sisteminde bulunan sıcak gazın giriş kütleli debisi (M), sıcak gaz giriş sıcaklığı (T), tasarım (D) ve kanatlar arasındaki boşluk (G) faktörlerinden oluşan üç adet L_{16} ortogonal dizisi, gri ilişkisel tabanlı Taguchi analizi için etkili faktörler olarak kabul edilmiştir. L_{16} ortogonal dizilerinden ilki kullanılarak termoelektrik jeneratör sisteminin ısı performansını oluşturan

sıcaklık farkı ve basınç düşüşü ifadeleri gri ilişkisel tabanlı Taguchi analizi ile optimize edilmiştir. İkinci ortogonal dizi ile termoelektrik jeneratör sisteminin elektriksel performansını oluşturan güç ve dönüşüm verimliliği ifadeleri optimize edilmiştir. Son ortogonal dizi ile de birleştirilmiş ısı-elektrik performansını ifade eden net enerji verimliliği ve net ekserji verimliliği değişkenleri optimize edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda çeşitli faktörlerin azalan etki sıralaması, ısı performanslar için $M > G > T > D$ ve elektrik ve birleşik ısı-elektrik performanslar için $T > M > G > D$ olarak bulunmuştur. Gri ilişkisel tabanlı Taguchi analizi ile dört faktörün optimum kombinasyonu, $99,72^{\circ}\text{C}$ 'lik en yüksek sıcaklık farkını, $0,175\text{ kPa}$ 'lık en düşük basınç düşüşünü, $45,65\text{ W}$ 'lık en yüksek maksimum gücü, $\%4,543$ 'lük en yüksek maksimum dönüşüm verimini, $\%2,316$ 'lık en yüksek net enerji verimini ve $\%2,418$ 'lik en yüksek net ekserji verimini sağlamıştır [102].

Wu ve diğerleri, yapmış oldukları deneysel çalışmada bina yapılarında gizli ısı formunda enerji depolayabilmek için yapı malzemesi içerisine parafin eklemişlerdir. Bu amaçla GID malzemesi olarak parafin, adsorpsiyon matrisi olarak farklı tanecik boyutu dağılımına sahip gözenekli seramik iskelet ve reaksiyon malzemesi olarak sodyum aljinat ile karıştırılarak hazırlanan güç depolama kompoziti ile alçıtaşı birleştirilerek FDM alçı levhalar hazırlanmıştır. Güç depolamalı gözenekli seramsitin tanecik boyutu dağılımı, dijital kamera ve görüntü işleme yazılımı kullanılarak elde edilmiş ve FDM alçı levhaların iletkenlik faktörü ısı test cihazı ile ölçülmüştür. Partikül boyutu dağılımının FDM alçı levhaların iletkenlik özelliği üzerindeki etkisini araştırmak için yönlendirilmiş GİA yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda 0 ila $3,0\text{ mm}$ arasında değişen boyutlara sahip gözenekli seramsitin FDM alçı levhanın iletkenlik özelliğini biraz artırabileceği bulunmuştur. Bunun yanında $3,0$ ile $14,0\text{ mm}$ arasında değişen gözenekli seramsitin, özellikle $3,0$ ile $4,0\text{ mm}$ arasında değişen boyut aralığı, FDM alçı levhanın iletkenlik özelliğini açıkça zayıflatabileceğini göstermiştir [103].

Hu ve diğerleri, yaptıkları çalışma ile farklı çalışma koşulları altında derin eş ekseneli sondaj ısı eşanjörlerinin çıkış kapasitesindeki (yani çıkış gücündeki) tahmin farklılıkları üzerindeki özellik değişimlerinin etkilerini anlamayı amaçlamışlardır. Bu özellikler, suyun ve rezervuar kayanın özgül ısı ve ısı iletkenliğinin yanı sıra sıvının yoğunluğu ve dinamik viskozitesi olarak ele alınmıştır. Özellik değişimlerinin ısı taşınımı, ısı iletimi ve ısı eşanjörünün tahmin edilen çıkış kapasitesi üzerindeki etkilerini ölçmek için sayısal simülasyon ve GİA birleştirilmiştir. Sayısal benzetim sonuçları, suyun ortalama taşınım ısı transfer katsayısının

azaldığını, ancak jeotermal enerjinin çıkarılmasıyla kayanın ortalama ısı yayılımının arttığını göstermiştir. Bu değişiklikler ayrıca çıktı kapasitesinin aşırı tahmin edilmesine yol açmaktadır. GİA, akış hızı ve kuyu derinliğinin aşırı tahmine neden olan başlıca faktörler olduğunu ortaya koymuştur. Aşırı tahmin, enjeksiyon akış hızının ve kuyu derinliğinin artmasıyla artmıştır. Ayrıca elde edilen bulgular, özgül ısı değişkenliğinin ve suyun dinamik viskozitesinin, tahmin edilen çıktı kapasitesinde bir tutarsızlığa neden olan en önemli iki faktör olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışma ile derin eşeksenli sondaj kuyusu ısı eşanjörlerinin sayısal olarak modellenmiş çıktı kapasitesinin daha pratik bir tahmini için özellik değişimlerinin dikkate alınmasındaki önemi vurgulamıştır [104].

Kazemian ve diğerleri, aynı anda hem elektriksel güç hem de sıcak su üretiminin meydana getirildiği seri bağlanmış bir FV/T panel ile sulu güneş kolektörünün sayısal olarak performans incelemesini yapmışlardır. Bu yeni bileşik sistemin performansını değerlendirebilmek için, FV panel, düz plakalı sulu güneş kolektörü, FV/T panel ve FV/T-düz plakalı sulu güneş kolektöründen oluşan bileşik sistem dâhil olmak üzere dört sistemin performansı, zamana bağlı üç boyutlu sayısal bir model kullanılarak karşılaştırılmıştır. Farklı çalışma koşullarının bileşik tasarımın güç çıkışları üzerindeki etkisini incelemek için parametrik bir analiz de araştırmacılar tarafından yapılmıştır. Ayrıca, optimum değerleri ve çalışma koşullarının katkısını göstermek için Taguchi tabanlı GİA yöntemi kullanılmıştır. Taguchi tabanlı GİA işlemi sonucunda optimum değerler sırasıyla iş akışkanının kütledebisi için 50 kg/h, güneş radyasyonu için 1000 W/m², soğutucu giriş sıcaklığı için 24°C, ortam sıcaklığı için 28°C ve rüzgâr hızı için 1 m/s olarak hesaplanmıştır [105].

Wang ve diğerleri, FV panelin performansını iyileştirmek için, FV paneli FDM (n-hexadecane) ve havalandırma sistemiyle entegre ederek yeni bir FV panel soğutma stratejisi üzerinde karşılaştırmalı sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Bir tarafta sabit ısı akısı ve diğer tarafta hava akışı olan eğimli bir boşlukta ergimiş FDM'nin ısı transferi özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Boyutsuz sıcaklık ve sıcaklık homojenliğini içeren ısı performans, yerel Nu sayısı ve ortalama Nu sayısı dâhil olmak üzere ısı transferi kapasitesi karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Akış sınırının FV panelin soğutulması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sayısal çalışma sonucunda bulunmuştur. Yukarıdan aşağıya akış yönündeki dikdörtgen boşluk daha iyi sıcaklık homojenliği göstermektedir. Ayrıca aşağıdan yukarı akış yönünde FDM deposu daha fazla ısı transferi kapasitesine sahiptir. Artan Re sayısı, ısı transferi verimliliğini artırarak FV panel in yüzey sıcaklığını düşürmektedir.

Ayrıca, her bir faktörün ısı transferi mekanizması üzerindeki etkisi, GİA'ya dayalı olarak nicelleştirilmiştir. Ortalama Nu sayısı için gri ilişki derecesi, (GİD) 0,51, 0,66, 0,69, 0,62 ve 0,53 olarak sırasıyla Ra sayısı, Re sayısı, en-boy oranı (ergiyik FDM'nin genişlik ve yüksekliği), depo eğim açısı ve akış yönü için hesaplanmıştır. Yapılan GİA sonucunda ısı transferi kapasitesini etkileyen en önemli faktörün en-boy oranı (ergiyik FDM'nin genişlik ve yüksekliği) olduğu bulunmuştur. Onu Re sayısı, eğim açısı, akış yönü ve Ra sayısı takip etmiştir [106].

Tiwari ve Sharma, GİA ile birleştirilmiş Taguchi yöntemini, metal hidrit reaktörün içine gömülü sarmal borulu ısı eşanjörü için IED amacıyla uygulamışlardır. Metal hidrit reaktörde bulunan sarmal borulu ısı eşanjörünün tasarım faktörleri olan sarmal boru çapı (d_h), sarmal boru ana çapı (d_m), sarmal boru dönüş sayısı (N) ve ısı transfer akışkan hızı (V_f) ifadeleri GİA ve Taguchi yönteminin beraber kullanılmasıyla optimize edilmiştir. Bu parametreler, maksimum reaksiyon kesri (C_o) ve ısı transferi akışkanının maksimum çıkış sıcaklığını (T_o) elde etmek için optimize edilmiştir. Taguchi ve GİA için kullanılan ortogonal dizideki tüm deneylerin performansı, ticari yazılım olan COMSOL 5.3a kullanılarak gerçekleştirilen üç boyutlu sayısal modellemeler vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Kullanılan bu optimizasyon yöntemi aracılığıyla geleneksel parametrik çalışmaya kıyasla gerekli olan deneylerin sayısı %90 oranında azaltılarak 81'den 9'a düşürülmüştür. Böylece zamandan ve iş yükünden tasarruf edilerek verimli bir çalışma ortamı sağlanmıştır. Ayrıca, izlenen optimizasyon yönteminin bir diğer avantajı, tüm amaç fonksiyonlarının (C_o , T_o) aynı anda göz önünde bulundurularak parametrelerin optimize edilmiş bir seviyesinin tahmin edilmesini sağlamasıdır. Yapılan çalışma sonucunda, C_o ve T_o gibi amaç parametreleri dikkate alınarak optimal olarak tasarlanmış sistemlerin performansı tüm ortogonal dizi deneyleri ile karşılaştırılarak optimize edilmiş sistem tasarımlarının diğer ortogonal dizi deneylerine göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir [107].

Dwivedi ve diğerleri, yaptıkları bu çalışma ile çoklu öznitelik karar verme araçlarına dayalı, nanoparçacıkların seçimi için sistematik bir çerçeve sunmayı amaçlamışlardır. Hem GİA hem de TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) metodolojilerinin avantajlarını birleştiren hibrit bir GİA-TOPSIS yöntemi araştırmacılar tarafından önerilmiş ve çeşitli objektif ve subjektif kriter ağırlıklarının etkisi altında farklı alternatiflerin değerlendirilmesi, karşılaştırılması ve sıralanması için bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Objektif ağırlıkları belirlemek için kriterler arası korelasyon ve entropi

ağırlıklandırma yöntemleri ile kriterlerin önemi kullanılırken, subjektif ağırlıklar analitik hiyerarşi süreci kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, öznelitliklerin çeşitli nesnel ve öznel ağırlıklarını birleştiren genelleştirilmiş bir ağırlık entegrasyon formülü araştırmacılar tarafından sunulmaya çalışılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, Al_2O_3 nanoparçacıklarının en kabul edilebilir alternatif olduğu ifade edilmiştir. Gerçekleştirilen duyarlılık analizi, benimsenen karar çerçevesinin sağlamlığını ve uygulanabilirliğini kanıtlamıştır [108].

Çinici ve diğerleri, Taguchi tabanlı GİA yöntemi kullanarak laboratuvar şartlarında üretilen güneş enerjisinin FDM (parafin wax) kullanılarak depolanmasına etki eden farklı parametrelerin optimizasyonunu yapmışlardır. Yapılan çalışmada FDM'nin düşük ısı iletim katsayısını iyileştirmek için FDM'nin depolandığı hacim içerisine yay tipi ısı transferi arttırıcı (YTITA) eklenmiştir. Yayın tel çapı, yay çapı ve yay adımının (hatvesinin) değişiminin FDM'nin ergime süresi ve zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİO) performansı üzerine olan etkisi optimize edilerek en uygun deney dizilimi bulunmaya çalışılmıştır. L_9 (3 faktörx3 seviye) ortogonal Taguchi deney tasarımı dizilimi dikkate alınarak gerekli deney sayısı azaltılmıştır. Ortogonal dizi kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar, GİA yöntemi kullanılarak tek amaçlı probleme dönüştürülmüştür. Tel çapının ve yay adımının en yüksek olduğu ve yay çapının en düşük olduğu deney dizilimi optimum dizilim olarak bulunmuştur. Ergime süresi ve ZBİO değerine etki eden faktörlerin katkı oranları ANOVA analizi ile bulunmuştur. Regresyon analizi kullanılarak ergime süresi ve ZBİO ifadelerini tasarım parametrelerine bağlı olarak hesaplamaya imkân sağlayan denklemler türetilmiştir. Son olarak yapılan doğrulama deneyleri ile regresyon denklemlerinin deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu ve kabul edilebilir hata sınırları içerisinde kaldığı bulunmuştur [109].

Zhang ve diğerleri, kompozit FDM'ye dayalı batarya ısı yönetim sistemi (BIYS) üzerindeki mekanik titreşimin etkisine odaklanmışlardır. Saf parafin ve 2-4 mm titreşim genlikleri ve 10-30 Hz titreşim frekansları altında kütlece %0 ile %20 oranında genişletilmiş grafit veya grafen içeren üç kompozit FDM'ye dayalı BIYS'nin bir dizi deneyi çalışma kapsamında araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda küçük titreşim genliğinin, kompozit FDM'nin ısı transferini güçlendirmede ve bataryanın çalışma sıcaklığını düşürmede faydalı olduğunu bulunmuştur. Ayrıca, mekanik titreşim, kompozit FDM'de yüksek ısı iletkenliğe sahip parçacıkların dağılmasını ve çarpışmasını hızlandırabilme yeteneği göstermiştir. Böylece BTYS'nin ısı dağıtma verimliliği iyileştirilmiştir. Kompozit FDM'nin gizli ısı kullanım süresi yapılan uygulama ile önemli

ölçüde uzatılabilmekte ve ardından batarya takımının uygun çalışma sıcaklık aralığındaki süresi artırılabilmiştir. Çok yüksek veya çok düşük titreşim frekansı, ısı transferini arttırmaya elverişli değildir. Bu çalışmada ele alınan üç kompozit FDM arasında %20 genleşmiş grafitli kompozit FDM en iyi soğutma etkisi, 20 Hz titreşim frekansı altında meydana gelmiştir. Çalışmanın son aşamasında, üç faktörün birleşik etkilerini araştırmak için GİA uygulanmıştır. Etki sıralaması büyükten küçüğe doğru olacak şekilde sırasıyla titreşim frekansı, kompozit FDM'nin bileşimi ve titreşim genliği olarak sıralanmıştır [110].

Yukarıda detaylı olarak verilen literatür çalışmaları incelendiğinde Taguchi deney tasarımı ve GİA metoduna, optimum sonuca zamandan ve maliyetlerden tasarruf ederek ulaşmak için farklı birçok uygulamada başvurulmaktadır. Literatür taraması yapılırken daha çok dikdörtgen hacim içerisinde bulunan FDM'nin düşük ısı iletkenliğini iyileştirmek için yatay, açılı veya dik olarak konumlandırılmış düz kanatçıkların kullanımının yaygın olduğu belirlenmiştir. Yapılan tez çalışması kapsamında ele alınan yay tipi ısı transferi arttırıcı (YTITA) kullanımı ile karşılaşılmamıştır. YTITA tasarımına sahip bir GIİED sisteminin enerji depolama performansının incelenmesi ve en uygun deney diziliminin elde edilmesi amacıyla bu tez çalışma yapılmıştır.

5. MATERYAL - METOT

Bu bölümde, dikdörtgen bir depo içerisinde bulunan FDM'nin düşük ısı iletkenliğini geliştirmek için bünyesine eklenen farklı parametrik özelliklerdeki bakır malzemeden imal edilmiş yay tipi ısı transferi arttırıcının (YTITA) enerji depolama performansı üzerine olan etkisinin, deneysel ve Taguchi tabanlı GİA yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına dönük teorik bilgiler verilmiştir.

5.1. Deney Sisteminin Tasarımı

Yay tipi ısı transferi arttırıcı (YTITA) içeren ve içermeyen gizli ısı ısı ısı enerji depolama (GIIED) ünitesi, yapay güneş ışınımı altında bir FDM'nin ergime ve enerji depolama performansını gözlemlemek için tasarlanmıştır. Bu amaçla üretilen deney düzeneği Resim. 5.1'de verilmiştir.



Resim 5.1. Deney düzeneği

Güneş ışıınının depolanması ile ilgili çalışmalar daha çok dış ortamda ve doğal güneş ışıınıını altında yapılmaktadır. Fakat bu uygulama çok zaman almaktadır. Ayrıca deneylerin tekrarlanabilmeleri güneş ışıınıını şiddetinin, dış ortam sıcaklığının ve rüzgarın esme hızının değişmesinden dolayı zordur. Her bir deney için aynı başlangıç şartları sağlanamamaktadır [111]. Bu olumsuz durumla karşılaşmamak için laboratuvar şartlarında üretilen yapay güneş ışıınıını vericiler bir başka ifade ile güneş simülatörleri kullanılarak deneyler yapılabilmektedir. Garg ve diğerleri [111] ve Codd ve diğerleri [112] tarafından tasarlanan güneş simülatörleri basit ve ucuz olması açısından güneş enerjisi çalışmalarına örnek olarak verilmiştir.

Deney düzeneği, GIIED ünitesi, ışıınıını kaynağı ve ölçülen parametrelerin kayıt edildiği veri kaydedici (datalogger) olmak üzere 3 ana parçadan oluşmaktadır. GIIED ünitesi içerisinde FDM olarak kullanılan parafin wax (P-1), YTITA, emici plaka ve ünite de depolanan ısı enerjisinin dış ortama yayılmasını engellemek için kullanılan ısı yalıtımı elemanları bulunmaktadır. GIIED ünitesi, yüksek ısı iletkenlik katsayısına sahip ve kalınlığı 1 mm olan bakırdan üretilmiştir. GIIED ünitesi boyutları 120x120x50 mm olarak belirlenmiştir. Emici plakanın boyutları ise 142x142x1 mm olarak belirlenmiştir. Emici plakanın GIIED ünitesinden daha büyük seçilmesi gelen ışıınıını miktarının yüksetilmesi amacıyla emici plaka ve depolama ünitesinin kalınlıkları 1 mm olarak belirlenmiştir. Emici plakanın üst kısmına gelen ışıınıını miktarının absorbe edilebilme yeteneğinin artırılması amacıyla emici plakanın üst kısmı mat siyah boya ile boyanmıştır. Emici plakanın üzerinde GIIED ünitesi içerisindeki sıcaklık dağılımını ölçmek için kullanılan ısı çiftlerinin geçebileceği genişlikte çapı 12 mm olan bir adet delik açılmıştır. Bunun yanında, depolama ünitesi içerisinde meydana gelebilecek FDM sızıntılarını önlemek için delik emici plaka üzerinde açılmıştır. Buradan geçen ısı çiftleri veri kaydediciye bağlanmıştır. Açılan deliğin bir başka amacı da GIIED ünitesi içerisine ergimiş haldeki FDM'nin eklenebilmesidir. Kullanılan bakırın termofiziksel özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Yay malzemesi ve GIIED ünitesi tasarımında kullanılan bakırın termo-fiziksel özellikleri [113]

Isıl iletkenlik (k , W/mK)	Yoğunluk (ρ , kg/m ³)	Özgöl ısı (c_p , kJ/kgK)	Isıl yayılım ($\alpha \times 10^{-7}$ m ² /s)
400	8954	0,383	1163,1

GIIED ünitesi içerisinde ısı transferi artırıcı olarak kullanılan YTITA'lar depolama ünitesi ve emici plaka gibi bakırdan imal edilmiştir. Çizelge 5.2'de çalışmada kullanılan deney faktörleri ve her bir faktörün seviyesi listelenmiştir. Üretilen yayların tel çapı (d , mm) 2, 5 ve 8 mm; yay çapı (D , mm) 20, 30 ve 40 mm; yay adımı (p , mm) 18, 24 ve 30 mm olacak şekilde seçilmiştir. Yayların boyu depolama ünitesinin derinliği ile aynı olacak şekilde 50 mm olarak belirlenmiştir. Yaylar GIIED ünitesi içerisinde sol köşegen boyunca eşit aralıklar ile sıralanmıştır (Bkz. Resim 5.2). Yapılan deneysel çalışmada Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz (GİA) yöntemi kullanıldığı için deney sayısı belirli oranda azaltılmıştır. Çalışmada kullanılan deney sayısı latin kare tasarımı dikkate alınarak 9 olarak belirlenmiştir. Bunun yanında bir adet de YTITA konulmamış boş GIIED ünitesindeki FDM'nin faz değişim performansı da ayrıca incelenmiştir.

Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan faktör ve her bir faktörün seviyesi

Sembol	Parametre	Seviyeler		
		1	2	3
A	Tel çapı (d , mm)	2	5	8
B	Yay çapı (D , mm)	20	30	40
C	Yay adımı (p , mm)	18	24	30



Resim 5.2. Farklı boyutlardaki deney dizilimleri

Tez çalışması kapsamında kullanılan YTITA'lar Resim 5.2'de detaylı şekilde verilmiştir. Emici plaka ile alt depo sıvı conta ile sızdırmaz bir şekilde montajlanmıştır. Bunun yanında GIİED ünitesinden dış ortama olan ısı geçişini engellemek için ısı iletim katsayısı 0,031 W/mK olan strafor köpük levhalar kullanılmıştır [114]. Depolama ünitesine, yan taraflarında 4 cm ve alt yüzeyinde 5 cm olacak şekilde ısı yalıtımı uygulanmıştır.

Çizelge 5.3. P-1 PW'nin termo-fiziksel özellikleri [115]

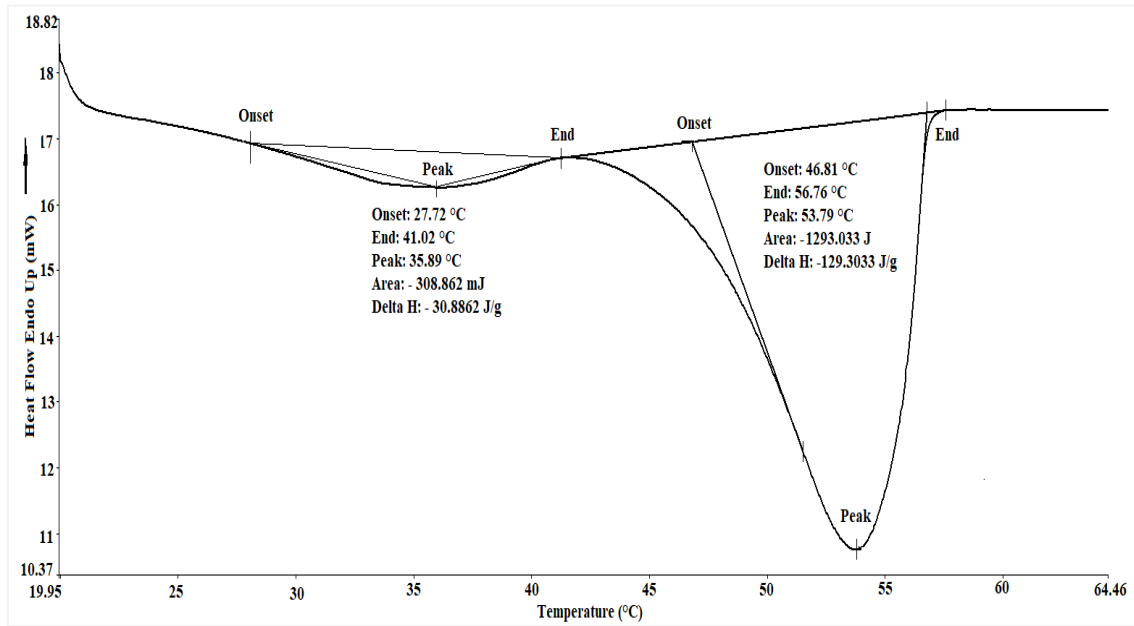
Ticari kod	P-1
Ergime (faz değiştirme) sıcaklığı, (°C)	52-54
Asitlik	Yok
25°C'deki penetrasyon, (100 g, 1/10 mm, maks.)	20-22
Yağ içeriği, (%kütlece, maks.)	2
Alevlenme sıcaklığı, (°C)	200'e yakın
Renk	Beyaz (Saybolt+26)
Özgül ısı*, (c_p , kJ/kgK) katı formda	0,85478
Özgül ısı*, (c_p , kJ/kgK) sıvı formda	2,66674
Isıl iletkenlik, (katı ve sıvı her iki faz için, W/mK)	0,2 [116]
Sıvı formdaki yoğunluk, (kg/l)	0,75
Sıvı formdaki yoğunluk, (kg/l)	0,85
Ergime gizli ısısı**, (kJ/kg)	160,1895
*DSC/TGA analizi ile hesaplanmıştır. **DSC analizi ile elde edilmiştir.	

Yapılan tez çalışması kapsamında kullanılan FDM, 52-54°C ergime derecesine sahip ticari bir parafin waxtır. Parafin wax (PW), AGS Parafin firmasından temin edilen P-1 üretim koduna sahiptir. PW, metaller üzerinde korozif etki göstermediği, enerji depolama ve geri kazanım döngülerinde uzun süre kimyasal olarak kararlı yapıda çalışabilmesinden ve kolay temin edilebilir özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir. FDM'nin termo-kimyasal özellikleri Çizelge 5.3'de listelenmiştir. Çizelge 5.3'de verilen FDM özelliklerinden ergime gizli ısısı değeri diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC, Differential Scanning Calorimeter) cihazı ile elde edilmiştir. Bunun yanında katı ve sıvı fazdaki FDM'nin özgül ısı değeri de modüle

edilmiş diferansiyel taramalı kalorimetri (MDSC, Modulated Differential Scanning Calorimetry) analizi ile bulunmuştur. MDSC analizi standart DSC analizinin elde edemediği sonuçları daha kapsamlı ulaşabilmek için tercih edilmiştir. Yapılan DSC ve MDSC analizleri farklı üniversitelerin bilimsel araştırma laboratuvarlarında yaptırılmıştır.

Ergime gizli ısı değeri elde etmek için PW, bir DSC cihazı içerisine 10 mg olacak şekilde konulmuştur. Daha sonra numune 2°C/dk kadarlık bir ısıtma hızıyla ısıtılmıştır. Isıtma işlemi 20°C'den başlayıp 65°C sıcaklığa kadar devam etmiştir. Satıcı tarafından verilen ergime sıcaklık aralığından daha yüksek bir maksimum sıcaklık seçilerek katı fazda bir PW numunesinin DSC cihazında bulunması engellenmiştir. Shokouhmand ve Kamkari [117] tarafından sunulan DSC elde ediliş yaklaşımı bu çalışmada referans alınmıştır. DSC analizi FDM'ye uygulanırken birden fazla sayıda ısıtma ve soğutma döngüsü altında kullanıldıktan sonra DSC analizi yapılarak ergime gizli ısı değeri hesaplanmasının daha uygun olacağı araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir [117]. Sunulan yaklaşımdan hareketle iki adet ısıtma ve soğutma deneyi yapılmış ve sonrasında DSC cihazına analize tabi tutulmuştur. Sıcaklığa ve ısı akışına bağlı olarak elde edilen DSC analiz sonucu Şekil 5.1'de verilmiştir. Şekil 5.1 incelendiğinde PW'nin dışarıdan ısı alarak endotermik bir şekilde faz değiştirdiği açıkça görülmektedir. Bunun yanında, DSC eğrisi dikkatli bir şekilde incelendiğinde ısıtmanın ilk başlarında 27,72°C ile 41,02°C sıcaklık aralığında ilk olarak bir faz değişimi meydana gelmiştir. Bunun yanında FDM firması tarafından beyan edilen ergime sıcaklık aralığında yaklaşık 46,81°C ile 56,76°C'de olmak üzere toplamda iki adet faz değişimi meydana gelmiştir. İkinci faz değişim aralığında elde edilen pik sıcaklık değeri 53,79°C olarak bulunmuştur. Firma tarafından verilen 52-54°C ergime derecesi ile DSC analizinden elde edilen ergime sıcaklıkları benzerlik göstermiştir. Ticari olarak satılan P-1'in saf PW olmadığı ve bir karışım olduğu böylece kanıtlanmıştır. Çünkü saf parafinlerin üretim ve satış maliyetlerinin yüksek olması karışım PW'ların piyasada tutunmasını sağlamıştır. Rudonja ve Komatina [118] tarafından gerçekleştirilen bir çalışma referans alınarak bu çalışmaya uygulanmış ve ilk faz değişim aşamasındaki malzemenin ergime gizli ısı, beklenen ergime sıcaklığındaki malzemenin ergime gizli ısı değerine eklenmiş ve sonuç olarak yapılan tez çalışması kapsamında kullanılan FDM'nin ergime gizli ısı değeri toplamda 160,1895 kJ/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin tamamı DSC cihazının arayüz programı kullanılarak hesaplanmıştır. DSC cihazının arayüz programı, ısı akışı ve sıcaklık değerlerine göre çizilen DSC eğrisinde görülen faz değişim eğrilerinin altında kalan alanı hesaplayarak, analizi yapılan FDM'nin ergime gizli ısının hesaplanmasını sağlamıştır.

GIIED ünitesine yerleştirilen YTITA'ların boyutları değiştikçe her bir deney sistemi içerisine eklenebilecek FDM miktarını azaltmakta veya arttırmaktadır. Bu değişim her bir sistemde benzer deneysel şartların sağlanamamasına neden olmaktadır. Bu durum daha detaylı olarak Kamkari ve Shokouhmand [23], Sharifi ve diğerleri [95] ve Shokouhmand ve Kamkari [117]'nin çalışmalarında açıklanmıştır. Bu nedenle herhangi bir olumsuzluk yaşanmaması için tez çalışması kapsamındaki tüm deneylerde aynı miktarda 0,5 kg PW kullanılmıştır. PW'nin katı ve sıvı fazdaki özgül ısı (c_p , kJ/kgK) değerleri MDSC analiz cihazının kullanılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 5.1. FDM olarak kullanılan PW'a (P-1) ait DSC analiz sonucu

Deney düzeneğinde, laboratuvar şartlarında güneş ışınlamını modellemek için Philips marka 250 W E27 duyu tipine sahip bir kızılötesi lamba kullanılmıştır. Kızılötesi lambada meydana gelen yüksek sıcaklıkların duya zarar vermemesi için seramik duyu tercih edilmiştir. Kızılötesi lamba, emici yüzeyin üzerine yapay güneş ışınlamının tam dik gelmesi için düşey yönde montajlanmıştır. GIIED ünitesi üzerinde bulunan emici plakanın üzerine ışık kaynağından gelen güneş ışınlamı KIMO marka SL/100 tipi bir solarimetre kullanılarak ölçülmüştür. Gelen güneş ışınlamı miktarı emici plakanın farklı noktalarından ölçülen sonuçların ortalaması alınarak bulunmuştur. Çünkü kızıl ötesi lambadan emici plakanın her noktasına eşit miktarda ışınlam ulaşmamaktadır. Bu farklılığı elimine edip ışınlam şiddetini homojenize etmek için emici plakanın üst yüzeyinde 25 adet bölge belirlenmiş ve bu bölgelerin kenarlarına denk gelen 36 noktadan alınan sonuçların ortalaması alınarak 580

Çizelge 5.5. Ölçüm cihazları ve özellikleri

Cihaz Adı	Cihaz Markası	Ölçüm aralığı	Hassasiyet	Kullanım sayısı
Isıl çift	Elimko, K tipi NiCr-Ni	-200°C-+1200°C	±0,01°C	6
Güneş ışınlı ölçer (Solarimetre)	Kimo, SL/100	0-1300 W/m ²	±0,05 (%5) W/m ²	1
Veri kaydedici (Datalogger)	Elimko, E-680	-200°C-+1200°C	±0,1°C	1
Termal kamera	Flir T440	-20°C-+650°C	±2°C	1
Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)	Perkin Elmer, DSC 4000	-100°C-+450°C	±%0,75	1
Diferansiyel taramalı kalorimetre/termogravimetrik analiz (DSC/TG)	Netzsch, STA 449 F3 Jupiter	-150°C-+2400°C	±%1,8	1
Hassas terazi	PCE-BSK 1100	0-1100 g	±0,01 g	1
Kızıl ötesi lamba	Philips, BR125IR	250 W	-	1

Isıl çiftler, Şekil 5.2’de verilen konumlara epoksi reçine kullanılarak yapıştırılmış ve böylece ısı çiftlerinin sabitlenmesi sağlanmıştır. Isıl çiftlerin uçlarında oluşan gerilim farkı ölçülen noktadaki sıcaklık değeri ile doğru orantılıdır. Isıl çiftler tarafından meydana getirilen gerilim farkı veri kaydedici (datalogger) kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Elimko firması tarafından üretilen E-680 tipi datalogger yapılan deneysel çalışmada tercih edilmiştir. Sıcaklık değerleri 1 dk aralıklar ile datalogger cihazına kayıt edilmiştir. Cihaz arayüz programı kullanılarak ölçülen değerler bilgisayara aktarılmıştır. Deneyler katı haldeki FDM içerisinde bulunan ısı çiftlerinden yaklaşık benzer düşük sıcaklık değerleri ölçüldüğünde kızıl ötesi lambanın açılması ile başlamış ve FDM içerisinde hiç katı formda PW kalmaması için T₁ numaralı ısı çiftten 60°C değerinde sıcaklık değeri okunana kadar devam etmiştir. Bu süre enerjinin depolanması aşamasını oluşturmaktadır. T₁ numaralı ısı çiftten 60°C değeri okunduğunda kızıl ötesi lamba kapatılmış ve GIİED ünitesi soğumaya bırakılmıştır. Soğuma aşaması aynı zamanda depolanan enerjinin geri kazanılması aşaması olarak da adlandırılmaktadır. Yapılan tez çalışması kapsamında enerjinin depolanması aşaması üzerine yoğunlaşmıştır. Enerjinin geri kazanım aşaması burada ele alınmamıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılan tüm ölçüm cihazları ve teknik özellikleri Çizelge 5.5’de sunulmuştur.

5.2. Enerji Depolama Performansının İncelenmesi

5.2.1. Depolanan enerji miktarının hesaplanması

Yapılan tez çalışmasında, kızıl ötesi lamba kullanılarak üretilen yapay güneş ışınımı GIIED ünitesi üzerine gönderilerek metal parçalar tarafından duyulur ısı formunda ve FDM olarak kullanılan PW tarafından hem duyulur hem de gizli ısı formunda depolanmıştır. GIIED ünitesinin enerji depolama aşaması ışık kaynağının açılması ile başlayıp, T₁ numaralı ısı çiftten 60°C sıcaklık değerinin okunmasına kadar devam etmiştir. Depolanan enerjinin hesaplanması için kullanılan aşağıdaki eşitlikler Akhilesh ve diğerleri [119], Atkin ve Farid [120], Acır ve diğerleri [121] ve Holman [122] tarafından yapılan çalışmalar dikkate alınarak türetilmiştir. GIIED ünitesinin emici plakası tarafından depolanan duyulur formdaki enerji miktarı Eş. 5.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{ep}(kJ) = m_{ep}c_{ep}(T_{fep} - T_{iep}) \quad (5.1)$$

Burada, m_{ep} (kg) emici plakanın kütlesini, c_{ep} (kJ/kgK) emici plakaya ait özgül ısı değerini ve T_{fep} ve T_{iep} (°C) ifadeleri emici plakanın deneye başlamadan ve deneyin bittiği andaki sıcaklık değerlerini ifade etmektedir. Emici plakaya ait c_{ep} (kJ/kgK) değeri, sıcaklıkla değişmediği kabulüyle ve Akçaoğlu ve diğerleri [113] tarafından yayınlanan çalışma referans alınarak 0,383 kJ/kgK olarak dikkate alınmıştır. T_{fep} ve T_{iep} (°C) sıcaklık değerleri, emici plakanın üst ve alt yüzeyinde bulunan T₄ ve T₅ ısı çiftlerinden okunan sıcaklık verilerinin ortalaması alınarak Eş. 5.2'deki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{fep}, T_{iep} (°C) = \frac{T_5 + T_4}{2} \quad (5.2)$$

Yapılan tez çalışmasında FDM olarak kullanılan PW, ergime sıcaklık aralığı olan 52-54°C sıcaklık değerine kadar güneş simülatöründen gelen yapay ışınımın etkisiyle önce bünyesine duyulur ısı depolamış ve sonrasında yaklaşık sabit sıcaklık ve basınç altında meydana gelen faz değişimine bağlı olarak bünyesine gizli ısı depolamıştır. GIIED ünitesi içerisinde katı fazda PW kalmayana kadar devam eden ısıtma şartları altında, sıcaklık artışına bağlı olarak PW tarafından tekrar duyulur ısı depolanmıştır. İdeal şartlar altında meydana gelen faz

değişimi yaklaşık sabit sıcaklık ve basınç altında meydana gelmektedir [119-121]. Fakat yapılan tez çalışmasında kullanılan ısı çiftlerinden ölçülen sıcaklık değerlerine göre faz değişimi sırasında yüksek olmayan sıcaklık artışları gözlenmiştir. Buradan hareketle PW tarafından depolanan duyulur ısı miktarı Eş. 5.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{pw_s}(kJ) = m_{pw}c_{pw} (T_{f_{pw}} - T_{i_{pw}}) \quad (5.3)$$

Burada, m_{pw} (kg) GIIED ünitesine konulan PW kütlesini, c_{pw} (kJ/kgK) PW'nin özgül ısı değerini ve $T_{f_{pw}}$ ve $T_{i_{pw}}$ (°C) PW'nin deney öncesi ve deney bitiminde göstermiş olduğu sıcaklık verilerini ifade etmektedir. PW'nin özgül ısı değerinin katı ve sıvı hali için DSC/TG analizi ile nasıl elde edildiği Bölüm 5.1'de detaylı şekilde açıklanmıştır. MDSC analizi DSC analizinin yaptırıldığı kurumdan farklı yerde yaptırılmış ve 33,345°C ile 59,595°C sıcaklık aralığı için özgül ısı değerleri bulunmuştur. Hesaplamalarda katı ve sıvı haldeki PW'nin 33,345°C ile 59,595°C sıcaklık aralığına bağlı olarak oluşturulan 2. derece polinom denkleminde yararlanılmıştır. MDSC analizinde var olmayan sıcaklık değerleri için interpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemleri kullanılarak elde edilen değerler kullanılmıştır. Ergime öncesi ve sonrası olmak üzere depolanan duyulur ısı miktarı iki aşamada hesaplanmıştır. $T_{f_{pw}}$ ve $T_{i_{pw}}$ (°C) sıcaklık değerleri, FDM'nin depolandığı depoda bulunan T_3 , T_4 ve T_5 ısı çiftlerinden okunan sıcaklık verilerinin ortalaması alınarak Eş. 5.4'deki gibi bulunmuştur.

$$T_{f_{pw}}, T_{i_{pw}} = \frac{T_3 + T_2 + T_1}{3} \quad (5.4)$$

Sıcaklık artışına bağlı olarak PW'nin faz değiştirmesi ile bünyesine depolamış olduğu gizli ısı miktarı Eş. 5.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{pw_l}(kJ) = m_{pw}f_L\Delta h_m \quad (5.5)$$

Burada, m_{pw} (kg) GIIED ünitesine konulan PW miktarını, f_L sıvı haldeki PW'nin depo içerisindeki katı haldeki miktarına oranını veya bir başka ifade ile ergiyen PW'nin oranını ve son olarak Δh_m (kJ/kg) PW'nin ergime gizli ısı değerini tanımlamaktadır. Yapılan tez çalışması kapsamında PW tarafından depolanan en fazla gizli ısı miktarı, PW'nin tamamen

sıvı fazda bulunduğu durumda depolanmıştır. Bu nedenle f_L değeri 1 kabul edilerek gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Tanımlanan f_L ifadesi GIIED ünitesi içerisinde farklı miktarlarda FDM bulunması durumunda yeniden düzenlenerek kullanım zorunluluğu getirmektedir. Çünkü GIIED ünitesi içerisindeki ısı transferini yükseltmek için kullanılan kanatçık yapıları, FDM miktarının azalmasına neden olduğu için depo tarafından depolanabilecek gizli ısı miktarında düşüşe ve aynı şekilde toplam depolanabilecek enerji miktarında düşüşe neden olmaktadır. Fakat burada yapılan çalışmada PW kütlesi 0,5 kg olarak tüm deney dizilimleri için aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Böylece tüm deney dizilimleri için depolanabilecek en fazla gizli ısı miktarı aynı olmuştur. YTITA kullanımı ile emici plakadan FDM deposu içerisine gönderilen ısıнын duyulur ısı olarak depolanması üzerinde farklılıklar meydana getirilmiştir. YTITA'lar emici plaka gibi bakır malzemeden imal edilmiştir. Emici plaka gibi bünyelerinde duyulur ısı depolanması muhtemel olmakla birlikte bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Çünkü Atkin ve Farid [120] tarafından yapılan bir çalışmada, sistemde bulunan FDM miktarının depolayabileceği toplam duyulur ve gizli ısı miktarının, kanatçıklar tarafından depolanabilecek duyulur ısı formundaki enerjiden kütleli olarak çok yüksek olacağından dolayı dikkate alınmamasının sonuca etkisinin olmayacağı ifade edilmiştir. Bu nedenle ifade edilen bu yaklaşım bu tez çalışmasında dikkate alınarak YTITA'ların depoladığı duyulur ısı miktarı hesaplamalarda yer almamıştır. Ayrıca deneysel çalışmada kanatçıkların sıcaklıkları ısı çiftleri ile ölçülmemiştir.

Kanatçık kullanılan ısı transferi uygulamalarında kanatçık veriminin tanımlanması yaygın bir uygulamadır. Fakat kapalı hacimler içerisinde ısı transferinin incelenmesi sırasında ısı kaynağının konumunun ısı transferi mekanizmasını üzerindeki etkisi büyüktür. Kapalı bir hacmin yan ve alt yüzeylerinde bulunan bir ısı kaynağı söz konusu olduğunda yapı içerisinde iletim ve taşınım ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Böyle bir durumda kanat verimi ifadesi taşınım ile ısı transferi eşitlikleri kullanılarak türetilmektedir. Yapılan tez çalışmasında olduğu gibi üst yüzeyden ısıtma konumunda ise Holman [122] tarafından ifade edildiği gibi kapalı hacim içerisinde sadece iletim ile ısı transferi meydana gelmektedir. Bu nedenle kanat verimi eşitliklerinin kullanımı söz konusu değildir. Ayrıca Karami ve Kamkari [79]'nin ifade ettiği, yerçekimi ivmesinin vektör alanının ergimiş FDM'de kaldırma kuvveti kaynaklı konveksiyon akımının başlangıcına karşı olmasından dolayı, kapalı hacimlerde yukarıdan ısıtma konumunda sadece iletim ile ısı transferi meydana gelmektedir. Böylece GIIED ünitesi tarafından depolanan toplam enerji miktarı Eş. 5.6 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$E_{To}(kJ) = E_{ep} + E_{pws} + E_{pwl} \quad (5.6)$$

5.2.2. Güneş simülatörü tarafından emici plakaya ulaştırılan enerji miktarının hesaplanması

Emici plakanın (EP) üzerine düşen yapay güneş ışıınıımı miktarı Kimo marka SL/100 tipi solar metre ile ölçülmüştür. Ölçülen değerler ve Eş. 5.7 dikkate alınarak güneş simülatöründen EP'nin üst yüzeyine ulaşan yapay güneş ışıınıımına bağlı enerji miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$Q(kJ) = qA_{ep}\Delta t \quad (5.7)$$

Burada, q (W/m^2) kızıl ötesi lambadan EP'ye ulaşan ve solar metre ile ölçülen ısı akısı miktarını, A_{ep} (m^2) EP üst yüzey alanını ve Δt (s) GIIED ünitesi içerisinde bulunan tüm PW'nin ergimesi için geçen süreyi ifade etmektedir. Δt (s), kızıl ötesi lambanın açılarak yapay ısı akısının EP'ye ulaşmaya başladığı an ile T_1 numaralı ısı çiftin $60^\circ C$ sıcaklık değerini gösterdiği ana kadar geçen sürenin toplamı olarak ele alınmıştır.

5.2.3. Enerji depolama veriminin hesaplanması

Verim ifadesi en genel anlamda gerçekleştirilen işin harcanan emeğe oranıdır. Buradan hareketle GIIED ünitesi tarafından depolanan enerji miktarının, kaynaktan gelen enerjiye oranı enerji depolama verimi (η) olarak ifade edilmiş ve Eş. 5.8 kullanılarak hesaplanmıştır. Böylece düşük ısı iletim katsayısına sahip FDM'de YTITA kullanımının enerji depolama performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

$$\eta = \frac{E_{To}(kJ)}{Q(kJ)} = \frac{E_{ep} + E_{pws} + E_{pwl}}{qA_{ep}\Delta t} \quad (5.8)$$

5.2.4. İyileştirme oranlarının hesaplanması

Tez çalışması kapsamında ölçülen ergime süresi (Δt) ve hesaplanan değerlerden olan enerji depolama verimi (η) üzerinde yapılan çalışmaların etkisini daha anlaşılır kılmak için zamana

bağlı iyileştirme oranı (ZBİO) ve enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİO) tanımlaması yapılmıştır. YTITA kullanılmayan boş GIİED ünitesinde depolanan FDM'nin tamamen ergimesi için gereken süre ve depolamış olduğu toplam ısı enerjisinin yay içeren yapılar ile oranlanmasıyla ifadeler türetilmiştir. Yapılan tez çalışmasında kullanılan ZBİO ve EDVİO eşitlikleri, Acır ve Canlı [5], Canlı [6] ve Acır ve diğerleri [101] tarafından yapılan önceki çalışmalarda kullanılan eşitlikler ile aynıdır. Tanımlanan eşitlikler Arshad ve diğerlerinin [123] çalışmalarından esinlenilerek türetilen literatürdeki eşitliklerdir. Kullanılan ZBİO ve EDVİO ifadeleri, Eş. 5.9'da ve Eş. 5.10'da verilmiştir.

$$ZBİO = \frac{\Delta t_{yaysız}}{\Delta t_{yaylı}} \quad (5.9)$$

$$EDVİO = \frac{\eta_{yaylı}}{\eta_{yaysız}} \quad (5.10)$$

5.3. Belirsizlik Analizi

5.3.1. Ölçüm araçlarının belirsizliği

Deneyisel olarak yapılan araştırma çalışmalarında elde edilen sonuçların doğruluğunun önemi büyüktür. Deneyler esnasında farklı sebeplerden dolayı meydana gelen hatalar ölçülen değerlerin doğruluğunu etkilemektedir. Meydana gelen hatalar deney düzeneğinin ve ölçüm aletlerinin yapısına ve deneyi gerçekleştiren kişiye bağlı olarak ortaya çıkan hatalardır. Deney uygulayıcısından kaynaklanan hatalar yetenekli bir çalışanın kullanılması ile bertaraf edilebilmektedir. Fakat deney düzeneği ve ölçüm aletlerinden kaynaklanan birincil hataların giderilmesi en kalibre cihazlar kullanılsa dahi mümkün değildir. Bu nedenle ölçülen ve ölçülen değerlerin kullanılması ile hesaplanan değerlerin belirsizliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Belirsizlik bir hatanın sahip olabileceği olası bir değeri belirtmek için kullanılmaktadır. Belirsizlik analizi ise, bireysel ölçümlerdeki belirsizliklerin hesaplanan sonuç üzerindeki etkisinin ne kadar büyük olduğunu tahmin etme süreci olarak ifade edilmektedir [124-127]. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda daha çok Kline ve McClintock [124] tarafından geliştirilen tek örnekli belirsizlik analizi yöntemi kullanılmaktadır. Tek örnekli belirsizlik analizi yönteminde, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ adet bağımsız

değişkene sahip bir R fonksiyonunun toplam belirsizliği Eş. 5.11'deki gibi Kline ve McClintock [124] tarafından hesaplanmaktadır.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.11)$$

Burada, w_R toplam belirsizliği, $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ bağımsız değişkenlerin belirsizlik değerini ve $\frac{\partial R}{\partial x_1}, \frac{\partial R}{\partial x_2}, \frac{\partial R}{\partial x_3}, \dots, \frac{\partial R}{\partial x_n}$ her bir bağımsız değişkene göre bağımlı R fonksiyonunun kısmi türevini ifade etmektedir. Bunun yanında Eş. 5.11 kullanılarak hesaplanan toplam belirsizlik değeri Holman [126] tarafından tanımlanan Eş. 5.12 kullanılarak da hesaplanabilmektedir.

$$\frac{w_R}{R} = \left[\left(\frac{w_{x_1}}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{w_{x_2}}{x_2} \right)^2 + \left(\frac{w_{x_3}}{x_3} \right)^2 + \dots + \left(\frac{w_{x_n}}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.12)$$

Tez çalışması kapsamında sıcaklık (T), kütle (m_{pw}), ergime gizli ısı değeri (Δh_m) ve özgül ısı değerleri (c_{pw}) için ölçümler yapılmıştır. Bu değerlerin kullanılması ile duyulur ısı, gizli ısı ve enerji depolama verimi için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan tüm cihazlar temin edildikleri firmalar tarafından kalibre edilerek tez çalışmasında kullanılmıştır. Sıcaklık değerlerinin ölçülmesi sonucu meydana gelen toplam belirsizliğin hesaplanmasında Avrupa Akreditasyon Kurumu (AAK) tarafından hazırlanmış olan EA/4-02 M:2022 [128] standardının Ata [129] tarafından referans alınarak, ısı çifti ile sıcaklık (T) ölçümünün gerçekleştirildiği durumdaki toplam belirsizlik hesaplama yaklaşımı bu çalışmada referans olarak kullanılmıştır. Ata [129] tarafından elde edilen sonuçlar direkt olarak burada da kullanılmıştır. Böylece sıcaklık (T) ölçümü sonucu meydana gelen toplam belirsizlik $\pm 0,1$ °C olarak alınmış ve hesaplamalarda kullanılmıştır.

Çalışmada GIIED malzemesi olarak kullanılan PW'nin kütlesi (m_{pw}) PCE-BSK 1100 tipi dijital terazi ile ölçülmüştür. Isıl çiftlere benzer olarak EA/4-02 M:2022 [128] standardının kullanılması ile kütle (m_{pw}) ölçümü için toplam belirsizlik $\pm 0,02$ g olarak elde edilmiştir. Bunun yanında ergime gizli ısı (Δh_m) için toplam belirsizlik analizi Koşan [40] ve Dağdeviren ve diğerleri [130] tarafından uygulanan yaklaşımlar dikkate alınarak Eş. 5.13'deki gibi hesaplanmıştır. DSC cihazından ölçülen değerin ölçüm hassasiyetinden ve

ölçüm yapan kişiden kaynaklanan okuma hatalarının belirsizlikleri ergime gizli ısının (Δh_m) toplam belirsizliğini oluşturmuştur. DSC cihazından okunan değerin firma tarafından belirtilen hassasiyeti $\pm 0,75$ ve okuma hatasından kaynaklanan belirsizlik $\pm 0,75$ olarak dikkate alındığında ergime gizli ısı (Δh_m) için toplam belirsizlik $\pm 0,01$ kJ/kg (± 1 kJ/kg) olarak bulunmuştur.

$$w_{\Delta h_m} = [(w_{DSC})^2 + (w_{okuma})^2]^{1/2} \quad (5.13)$$

PW'nin özgül ısı değerinin (c_{pw}) toplam belirsizliği Eş. 5.13'deki hesaplama benzer şekilde Eş. 5.14'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Hesaplama c_{pw} değeri MDSC analiz cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Eş. 5.14'deki ilk ifade MDSC analiz cihazının $\pm 1,8$ kJ/kgK değerindeki ölçüm hassasiyetini ve ikinci terim ise deneyi yapan kişinin okumasına bağlı olarak dikkate alınan $\pm 1,8$ kJ/kgK değerindeki okuma hatasını ifade etmektedir. Eş. 5.14 kullanılarak özgül ısı değerinin (c_{pw}) toplam belirsizliği $\pm 0,025$ kJ/kgK ($\pm 2,5$ kJ/kgK) olarak hesaplanmıştır.

$$w_{c_{pw}} = [(w_{MDSC})^2 + (w_{okuma})^2]^{1/2} \quad (5.14)$$

Bunun yanında Eş. 5.13 ve Eş. 5.14'de verilen ifadeler dikkate alınarak, GIIED ünitesindeki emici plakaya (EP) ulaşan güneş ışınlamına bağlı olarak ölçülen ısı akısının (q) toplam belirsizliği Eş. 5.15'deki gibi hesaplanmıştır.

$$w_q = [(w_{solar\ metre})^2 + (w_{okuma})^2]^{1/2} \quad (5.15)$$

Eş. 5.15'de verilen ilk terim solar metrenin ölçüm hassasiyeti olan $\pm 0,05$ W/m² (± 5 W/m²) değerini ve Koşan [40] tarafından yapılan kabul referans alınarak okuma kaynaklı hataların belirsizliği $\pm 0,01$ W/m² (± 1 W/m²) değerlerini almıştır. Bu değerler dikkate alınarak ısı akısının (q) sahip olduğu toplam belirsizlik $\pm 0,051$ W/m² ($\pm 5,10$ W/m²) hesaplanmıştır.

5.3.2. Depolanan enerji miktarı ve enerji depolama veriminin belirsizliği

Ölçüm araçlarının toplam belirsizliklerinin tanımlanmasından sonra depolanan enerji miktarları ve enerji depolama verimi ifadelerinin sahip oldukları belirsizlik değerleri de

ayrıca hesaplanmıştır. Bölüm 5.2’de verilen enerji depolama eşitlikleri dikkate alınarak duyulur ve gizli ısı formunda depolanan enerji miktarlarının sahip olduğu belirsizlikler aşağıdaki Eş. 5.16-5.21 kullanılarak hesaplanmıştır.

Emici plaka tarafından depolanan duyulur ısının belirsizliği

$$w_{E_{ep}} = \left[\left(\frac{\partial E_{ep}}{\partial m_{ep}} w_{m_{ep}} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{ep}}{\partial c_{ep}} w_{c_{ep}} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{ep}}{\partial \Delta T_{ep}} w_{\Delta T_{ep}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.16)$$

FDM tarafından depolanan duyulur ısının belirsizliği

$$w_{E_{pws}} = \left[\left(\frac{\partial E_{pws}}{\partial m_{pw}} w_{m_{pw}} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{pws}}{\partial c_{pw}} w_{c_{pw}} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{pws}}{\partial \Delta T_{pw}} w_{\Delta T_{pw}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.17)$$

FDM tarafından depolanan gizli ısının belirsizliği

$$w_{E_{pwl}} = \left[\left(\frac{\partial E_{pwl}}{\partial m_{pw}} w_{m_{pw}} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{pwl}}{\partial \Delta h_m} w_{\Delta h_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.18)$$

Gizli ısı miktarının hesaplanması için kullanılan Eş. 5.5’de yer alan ve eriyen PW oranını ifade eden f_L 1 olarak alınmıştır. Çünkü depo içerisindeki T_1 numaralı ısı çift 60°C sıcaklık değerini gösterdiği anda depo içerisinde herhangi bir katı fazda PW’nin bulunmadığı kabulü yapılmıştır.

Toplam depolanan enerjinin belirsizliği

$$\begin{aligned}
w_{E_{To}} = & \left[\left(\frac{\partial E_{ep}}{\partial m_{ep}} w_{m_{ep}} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{ep}}{\partial c_{ep}} w_{c_{ep}} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{ep}}{\partial \Delta T_{ep}} w_{\Delta T_{ep}} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{pws}}{\partial m_{pw}} w_{m_{pw}} \right)^2 \right. \\
& + \left(\frac{\partial E_{pws}}{\partial c_{pw}} w_{c_{pw}} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{pws}}{\partial \Delta T_{pw}} w_{\Delta T_{pw}} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{pwl}}{\partial m_{pw}} w_{m_{pw}} \right)^2 \\
& \left. + \left(\frac{\partial E_{pwl}}{\partial \Delta h_m} w_{\Delta h_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \quad (5.19)$$

Güneş simülatöründen emici plakaya ulaşan güneş enerjisinin belirsizliği

$$w_Q = \left[\left(\frac{\partial Q}{\partial q} w_q \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial A_{ep}} w_{A_{ep}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \Delta t} w_{\Delta t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.20)$$

Enerji depolama veriminin belirsizliği

$$w_\eta = \left[\left(\frac{\partial \eta}{\partial E_{To}} w_{To} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q} w_Q \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.21)$$

5.4. Taguchi Tabanlı Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Optimizasyon

Deneysel çalışmalarda incelenen konuya göre farklı sayılarda girdi değerinin tek bir çıktı değeri üzerine olan etkisi incelenmektedir. Deneysel olarak yapılan bu incelemelerde çoğunlukla tek bir girdi değeri değişiminin çıktı değerine olan etkisi girdi değerlerinin her deneyde sadece birinin değiştirilmesi ve diğer girdi değerlerinin sabit tutularak deneylerin defalarca tekrarlanmasını gerekli kılmaktadır. Bir başka ifade ile her deneyde bir faktörün değişimi sağlanmaktadır [131]. Bu durum deneysel maliyetlerin artmasına ve deney sürelerinin uzamasına neden olmaktadır. Çeşitli optimizasyon yöntemlerinin deney tasarımı (design of experiment-DoE) ve deney sonuçlarının değerlendirilmesi aşamalarında kullanılmasıyla istenen sonuca daha hızlı ulaşmak mümkün olmaktadır. Geleneksel sistemleri, verimlilik kaybı olmadan artan akış hızlarını barındıracak şekilde yeniden tasarlamak, deney süreçlerini hızlandırmış olacaktır [132]. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta deney şartlarının ve deneyi etkileyen deney dizilimlerinin uygun seçilmesidir. Deney girdilerinin yer aldığı deney dizilimleri oluşturulurken tam faktöriyel dizilim kullanılabileceği gibi Taguchi metodundan elde edilen dizilimler de

kullanılabilmektedir. Taguchi deney tasarımı yönteminin kullanılması ile nispeten sınırlı sayıda örnek kullanarak büyük miktarda bilgiye ulaşılabilmektedir [132]. Üretim kalitesini artırma, deney zamanını ve süreç maliyetlerini en aza indirme açısından Taguchi yöntemi verimli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [131]. Taguchi yöntemi, matris deneyleri için bir parametre tasarımı sağlamak için kullanılmaktadır. Daha az sayıda deneyle en iyi modeli elde etmek için uygun ortogonal dizi seçimini ve faktörlerin atanmasını içermektedir [133]. Taguchi yöntemi tek bir sonuç değişkeni üzerindeki etkiyi belirlemek için kullanılmaktadır. Fakat girdi faktörlerinin birden fazla sonuç değişkenine olan etkisi incelenmek istediğinde Taguchi yöntemi yetersiz kalmakta ve karşımıza çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri çıkmaktadır. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden biri olan gri ilişkisel analiz (GİA), çoklu yanıtlar arasındaki karmaşık ilişkileri çözmek için yararlı bir optimizasyon yöntemidir [131]. GİA, yetersiz veya daha az bilgi kullanarak iyi tahminler yapabildiği için araştırmacılar tarafından sıkça kullanılan bir yöntemdir.

5.4.1. Taguchi deney tasarımı yöntemi

Deney tasarımı metotları, 1900'lü yılların ikinci çeyreğinin başında tarımsal üretimdeki hasat verimini daha yukarılara çekmek için A. Ronald Fischer tarafından geliştirilmiştir. Tam faktöriyel tasarım olarak adlandırılan bu çalışma, istenen deney sonucunu elde etmek için eldeki tüm girdilere göre tüm deneylerin eksiksiz yapılmasını gerekli kılmaktadır [134, 135]. Tüm deney şartlarının dikkate alınmasından dolayı tam faktöriyel deney tasarımı endüstriyel uygulamalarda çok tercih edilmemektedir. Bunun yerine değişkenliğin azaltılarak kısmi faktöriyel şeklinde deney tasarımının kullanıldığı yaklaşım daha çok tercih edilmektedir. Bu kapsamda ilk çalışma Dr. Genichi Taguchi tarafından yapılmıştır [129, 131-135]. Kendi adı ile anılan Taguchi yönteminde deney girdilerini oluşturan faktörler arasındaki etkileşimler, kabul edilebilir seviyede göz ardı edilerek deney sisteminin performansını belirleyen deney sayısı azaltılmıştır. Taguchi deney tasarımı yöntemi, tek bir çıktı değeri üzerine etkisi bulunan birçok faktörü aynı anda ve ekonomik bir şekilde incelemek amacıyla kullanılan istatistiksel bir yaklaşımdır [136]. En iyi faktör kombinasyonu kolay bir şekilde Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak belirlenebilmektedir. Taguchi yönteminde deney sayısını olabildiğince azaltmak için Jacques Hadamard tarafından geliştirilen ortogonal diziler olarak isimlendirilen yapılandırılmış çizelgeler kullanılmaktadır [135-137]. Ortogonal dizilerin kullanılması ile deney maliyeti, deney için harcanan emek ve zaman azaltılmaktadır [137]. Ortogonal

dizilerde, deneyi oluşturan tüm girdi faktörleri eşit deneme sayılarında deneyde yer almakta ve böylece normal bir dağılım elde edilmektedir [138]. Ortogonal diziler Eş. 5.22’de verildiği gibi gösterilmektedir.

$$\text{Ortogonal dizi: } L_a(bxc) \text{ veya } L_a b^c \quad (5.22)$$

Burada, L latin kare tasarımını, a deney sayısını, b her kolondaki seviye sayısını ve c faktör sayısını ifade etmektedir [138].

Taguchi deney tasarımı yöntemi uygulanarak elde edilen sonuç değerleri Sinyal/Gürültü (Signal/Noise, S/N) oranına dönüştürülmekte ve desibel (dB) birimi türünden tanımlanmaktadır. S/N oranı, hem deney sonuçlarının ortalamasını hem de deney sonuçlarının ortalamaından değişkenliğini dikkate almaktadır. Bir başka şekilde ise S deneyden elde edilen gerçek değeri ve N deney tasarımında göz önünde bulundurulmayan fakat sonuca etkisi olup, ulaşılması amaçlanan değerden sapmaya neden olan tüm değişkenleri ifade etmektedir [129, 138]. Ayrıca gürültü faktörleri bağıl nem, sıcaklık ve diğer hava koşulları gibi kontrol edilmesi zor olan çevresel etkileri de ifade etmektedir [139]. Taguchi, çok sayıda S/N oranı tanımlamış olmasına karşın günümüz çalışmalarında daha çok “en büyük-en iyi” veya “daha büyük-daha iyi”, “nominal-en iyi” veya “nominal-daha iyi” ve “en küçük-en iyi” veya “daha küçük-daha iyi” oranları kullanılmaktadır [129, 131-140]: Verilen tüm S/N oranlarında amaç sonucu maksimize etmek yani en büyükmektir. Taguchi, S/N oranlarının en büyükleşmesinin gerçek değeri artırırken varyasyonu yani gerçek değerden olan uzaklaşmayı da azaltmaktadır [135]. En yaygın kullanılan S/N oranları aşağıdaki eşitlikler aracılığıyla hesaplanmaktadır [129, 131-138]:

“En büyük-en iyi” S/N oranı

$$S/N = -10 \left(\log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5.23)$$

“Nominal-en iyi” S/N oranı

$$S/N = 10 \left(\log \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (5.24)$$

“En küçük-en iyi” S/N oranı

$$S/N = -10 \left(\log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5.25)$$

Deneysel değerlerin ortalaması

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5.26)$$

Standart sapma

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (5.27)$$

Burada, $\bar{y}$ deneysel verilerin ortalamasını, s standart sapmayı, n deney sayısını ve y_i ölçülen deneydeki gerçek değeri ifade etmektedir.

Yapılan tez çalışmasında tel çapı (d , mm), yay çapı (D , mm) ve yay adımı (p , mm) girdi (kontrol) faktörleri olarak seçilmiştir. Her bir faktör 3 seviye olarak deneylerde kullanılmıştır. Taguchi deney tasarımının temelini oluşturan ortogonal dizilerin kullanılmaması durumunda gerekli olan minimum deney sayısı (MDS) aşağıda verilen Eş. 5.28 kullanılarak hesaplanmaktadır [98, 109].

$$MDS = \ln^{fn} \quad (5.28)$$

Burada, $\ln$ seviye sayısını ve fn faktör sayısını ifade etmektedir. Yapılan tez çalışmasında seviye sayısı 3 ve faktör sayısı 3 olarak belirlenmiştir. Buradan hareketle tam faktöriyel olarak planlanan deneysel çalışmada gerekli olan MDS 27 olarak hesaplanmıştır. 27 adet deney yapmak için gerekli olan deney süresi, deney maliyeti ve emeğin Taguchi tabanlı

ortogonal dizilerin kullanılması ile azaltılmasının mümkün olması dolayısıyla bu çalışmada L_9 ortogonal dizisi kullanılmıştır. L_9 ortogonal dizisinin seçimine Senthilkumar ve diğerleri [136] tarafından tanımlanmış olan ve aşağıda verilen Eş. 5.29 kullanılarak karar verilmiştir.

$$\text{Gerekli en az deney sayısı} = [(ln - 1) \times Pa] + 1 \quad (5.29)$$

Burada, ln seviye sayısını ve Pa girdi parametresi (faktörü) sayısını ifade etmektedir. Yapılan tez çalışmasında 3 seviye ve 3 girdi faktörü olduğu için gerekli en az deney sayısı 7 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen sayıdaki deney için Minitab 17 yazılımında 3 faktörlü ve 3 seviyeli bir ortogonal dizi bulunmamaktadır. Bunun için yazılımda bulunan mevcut ortogonal dizilerden gerekli en az deney sayısına en yakın olan 9 adet deney içeren L_9 ortogonal dizisi seçilmiştir. Bu yöntemin avantajları Montgomery [141] tarafından detaylıca açıklanmıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılmış olan L_9 ortogonal dizisi Minitab 17 yazılımı ile oluşturulmuş ve deney dizilerinin seviyeleri ve girdi (kontrol) faktörleri aşağıdaki Çizelge 5.6’da detaylıca listelenmiştir.

Çizelge 5.6. L_9 ortogonal dizisi kullanılarak elde edilen deneysel tasarım

Deney Nu.	A	B	C	Tel çapı (d, mm)	Yay çapı (D, mm)	Yay adımı (p, mm)
1	1	1	1	2	20	18
2	1	2	2	2	30	24
3	1	3	3	2	40	30
4	2	1	2	5	20	24
5	2	2	3	5	30	30
6	2	3	1	5	40	18
7	3	1	3	8	20	30
8	3	2	1	8	30	18
9	3	3	2	8	40	24

L_9 ortogonal dizisi kullanılarak oluşturulan deney dizilimleri ile gerekli deneyler yapılmıştır. Ölçülen ve hesaplanan değerler dikkate alınarak 4 farklı sonuç değişkeni belirlenmiştir. Bunlar sırasıyla ergime süresi (Δt), zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİÖ), enerji depolama verimi (η) ve enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİÖ)’dür. Belirlenen sonuç değişkenlerinden Δt ’nin en küçük olması; ZBİÖ, η ve IEDVİÖ değişkenlerinin en büyük olması beklenmektedir. Görüldüğü gibi birden fazla sonuç değişkeni bulunduğu için yapılan

optimizasyon işleminde çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinin kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Çünkü Taguchi deney tasarımının analiz edilmesi sırasında her bir sonuç değişkeni için optimizasyon işleminin ayrı ayrı yapılması gerekmektedir. Bir başka ifade ile istenilen beklentiyi karşılayacak olan en iyi deney diziliminin belirlenmesi için analiz işleminin 4 defa tekrarlanması gerekmektedir. Her analizden elde edilen en iyi dizilim aynı olabileceği gibi birbirinden farklı da çıkabilmektedir. Ayrıca bir önceki sonuç değişkenine bağlı olarak bulunan en iyi dizilim diğer sonuç değişkenine göre bulunan dizilimden daha kötü performansa sahip olabilmektedir. Bu nedenle bu tür sorunların önüne geçmek için ÇKKV yöntemlerinden olan gri ilişkisel analiz (GİA) 4 sonuç değişkenini de en iyileyen deney dizilimini elde etmek için bu tez çalışması kapsamında kullanılmıştır.

5.4.2. Gri ilişkisel analiz (GİA) yöntemi

ÇKKV yöntemlerinden biri olan GİA yönteminin temelini oluşturan gri sistem teorisini (GST), Judong Deng 1982 yılında geliştirmiştir [142]. GST'nin temelinde bilginin siyah, beyaz ve gri olarak sınıflandırılması bulunmaktadır. Siyah bilgi bilgiye sahip olunmadığını, beyaz bilgi bilgiye tamamen sahip olduğunu ve gri bilgi ise bilginin bir kısmının bilindiğini diğer kısmının ise bilinmediğini ifade etmektedir [142, 143]. Gri bilgi aynı zamanda gri eleman olarak tanımlanmaktadır. Gri bölge çözümlemesi sonucunda karar göstergeleri belirlenmektedir. Gri ilişkisi, birden fazla parametrenin veya tasarım faktörünün aralarındaki ilişkinin değerlendirilmesini içermektedir [142, 143].

GİA yöntemi, tasarım ve değerlendirilmesi yapılan parametreler ve sistemler arasındaki benzerlikler ve farklılıklar arasındaki değişimlerin derecesini ölçmektedir. GİA, ayrıca az veya yetersiz bilgilerin girdi olarak kullanıldığı ve sonuç fonksiyonunun yetersiz sayıdaki bilgiye rağmen iyi bir şekilde tahmin edildiği bir yöntem olarak sıkça kullanılmaktadır. GİA yönteminin amacı, belirsiz bilgilerin varlığında veya bilginin hiç bulunmadığı durumlarda karar verme, tahmin etme ve sistem kontrolü gibi beklentileri karşılamaktır [134, 142, 143]. GİA yöntemi, ele alınan bir sistemde karşılaştırılacak faktör serileri ile referans serileri arasındaki etkileşim derecelerini ortaya çıkarmak için kullanılan bir yöntemdir. Parametreler arasındaki etkileşim miktarı gri ilişkisel derece (GİD) olarak tanımlanmaktadır [134, 142, 143]. Aşağıda verilen işlem sırası takip edilerek GİA yöntemi gerçekleştirilmektedir [97-99, 101-105, 142-144].

Adım 1: Karar matrisinin, deneysel sonuçların elde edilmesi

Deneysel çalışma sonucunda farklı deney serileri için ölçülen sonuç değişkeninden n uzunluğundaki karar serisinin Eş. 5.30'daki gibi elde edildiğini varsayalım.

$$x_o = (x_o(1), x_o(2), \dots, x_o(n)) \quad (5.30)$$

Adım 2: Deneysel çalışmadan elde edilen verilerin normalize edilmesi

Deneysel incelemede kullanılan faktörlerin birbirinden farklı kaynağa sahip olduğu ve farklı birimlerde ve boyutlarda ölçülmesinden dolayı, aralarındaki uyumsuzluğu elimine etmek için normalizasyon işlemi yapılarak tüm ölçüm sonuçları aynı birime dönüştürülmektedir. Dönüştürme işlemi vasıtasıyla çok geniş bir aralık değerlerine sahip olan sonuç değişkenleri daha dar bir alana çekilerek işlem kolaylığı sağlanmaktadır. Verilerin normalizasyonu işlemi aynı zamanda gri ilişkisel oluşum (GİO) olarak da adlandırılmaktadır. Normalizasyon işleminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, ölçüm sonucu elde edilen referans serinin S/N oranlarının belirlenmesindeki yaklaşıma benzer şekilde bir yaklaşım ile normalize edilmesidir. Buradaki işleme lineer veri ön işleme metodu denilmekte ve normalize edilmiş değerler 0 ile 1 arasında sıralanmaktadır. Sonuç serisindeki değerlerin yüksek olması istendiğinde “daha yüksek-daha iyi” veya “en yüksek-en iyi” yaklaşımı, küçük olması istendiğinde ise “daha küçük-daha iyi” veya “en küçük-en iyi” yaklaşımı ve son olarak belirli bir değer veya değer aralığında olması istendiğinde ise “nominal değer-daha iyi” veya “nominal-en iyi” yaklaşımları kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar aşağıdaki Eş. 5.31-5.33'de verilmiştir [97-99, 101-105, 142-144].

Daha yüksek-daha iyi

$$x_i(k) = \frac{x_i^o(k) - \min x_i^o(k)}{\max x_i^o(k) - \min x_i^o(k)} \quad (5.31)$$

Daha düşük-daha iyi

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^o(k) - x_i^o(k)}{\max x_i^o(k) - \min x_i^o(k)} \quad (5.32)$$

Nominal-daha iyi

$$x_i(k) = 1 - \frac{|x_i^o(k) - x^o|}{\max x_i^o(k) - x^o} \quad (5.33)$$

Burada, $x_i(k)$ normalizasyon sonrası elde edilmiş değeri, $x_i^o(k)$ ölçülen orijinal değeri, $\max x_i^o(k)$ ve $\min x_i^o(k)$ sırasıyla i serisindeki $x_i^o(k)$ değerinin en yüksek ve en düşük değerlerini ve x^o istenilen nominal (ideal) değeri ifade etmektedir [97-99, 101-105, 142-144].

Adım 3: Normalize edilmiş değerler ile referans serisindeki değerlerin arasındaki uzaklığın hesaplanması

Normalize edilmiş değerler ile referans serisindeki değerlerin arasındaki uzaklığın hesaplanması aslında, normalize değerlerin referans değerden olan sapmasını ifade etmektedir. Ayrıca bu işleme mutlak değer tablosunun oluşturulması aşaması da denilmektedir. Eş. 5.34 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)| \quad (5.34)$$

Burada, $x_0(k)$ normalize edilen değerdeki her bir parametrenin en büyük değerini, $x_i(k)$ her bir satırdaki normalize edilmiş değeri ve $\Delta_{0i}(k)$ her bir parametredeki en büyük değer ile her bir satırdaki normalize edilmiş değerlerin çıkarılıp mutlak değerinin alınmış halini ifade etmektedir [139].

Adım 4: Gri ilişkisel katsayısının (GİK) hesaplanması

Deneyisel sonuç değişkenlerinin normalizasyon işleminden sonra kalite özelliklerinin gri ilişkisel katsayısı (GİK), Eş. 5.35 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \Psi \cdot \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \Psi \cdot \Delta_{max}} \quad (5.35)$$

Burada, $\Delta_{\min}$ ve $\Delta_{\max}$ değerleri mutlak sapma değeri olan $\Delta_{0i}(k)$ 'nin en küçük ve en büyük değerini ve Ψ ayırt edici katsayı veya kimlik katsayısını ifade etmektedir [97-99, 101-105, 142-144]. 0 ile 1 arasında bir değer alan Ψ 'nin uygulamada en çok 0,5 değerini aldığı ve aldığı değerin GİK'ya bağlı olarak hesaplanan gri ilişkisel dereceye (GİD) etkisinin olmadığı [97-99], [101-105] ve [142-144] numaralı literatür çalışmalarında detaylıca açıklanmıştır. Ayrıca Ψ değeri gri ilişkisel derece (GİD) sonucunda belirlenecek olan optimum deney dizilimi sıralamasını da etkilememektedir [97-99, 101-105, 142-144].

Adım 5: Gri ilişkisel derecenin (GİD) hesaplanması

Gri ilişkisel katsayısının (GİK) hesaplanmasından sonra gri ilişkisel derecenin (GİD) hesaplanması gerekmektedir. Burada iki farklı yaklaşım söz konusudur. Bunlardan ilki optimizasyon işlemine tabi tutulan toplam sonuç değişkenine ait GİK'ların toplanıp sonuç değişkeni sayısına bölünmesi ile Eş. 5.36'da gösterildiği gibi hesaplanmasıdır.

$$Y_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_i(k) \quad (5.36)$$

Burada, Y_i gri ilişkisel dereceyi (GİD), m toplam cevap veya sonuç değişkeni sayısını, k her bir sonuç serisini ve $\xi_i(k)$ GİK değerini ifade etmektedir. Yüksek GİD'nin varlığı ideal normalize edilmiş değerler ile gerçek deneysel veriler arasında güçlü bir bağ olduğunu ifade etmektedir. Bu nedenle, daha yüksek GİD'ye karşılık gelen parametre kombinasyonunun optimal dizilime daha yakın olduğunu göstermektedir [137.]

Her bir parametrenin performansına olan etkisinin farklı ağırlıkta veya bir başka ifade ile sonuç parametrelerinin önem miktarlarının farklı olması durumunda ikinci yaklaşım dikkate alınarak GİD değeri aşağıda verilen Eş. 5.37'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$Y_i = \sum_{k=1}^m w_i(k) \cdot \xi_i(k) \quad \sum_{k=1}^m w_i(k) = 1 \quad (5.37)$$

Burada, $w_i(k)$ k kriterinin önem ağırlığını ifade etmektedir.

Adım 6: Gri ilişkisel sıralama

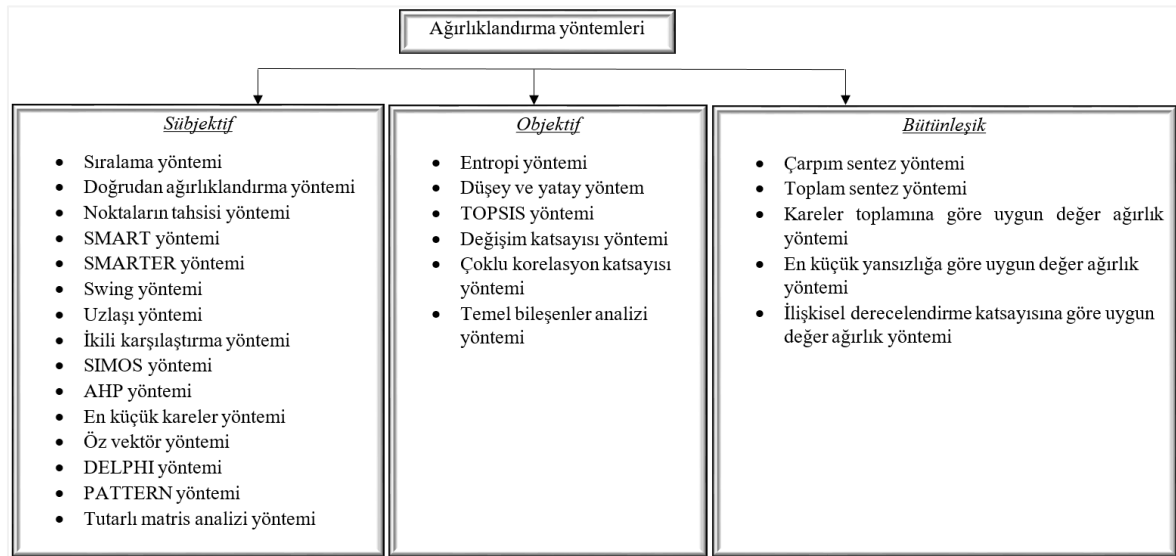
Bu adım GİA yönteminin son aşamasını oluşturmaktadır. Hesaplanan GİD'lerin en yüksek değerli olanına 1 değeri atanır ve deney sayısı kadar büyükten küçüğe doğru sıralamaya devam edilir. Bu işlem ile 1. sırayı alan deney dizilimi, istenen cevap dizilimini sağlayan en iyi deney dizilimi olarak belirlenmiş olur.

Yukarıda ifade edilen işlem adımları izlenerek GİA yöntemi uygulanmakta ve en iyi deney dizilimi belirlenmektedir. GİA yöntemi, etkili bir ölçümleme, karar verme ve sınıflama aracı olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında regresyon analizi, temel bileşenler analizi ve faktör analizi gibi istatistiksel analizlerin kullanıldığı durumlar için de GİA yöntemi kullanılabilir. GİA yönteminin sistem analizinde kullanılması ile çok büyük miktarda giriş verisine ihtiyaç olmadan kolay ve basit matematiksel işlemler ile analiz işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Sistem analizinde kullanılan regresyon, temel bileşen ve faktör analizi yöntemlerinin sağlaması gereken bazı hipotez gerekliliklerinin GİA yönteminde kullanılmasına gerek yoktur. GİA'da temel olarak yakınlık ilişkisi, geometrik bir benzerlik seviyesine göre karar verilmektedir. Benzer ilişkilerin fazla olması, seriler arasındaki etki derecelerinin yüksek olduğunu göstermektedir. GİA yöntemi, az sayıda ve kısıtlı veriler ile analizi yapılan sistem için önemli olanlarını belirlemede çok kullanışlı bir analiz tekniği olarak geniş kullanım alanına sahiptir [129, 145, 146].

5.4.3. Kriter ağırlıklandırma yöntemleri

ÇKKV yöntemlerinde, değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılması yöntemin en önemli noktalarının başında gelmektedir. Çünkü ele alınan çıktı değişkenlerini en iyileyen deney dizilimini belirlerken kullanılan kriterlerin sonuca olan etkisi bu aşamada ortaya konmaktadır. Burada yapılacak uygun olmayan bir işlem istenilen en iyi deney dizilimine ulaşamamasıyla sonuçlanabilmektedir. Böylece elde edilmek istenen sonuçlar ile değerlendirme kriterlerine atanan ağırlıklar arasında yüksek oranlı bir bağın varlığından söz edilebilmektedir [147]. Değerlendirme kriterlerine ağırlık verilirken en önemli görülen kriterlere en yüksek değerin verilmesi esastır. Kriterlerin ağırlıklandırılması yaklaşımında kullanılan yöntemler Wang ve Luo [148] tarafından sübjektif, objektif ve bütünleşik olarak 3 kısma ayrılmıştır. Sübjektif yöntemlerde araştırmacıların tecrübe, tercih ve yargılarına bağlı olarak ağırlıklandırma işlemi yapılmaktadır. Objektif yöntemlerde ise araştırmacının

yargıları kullanılmadan sadece karar matrisinin kullanılması ile matematiksel işlemler uygulanarak ağırlıklandırma işlemi yapılmaktadır. Bütünleşik yöntemlerde ise adından da anlaşılacağı üzere hem karar matrisi hem de araştırmacının yargıları dikkate alınarak ağırlıklandırma işlemi yapılmaktadır. En genel haliyle ağırlıklandırma sürecinin sınıflandırılması Şekil 5.3’de yapılmıştır. Burada yer almayan ve geliştirilmeye devam eden yöntemler de literatürde bulunmaktadır.



Şekil 5.3. Ağırlıklandırma yöntemlerinin en genel haliyle sınıflandırılması [147-149]

Yapılan tez çalışmasının GİA aşamasında, ergime süresi (Δt), zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİO), enerji depolama verimi (η) ve enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİO) ifadeleri en iyilenen deney dizilimini elde etmek için belirlenen değerlendirme kriterleri olarak seçilmiştir. Bu 4 kriterin ağırlıklandırma işlemi objektif ağırlıklandırma yöntemlerinden olan entropi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Entropi ağırlıklandırma yöntemi, değerlendirme kriterlerinin karar matrisi içerisinde negatif veri bulunmaması, basit bir yöntem olması ve literatürde sıkça kullanılması dolayısıyla tercih edilmiştir. Entropi yöntemi ile ağırlıklandırma işlemi Shannon entropi yöntemi ve gri entropi yöntemi kullanılarak iki farklı şekilde yapılmıştır. GİA sonucunda elde edilecek GİD değerlerinde bir farkın meydana gelip gelmeyeceğini incelemek amacıyla iki farklı entropi ağırlıklandırma yöntemi bu tez çalışmasında kullanılmıştır.

Shannon entropi yöntemi

Entropi ifadesi termodinamik bilim dalıyla ilişkili olarak bir sistemdeki düzensizliğin ve belirsizliğin bir ölçüsü olarak 1865 yılında Rudolph Clausius tarafından tanımlanmıştır [147, 149]. Entropi, genellikle sistemik düzensizliğin aşamasını ölçmek için kullanılan termodinamik bir kavramdır. Bunun yanında entropi kavramı, bilgi teorisinde bulunan belirsizliğin bir ölçüsü olarak ilk kez 1948 yılında Claude E. Shannon [150] tarafından tanımlanmıştır [148-153]. Sonrasında ölçüt ağırlıklandırmada entropinin kullanılabileceği bulunmuştur. Karar matrisinde bulunan sonuç değerlerine dayalı olarak nesnel ağırlıklar Shannon entropi yöntemi ile hesaplanabilmektedir. Bilgi teorisinde düzenli bilgi kaynağının bilgi entropisi ve düzensiz sistemin aşaması ne kadar küçükse, bilginin fayda değeri o kadar büyük olmaktadır. Bunun yanında sıralı bilgi kaynağının bilgi entropisi ve düzensiz sistemin aşaması ne kadar büyükse, bilginin fayda değeri o kadar küçük olmaktadır. Görünüşe göre karar matrisi, bilgi sisteminin düzen ve fayda aşamasını elde etmek için bilgi entropisi kullanılarak değerlendirilebilen bir bilgi taşıyıcısıdır. Bu nedenle, her bir indeksi hesaplamak için bilgi entropi modelinin kullanılması, esasen indeks bilgisinin fayda değerinin kullanılması anlamına gelmekte ve fayda değeri ne kadar yüksek olursa, değerlendirme o kadar önemli olmaktadır. Her bir indeksi hesaplamak için kullanılan bu model, taramayı daha objektif hale getirmektedir [151-152].

Shannon entropi yönteminde değerlendirme kriterlerine ilişkin önem dereceleri veya ölçüt ağırlıkları hesaplanırken doğal logaritma fonksiyonu kullanılmaktadır. Karar matrisi içerisinde sıfır veya negatif değerlerin bulunması hesaplamaların istenilen sonuca ulaşamamasına neden olmaktadır. Bu nedenle karar matrisi içerisinde böyle bir eleman var ise Z-skoru standartlaştırılması yöntemiyle dönüştürülmektedir [147, 148, 151]. Shannon entropi yönteminin kriter ağırlıklandırma hesaplamalarındaki işlem aşamaları aşağıda listelenmiştir [147-154].

Adım 1: Normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulması

Deneyssel veya sayısal çalışmalar sonucunda elde edilen pozitif değerlere sahip karar matrisi Eş. 5.38 kullanılarak normalize edilmektedir.

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}; \forall i, j \quad (5.38)$$

Adım 2: Kriterlerin entropi değerlerinin hesaplanması

Eş. 5.38 kullanılarak elde edilen normalize karar matrisindeki her bir değerlendirme kriterine ait Shannon entropi değerleri Eş. 5.39 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$e_j = -k \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n \quad (5.39)$$

Eş. 5.39'da verilen k bir sabiti temsil etmekte ve Boltzman sabiti olarak adlandırılmaktadır. Verilen ifade Eş. 5.40 kullanılarak bulunmaktadır.

$$k = \frac{1}{\ln(m)} \quad (5.40)$$

Burada verilen m alternatif sayısını veya yapılan deneysel çalışmada deney sayısını ifade etmektedir. Bir kriterin e_j değeri bire ne kadar yakınsa karar problemi içerisindeki önemi azalmaktadır.

Adım 3: Kriterlerin farklılaşma derecelerinin hesaplanması

Entropi değerlerinin hesaplanmasından sonra değerlendirme kriterleri tarafından sağlanan bilginin farklılaşma dereceleri Eş. 5.41 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. d_j değerinin yüksek olması karar verme problemi açısından ayırım gücünün yükselmesine ve önem ağırlık değerinde benzer şekilde yüksek olmasına neden olmaktadır.

$$d_j = 1 - e_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5.41)$$

Adım 4: Kriter ağırlıklarının hesaplanması

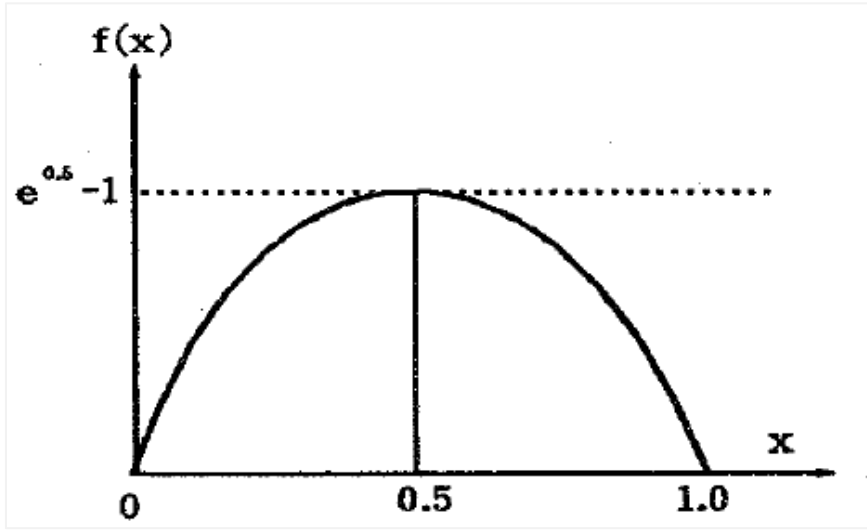
Kriterlerin farklılaşma derecelerinin belirlenmesinden sonra her bir kriterin ağırlığı veya bir başka ifade önem ağırlığı Eş. 5.42 kullanılarak farklılık derecelerinin normalize edilmesiyle

hesaplanmaktadır. Önem ağırlığı 0 ile 1 arasında bir değer almakta ve kriter ağırlıklarının toplamı bire (1) eşit olmaktadır.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad 0 \leq w_j \leq 1 \text{ ve } \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (5.42)$$

Gri entropi yöntemi

Kriterlerin ağırlıklandırılmasında sıklıkla sürekli entropi yöntemleri kullanılmaktadır. Fakat pratik sistemlerde, her bir terimin entropisi ayrıktır. Problemler sürekli entropi yöntemiyle çözülebilmelerine rağmen halen yapılarında bazı belirsizlikleri barındırmaktadır. Bu nedenle Wen ve diğerleri [155] tarafından gri sistem teorisinin “en az bilgi teorisi” kavramı kullanılarak gri entropi yöntemi geliştirilmiştir. Sürekli entropi türünde Şekil 5.4’de verilen eşleme fonksiyonu (mapping function) $f_i: [0,1] \rightarrow [0,1]$ aralığında tanımlanmış durumundayken $f_i(0) = 0$, $f_i(x) = f_i(1 - x)$ ve $f_i(x)$ $x \in (0,0,5)$ aralığında monotonik bir artan olma şartlarını sağlamalıdır. Bu nedenle ağırlık fonksiyonu $w_e(x_{ij})$ gri entropi ölçümünde eşleme fonksiyonu olarak Eş. 5.43’de verildiği gibi kullanılmaktadır [155].



Şekil 5.4. Sürekli entropi türü [155]

$$w_e(x_{ij}) = x_{ij}e^{(1-x_{ij})} + (1 - x_{ij})e^{x_{ij}} - 1 \quad (5.43)$$

Eşleme fonksiyonunun maksimum değeri $e^{0.5} - 1 = 0,6487$ olarak, Şekil 5.4’de de görüldüğü gibi $x = 0,5$ değerinde olmaktadır. Bu nedenle Wen ve diğerleri [155] tarafından

geliştirilen kriter ağırlık fonksiyonu gri entropi yöntemi ile Eş. 5.44'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$W = \frac{1}{(e^{0,5} - 1)m} \sum_{i=1}^m w_e(x_{ij}) \quad (5.44)$$

Gri entropi yönteminde Shannon entropi yöntemine benzer olarak bir takım işlem adımları bulunmaktadır. Wen ve diğerleri [155], Rao ve Yadava [156] ve Kuo ve diğerleri [157] tarafından tanımlanmış olan bu adımlar aşağıda listelenmiştir.

Adım 1: Normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulması

Pozitif değerlere sahip karar matrisi Eş. 5.45 kullanılarak normalize edilmektedir.

$$D_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (5.45)$$

Adım 2: Normalizasyon katsayısının hesaplanması

Her bir performans kriterinin gri entropisinin hesaplanmasında kullanılan K normalizasyon katsayısı Eş. 5.46 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$K = \frac{1}{(e^{0,5} - 1)m} = \frac{1}{0,6487m} \quad (5.46)$$

Burada, m alternatif sayısını yani toplam deney sayısını ifade etmektedir.

Adım 3: Her bir performans kriterinin gri entropi değerinin hesaplanması

Peformans kriterlerinin gri entropi değerleri Eş. 5.47 kullanılarak elde edilmektedir. Bir kriterin e_j değeri bire ne kadar yakınsa karar problemi içerisindeki önemi azalmaktadır.

$$e_j = K \sum_{i=1}^m w_e(D_{ij}) \quad (5.47)$$

Normalize karar matrisindeki değerlerin kullanılması ile $w_e(D_{ij})$ eşleme fonksiyonu Eş. 5.48'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$w_e(D_{ij}) = D_{ij}e^{(1-D_{ij})} + (1 - D_{ij})e^{D_{ij}} - 1 \quad (5.48)$$

Adım 4: Toplam gri entropi değerinin hesaplanması

Her bir değerlendirme kriterine ait gri entropi değeri hesaplandıktan sonra toplam gri entropi değeri Eş. 5.49 kullanılarak aşağıda gibi bulunmuştur.

$$E = \sum_{j=1}^n e_j \quad (5.49)$$

Burada, n değerlendirme kriteri sayısını ifade etmektedir.

Adım 5: Kriterlerin bağıl ağırlıklarının hesaplanması

Entropi değerlerinin hesaplanmasından sonra değerlendirme kriterleri tarafından sağlanan bilginin bağıl ağırlıkları Eş. 5.50 kullanılarak toplam gri entropiye göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\lambda_j = \frac{1 - e_j}{m - E} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5.50)$$

Adım 6: Kriterlerin normalize edilmiş ağırlık değerlerinin hesaplanması

Kriterlerin bağıl ağırlıklarının belirlenmesinden sonra her bir kriterin normalize ağırlığı, bağıl ağırlık değerlerinin normalize edilmesiyle Eş. 5.51 kullanılarak belirlenmektedir. Burada en yüksek orana sahip kriterin performans üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu ifade edilmektedir.

$$\beta_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad (5.51)$$

5.4.4. Varyans analizi (ANOVA)

Değişkenlerin analizi olarak tanımlanan ANOVA (Analysis of Variance), belirlenen parametrelerin istatistiki olarak sonuç (cevap) değişkeni üzerinde hangi oranda etkisinin olduğunun belirlenmesi için kullanılmaktadır [129]. ANOVA, bağımlı değişken üzerinde ölçülen toplam varyansı kaynaklarına veya bileşenlerine ayırmamıza (bölmemize) izin veren istatistiksel bir süreçtir [136]. ANOVA ile sonuç üzerinde hangi girdi faktörlerinin ne kadar etkin oldukları ve istatistiki olarak güvenilirlikleri test edilmektedir [140]. Bağımsız değişkenler ile açıklanmaya çalışılan bağımlı değişkenler arasında uyum olup olmadığı, eğer uyum söz konusu ise bunun seviyesi ANOVA ile belirlenmektedir. ANOVA analizinde her bir sonuç veya cevap değişkeninin uygun olan yaklaşım ile belirlenmiş S/N oranlarına ihtiyaç duyulmaktadır. S/N belirleme yaklaşımlarında hangisi kullanılırsa kullanılsın, parametrelerin optimal değeri en büyük S/N oranına sahip değer ile sağlanmaktadır [147]. Varyans analizi sonucunda işleme etki eden parametrelerin performansı arasındaki farklar detaylı incelenmektedir [158]. ANOVA yaklaşımı istatistik bilim dalında çalışmalar yapan İngiliz Fisher tarafından geliştirilmiştir. Bu nedenle ANOVA yaklaşımına F testi isimlendirmesi de yapılmaktadır [159]. Varyans analizinde kareler toplamı (SS), ortalama kareler toplamı (SS_m), toplam kareler toplamı (SS_T), serbestlik derecesi (df) vb. nicelikler hesaplanmakta ve faktörlerin sonuç üzerindeki etkisi böylece matematiksel olarak elde edilmektedir. Belirlenen S/N oranlarına bağlı olarak öncelikle toplam kareler toplamının Eş. 5.52’de verildiği gibi hesaplanması gerekmektedir.

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (S/N)_i^2 + SS_m \quad (5.52)$$

Burada, SS_T toplam kareler toplamını, $(S/N)_i$ i. seviyedeki sonuç parametresinin S/N kareler toplamını ve SS_m ise ortalama kareler toplamını ifade etmektedir [129, 144, 158-160]. SS_m ifadesi Eş. 5.53 kullanılarak, her bir seviyedeki sonuç parametresinin kareler toplamının toplam deney sayısına bölünmesi ile elde edilmektedir [129, 144, 158-160].

$$SS_m = \frac{\sum_{i=1}^n (S/N)_i^2}{n} \quad (5.53)$$

Deneyisel çalışmada, sonucu etkileyen her bir tasarım faktörünün kareler toplamı Eş. 5.54 ile belirlenmektedir.

$$SS_{faktör} = \frac{\sum_{i=1}^n (S/N)_{faktör_i}^2}{N} - SS_m \quad (5.54)$$

Burada, $SS_{faktör}$ incelenen tasarım faktörünün kareler toplamını, $(S/N)_{faktör_i}$ i. seviyedeki faktörün kareler toplamını, N ise faktörlerin her bir seviyedeki tekrar (yineleme) sayısını ifade etmektedir [129, 144, 158-160].

Toplam kareler toplamından tasarım faktörlerinin kareler toplamının çıkarılması ile hata faktörünün kareler toplamı olan SS_e hesaplanmaktadır. Bu değer Eş. 5.55’de verildiği gibi bulunmaktadır [129, 144, 158-160].

$$SS_e = SS_T - SS_{faktör} \quad (5.55)$$

ANOVA yaklaşımında serbestlik derecelerinin belirlenmesi önemli bir husustur. Çünkü bir sonuca ulaşabilmek için gerçekleştirilmesi gereken bağımsız karşılaştırmaların sayısı serbestlik derecesi ile belirlenmektedir [159]. Kareler toplamında olduğu gibi serbestlik derecelerinin toplamı da toplam serbestlik derecesini oluşturmaktadır [160]. Bunun yanında toplam deney sayısının bir eksiği de toplam serbestlik derecesini vermekte ve Eş.5.56’da verildiği gibi toplam deney sayısından bir çıkarılması ile bulunmaktadır [129, 144, 158-160].

$$df_{toplaml} = n - 1 \quad (5.56)$$

Bir tasarım faktörü veya sütunun serbestlik derecesi de seviye sayısının bir eksiği olarak tanımlanmakta ve aşağıda verilen Eş. 5.57 ile hesaplanmaktadır [129, 144, 158-160].

$$df_{faktör} = k - 1 \quad (5.57)$$

Hataların serbestlik derecesi ise toplam serbestlik derecesinden faktörlerin veya faktörlerin etkileşimlerinin çıkartılması ile Eş. 5.58’de verildiği gibi bulunmaktadır [129, 144, 158-160].

$$df_e = df_{toplamlam} - df_{faktör} \quad (5.58)$$

ANOVA sonuçlarından hesaplanabilen bir diğer tanımlayıcı istatistikte sıkça duyulan varyans değeridir. Varyans (V) incelenen tasarım faktörünün kareler toplamının aynı faktöre ait serbestlik derecesine bölümünden Eş. 5.59'da verildiği gibi hesaplanmaktadır [129, 144, 158-160]. Varyansa aynı zamanda genel olarak hata varyansı tanımlaması da yapılabilmektedir. Hata varyansı, kontrol edilemeyen hata faktörlerinin sebep olduğu değişimin ölçüsü ve deneylerdeki ölçüm hatalarını da içine alan bir terim olarak ifade edilmektedir [158, 159].

$$V_{faktör} = \frac{SS_{faktör}}{df_{faktör}} \quad (5.59)$$

ANOVA sonucunda çıktı veya cevap değişkenine etki eden her bir girdi parametresi (faktörü) için yüzde olarak katkı oranı (Percentage Contribution Ratio, PCR) Eş. 5.60'da verildiği gibi hesaplanmaktadır [109, 129, 161].

$$\%PCR = \frac{|SS_{faktör} - V_{hata} df_{faktör}|}{SS_T} \times 100 \quad (5.60)$$

Burada bulunan V_{hata} ifadesi Eş. 5.59'da her bir faktör için verilen varyans ifadesine benzer şekilde hesaplanmaktadır [129, 144, 158-160].

Girdi parametrelerinin sonuç üzerindeki etkisi incelenirken PCR değerlerinin yanı sıra F testi değerleri de kullanılabilir. Her bir tasarım faktörü için hesaplanmış olan $F_{faktör}$ değeri ile F_{tablo} değeri karşılaştırılmakta ve belirlenen faktör için F_{tablo} değerinden büyük olan değere sahip olan parametrenin sonucuna olan etkisinin varlığından söz edilebilmektedir [129, 144, 158-161]. Standart F testi uygulanırken, hataların eşit sapmalarla normal dağıldığı ve bağımsız olduğu varsayımında bulunulmakta ve varsayımlar gerçekleştirilmediği takdirde elde edilen analiz sonuçlarının doğruluğundan emin olunamamaktadır [158, 159]. Fakat F testi varsayımlarının, sapmalara karşı duyarsız olmasından dolayı bazı varsayımların sağlanmaması durumunda da kullanılabileceği Phadke [162] tarafından ifade edilmiştir. Böylece hem PCR hem de F testi ile en etkili parametre belirlenebilmektedir [129, 161]. Her

faktörün $F_{\text{faktör}}$ değeri Eş. 5.61 kullanılarak ele alınan faktörün varyansının hata varyansına oranlanması ile hesaplanmaktadır [129, 144, 158-161].

$$F_{\text{faktör}} = \frac{V_{\text{faktör}}}{V_{\text{hata}}} \quad (5.61)$$

F_{tablo} değeri standart olarak oluşturulmuş tablolardan alınarak kullanılmaktadır. F_{tablo} değerinin bulunmasında Eş. 5.62’de verilen gösterim şekli kullanılmaktadır [158].

$$F_{\text{tablo}} = F_{\alpha, df_1, df_2} \quad (5.62)$$

Burada, α riski, $1 - \alpha$ güven aralığını, df_1 payın serbestlik derecesini ve df_2 paydanın serbestlik derecesini ifade etmektedir. Yapılan çalışmada %95 güvenilirlik seviyesinde analizler yapıldığı için α riski ifadesi 0,05 değerine eşittir. Örneğin tel çapının (d) 2 mm, 5 mm ve 8 mm olmak üzere 3 seviyesi bulunmaktadır. Tel çapı için F_{tablo} değeri $F_{0,05,2,2}$ olarak Demirutku ve diğerleri [163] tarafından hazırlanmış olan standart tablodan 19 olarak bulunmaktadır. Buradan hareketle ANOVA sonucunda elde edilen F test değerlerinden her bir faktör için bulunan $F_{\text{faktör}}$ değerlerinin bulunan 19 değerinden büyük olması durumunda sonuç değişkeni üzerinde etkisinin olduğu yorumu yapılabilmektedir. Benzer bir uygulama Kuram [140] tarafından da ifade edilmiştir.

YTITA içeren dikdörtgen şekilli bir GIİED sisteminde bulunan FDM’nin enerji depolama performansının Taguchi tabanlı GİA yöntemiyle incelenmesi amacıyla yapılmış olan tez çalışmasında, ergime süresi (Δt), zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİO), enerji depolama verimi (η) ve enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİO) üzerine olan etkileri incelenen 3 faktör vardır. İfade edilen etki miktarlarının belirlenmesi amacıyla Minitab 17 yazılımı kullanılarak %5 anlamlılık seviyesi ve %95 güvenilirlik seviyesinde ANOVA çalışması yapılmıştır. ANOVA çalışmasının sonuç çizelgeleri, aynı yazılımın ara yüzünden elde edilmiştir.

5.4.5. Doğrulama deneylerinin yapılması ve güven aralığının hesaplanması

Optimizasyon işlemi sonucunda bulunan en iyi deney diziliminin doğruluğu bu aşamada kontrol edilmektedir. İlk olarak bir başlangıç deney dizilimi belirlenmektedir. Başlangıç

deney dizilimi S/N oranlarına bağılı olarak elde edilen Taguchi analizi eğrilerinde bulunan ortalama eğriye yakın olan faktör seviyesinin başlangıç diziliminde kullanılmasıyla elde edilmektedir. Taguchi tabanlı GİA yöntemiyle optimize edilen deneysel veya sayısal çalışmalarda, hesaplanan veya ölçüm sonucunda bulunan verilerin güven aralıklarının da belirlenmesi gerekmektedir [134, 141, 164-168]. Güven aralığının belirlenmesi optimizasyon işlemi ile belirlenen deney diziliminin gerçekten optimum dizilim olup olmadığının tespiti için kullanılmaktadır [134, 141, 164-168]. Belirlenen en iyi deney diziliminin belirlenen sonuç değerlendirme kriterlerine göre tahmini sonuçları Mintiab 17 yazılımından direkt olarak bulunabileceği gibi Wen ve diğerleri [155], Rao ve Yadava [156], Kuo ve diğerleri [157] ve Ross [160] tarafından ifade edilen eşitliklerin kullanılmasıyla da belirlenebilmektedir. Elde edilen sonuçların güven aralığı (confidence interval, CI) aşağıda verilen Eş. 5.63 ve Eş. 5.64 kullanılarak hesaplanmaktadır [134, 141, 155-157, 160, 164-168].

$$CI = \sqrt{F_{\alpha:1,V_2} V_e \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (5.63)$$

$$n_{eff} = \frac{T_{exp}}{1 + T_{dof}} \quad (5.64)$$

Burada, V_2 serbestlik derecesi hatasını, α önem düzeyini, $F_{\alpha:1,V_2}$ belirlenen önem düzeyi ve serbestlik derecesinde okunan F_{tablo} değerini, V_e hata varyansını, r doğrulama için tekrar sayısını, n_{eff} etkili tekrar sayısını, T_{exp} toplam deney sayısını ve T_{dof} toplam ana faktör serbestlik derecesini ifade etmektedir [134, 141, 155-157, 160, 164-168]. Hesaplanan güven aralığı ile tahmini olarak bulunan optimum deney sonuçları aşağıda verilen Eş. 5.65'deki gibi birlikte gösterilmektedir.

$$|Optimum_{tahmin} - CI| < Optimum_{deneysel} < |Optimum_{tahmin} + CI| \quad (5.65)$$

5.4.6. Regresyon analizi

Regresyon analizi, elde olan bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkende meydana gelebilecek değişimlerin belirlenmesine imkân tanıyan matematiksel modellerin

geliştirilmesi sürecidir. Ölçülen sonuç parametrelerinin deney yapılmadan belirlenebilmesi için regresyon analizi ile elde edilen matematiksel eşitliklerin kullanılması gerekmektedir [140]. Regresyon denklemi, bağımsız ve bağımlı değişken gibi iki değişken arasındaki ilişkinin matematiksel veya bir başka ifade ile fonksiyonel biçimini göstermekle kalmaz, ileriye dönük hesaplamalar için tahmin yapılması olanağını da sağlamaktadır [145]. Ölçülen sonuç değerlerini temsil eden en iyi eğri denklemini belirlemek için kullanılan en yaygın yöntem, hataların kareler toplamını minimum yapan bir eğri denklemi türetme esasına dayanan en küçük kareler (EKK) yöntemidir [140, 145]. EKK yöntemi lineer regresyon işlemlerini içermektedir. Bunun yanında lineer olmayan (nonlinear) regresyon işlemlerine göre türetilen nonlinear regresyon eşitlikleri de bulunmaktadır. Birinci dereceden lineer regresyon eğrilerinin genel ifadesi Eş. 5.66'da verilmiştir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (5.66)$$

Burada, β her bir terimin katsayısını, k girdi değişkeni sayısını ve ϵ hatayı ifade etmektedir [140]. Çoklu regresyon analizinde yer alan korelasyon katsayısının karesi (R^2) regresyon modelindeki bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı olarak tanımlanmaktadır [169, 170]. Bu değer 0-1 aralığında ve ne kadar yüksek ise eldeki regresyon eşitliği, bağımlı değişkeni o derecede iyi tahmin edebilmektedir.

Yapılan tez çalışması kapsamında Taguchi L_9 ortogonal deney dizilimi kullanıldığı için toplamda 9 adet deney yapılmıştır. Yapılan bu 9 deneyden ilk ve son deney regresyon eşitliğinin türetilmesinde yer almamış ve onun yerine bu iki değer türetilen regresyon eşitliğinin test edilmesinde kullanılmıştır. Kalan 7 deney sonucu regresyon eşitliğinin eğitilmesinde kullanılmıştır. İstatistiksel olarak elde edilen regresyon eşitliklerinin doğruluğu veya bir başka ifade ile bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranları, Bae ve diğerleri [171] tarafından detaylıca açıklanan ortalama mutlak yüzde hata (mean absolute percentage error (MAPE), regresyon katsayısı (belirleme katsayısı, determinasyon katsayısı, R^2) ve hataların ortalama karekökü (root mean square error, RMSE) ifadelerinin hesaplanması ile açıklanmaya çalışılmıştır. RMSE, MAPE ve R^2 ifadeleri aşağıdaki Eş. 5.67-5.70 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$MAPE = \left(\frac{100}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|e_j|}{|A_j|} \right) \quad (5.67)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_j^2}{n}} \quad (5.68)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (e_j)^2}{\sum (A_j - \bar{A})^2} \quad (5.69)$$

$$e_j = A_j - P_j \quad (5.70)$$

Burada, A_j deneysel veya sayısal çalışma sonucunda ölçülen gerçek değeri, P_j regresyon analizi sonucunda bulunan tahmini değeri, e_j hata miktarını, $|e_j|$ mutlak hata miktarını, n toplam deney sayısını ve $\bar{A}$ ölçülen gerçek değerlerin ortalamasını ifade etmektedir [141, 169, 171]. Belirtilen hata analizi yöntemlerinin hepsinde de en küçük değerler regresyon eşitliğinin daha iyi tahmin edilebildiğini ifade etmektedir [141, 169, 171].

Tabachnick ve Fidell [172] ve Montgomery ve Runger [174]'in ifade ettiği açıklamalara göre regresyon katsayısı (belirleme katsayısı, determinasyon katsayısı) olarak ifade edilen R^2 değeri, regresyon denklemlerinin türetilmesi aşamasında kullanılan bağımsız değişken sayısının artışına bağlı olarak yüksek bulunmaktadır. Fakat R^2 değerinin yüksek bulunması elde edilen regresyon denkleminin bağımlı değişkeni iyi ifade etme yeteneği üzerinde kesin bir sonuç bildirmemektedir. Bu nedenle R^2 yerine ayarlı veya düzeltilmiş regresyon katsayısı olarak ifade edilen R^2_{adj} ($R^2_{adjusted}$)'nin kullanımı daha uygundur. R^2_{adj} değeri determinasyon katsayısına benzer şekilde 0-1 aralığında bir değer almakta ve 1'e yaklaştıkça elde edilen regresyon denklemi ile bağımlı değişken daha az hata ile tahmin edilebilmektedir. Uygulamada bu değer negatif çıkabileceği durumlarda söz konusudur. Fakat pratik hesaplamalarda ve Minitab, SPSS vb. istatistik yazılımlarında negatif bir sonuç ile karşılaşıldığında R^2_{adj} değeri sıfır olarak alınmaktadır [172-174].

$$R^2_{adj} = 1 - \left(\frac{\sum_{j=1}^n (e_j)^2}{\sum (A_j - \bar{A})^2} \right) \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \quad (5.71)$$

Burada, n deney (gözlem) sayısını ve p regresyon modelindeki terim sayısını ifade etmektedir [172-174].

6. BULGULAR - TARTIŞMA

Yapay güneş ışınlamı altında, dikdörtgen bir hacim içerisinde bulunan FDM'nin enerji depolama performansının incelenmesi bu tez çalışmasının ana kapsamını oluşturmaktadır. FDM'nin düşük ısıl iletkenlik dezavantajını geliştirmek için GIIED ünitesi içerisine yay tipi ısı transferi arttırıcı (YTITA) yapılar eklenmiştir. YTITA'ların tel çapı (d, mm), yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) değişimlerinin enerji depolama performansına olan etkisi Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak oluşturulan L₉ ortogonal dizilime göre yapılan deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Enerji depolama performansının incelenmesinde, FDM'nin ergime süresi (Δt), ergime sürelerinin oranlanmasıyla türetilmiş zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİO), GIIED ünitesinin enerji depolama verimi (η) ve enerji depolama verimlerinin oranlanmasıyla türetilmiş enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİO) gibi 4 farklı sonuç parametresinin değişimi dikkate alınmıştır. L₉ ortogonal dizilime göre oluşturulan deney dizilimlerinden hangisinin en iyi (optimum) sonucu vereceğinin belirlenmesi aşamasında çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden olan gri ilişkisel analiz (GİA) yöntemi kullanılmıştır. Yapılan tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel analizler ve Taguchi tabanlı GİA yöntemine bağlı optimizasyon sürecinin sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

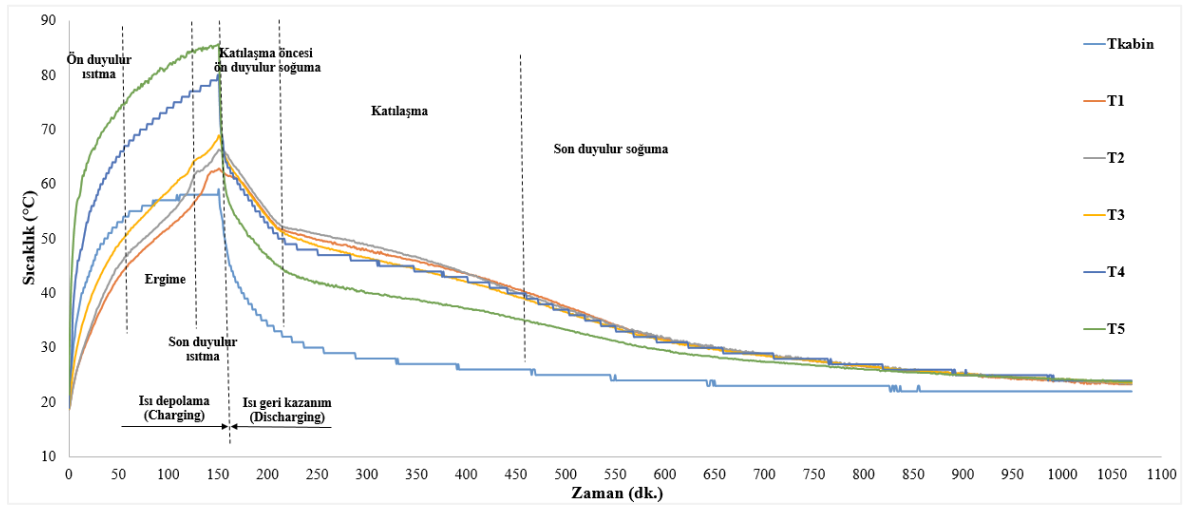
6.1. Zamana Bağlı Sıcaklık Dağılımı

Çizelge 6.1. Deneylerde kullanılan L₉ ortogonal deney tasarımı

Deney nu.	Semboller			Tel çapı (d, mm)	Yay çapı (D, mm)	Yay adımı (p, mm)	Deney dizilimi
	A	B	C				
1	1	1	1	2	20	18	A ₁ B ₁ C ₁
2	1	2	2	2	30	24	A ₁ B ₂ C ₂
3	1	3	3	2	40	30	A ₁ B ₃ C ₃
4	2	1	2	5	20	24	A ₂ B ₁ C ₂
5	2	2	3	5	30	30	A ₂ B ₂ C ₃
6	2	3	1	5	40	18	A ₂ B ₃ C ₁
7	3	1	3	8	20	30	A ₃ B ₁ C ₃
8	3	2	1	8	30	18	A ₃ B ₂ C ₁
9	3	3	2	8	40	24	A ₃ B ₃ C ₂

Yapılan tez çalışmasında kullanılan L₉ ortogonal deney tasarımı ve her bir dizilimin temsil ettiği faktörlerin detaylı listesi Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Tanımlanan her bir deney dizilimine bağlı olarak performans deneyleri yapılmıştır. GIIED ünitesi içerisinde bulunan ısı çiftlerinden ölçülen sıcaklık değerlerine bağlı olarak zamana bağlı sıcaklık değişimi eğrileri elde edilmiştir. Her bir deney dizilimi için ayrı ayrı çizilen eğriler birbiri ile benzerlik gösterdiği için sadece A₃B₁C₃ dizilimine ait zamana bağlı sıcaklık değişimi eğrisi Şekil 6.1’deki gibi örnek olarak sunulmuştur. Diğer dizilimlere ait eğrilere Ek-1’de yer verilmiştir.



Şekil 6.1. A₃B₁C₃ deney dizilimine ait zamana bağlı sıcaklık değişimi

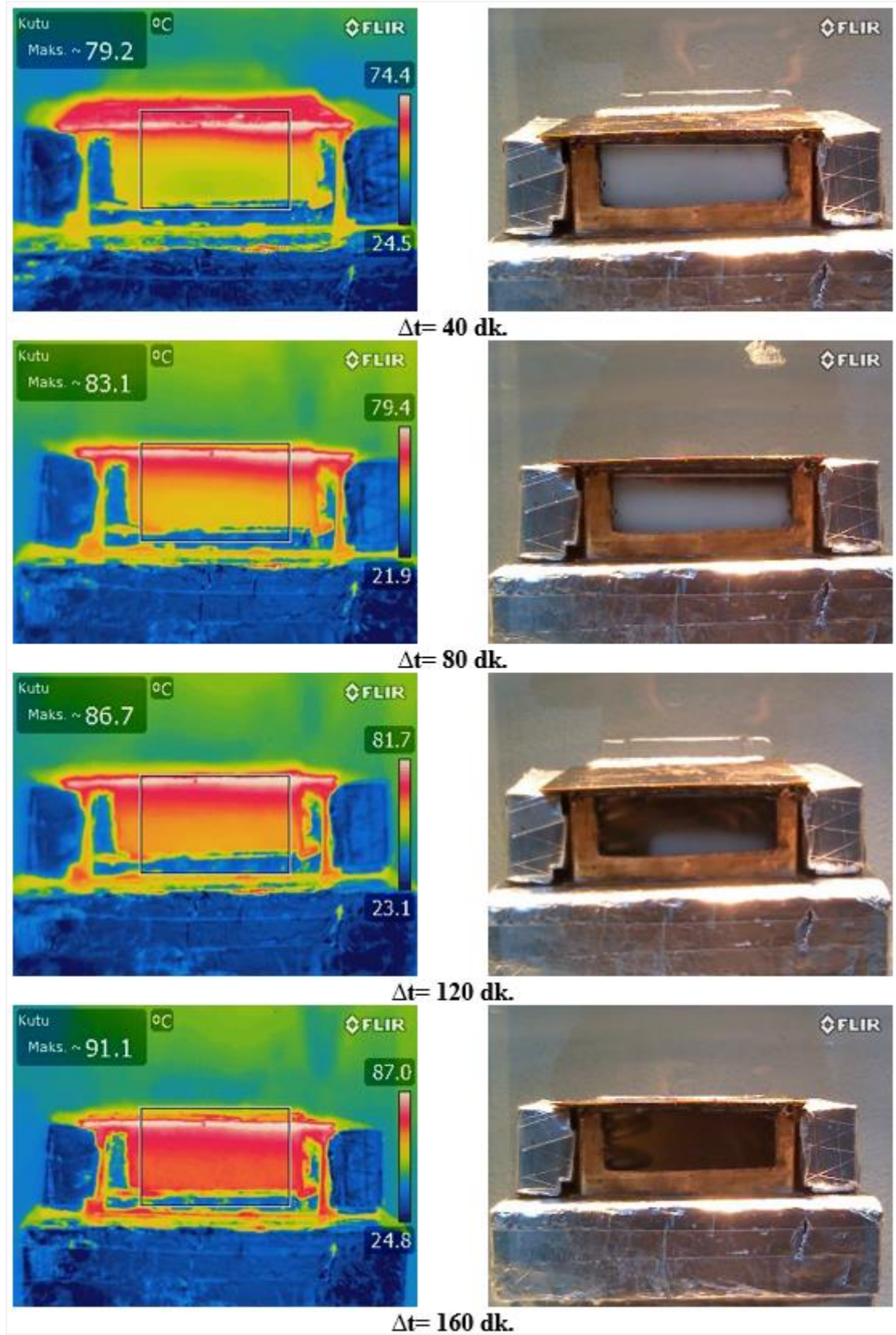
Şekil 6.1’de verilen eğri, Acır ve Canlı [5], Arshad ve diğerleri [123] ve Baby ve Balaji [175] tarafından yayımlanmış olan çalışmalar referans alınarak tanımlanmıştır. Yapay güneş ışıınımı kaynağının (solar simülatör) açılması ile GIIED ünitesi tarafından ısının depolanması (charging) eğrinin ilk temel bölümünü oluşturmaktadır. T₁ numaralı ısı çiftten 60°C sıcaklık değerinin okunmasından sonra ısı kaynağının kapatılmasıyla ısı geri kazanım (discharging) sürecinin başlaması ise sonraki temel bölümü oluşturmaktadır. Yapılan tez çalışması kapsamında sadece ısı depolama bölümü üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

İsı depolama ve ısı geri kazanım bölümleri detaylı incelendiğinde her bölüm 3 farklı kısımdan oluşmuştur. Işınım kaynağının açıldığı andan ergimenin başladığı ana kadarki kısım ön duyulur ısıtma olarak ifade edilmiştir. Bu bölümde EP tarafından emilen yapay

güneş ışınlamı YTITA'lar ve GIIED ünitesinin yan duvarları vasıtaıyla FDM'ye aktarılmıştır. Böylece hızlı bir sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Bu aşamada duyulur ısı depolanmaya başlamıştır. Daha sonrasında ise FDM'nin ergime derecesine ulaşılan bölgelerde ergime başlamıştır. Faz değişiminin meydana geldiği bu bölgeye ise ergime bölgesi denilmiştir. Bu bölgedeki sıcaklık değişimlerinde yavaş bir dağılım söz konusudur. Faz değişimine bağlı olarak FDM tarafından gizli ısı depolanmıştır. Gizli ısının yanında düşük de olsa bir duyulur ısının da depolandığı Şekil 6.1 detaylı incelendiğinde görülebilmektedir. FDM'nin kapalı bir hacim içerisinde bulunmasından dolayı içerisinde ergimemiş bir bölgenin kalmaması için T₁ numaralı ısı çiftten 60°C sıcaklık değerinin okunmasına kadar solar simülatör açık konumda tutulmuştur. Bu bölge ise son duyulur ısıtma olarak ifade edilmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak bu bölgede de duyulur ısı depolanmıştır. Isı depolama aşamasında EP'nin alt ve üst yüzeyindeki sıcaklıkları belirlemek için kullanılan T₄ ve T₅ numaralı ısı çiftlerin göstermiş oldukları sıcaklık değerleri diğer ısı çiftlerden daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni GIIED ünitesi içerisinde tüm deney dizilimleri için 0,5 kg FDM bulunmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Çünkü EP'nin alt yüzeyine direkt olarak FDM teması olmadığının düşünülmesinden dolayı EP tarafından emilen ısı hemen FDM'ye aktarılamamıştır. Bu nedenle EP'den ölçülen sıcaklıklar daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca FDM kütlelerinin sabit tutulmasındaki amaç önceki "Bölüm 5.1. Deney Sisteminin Tasarımı" başlığı altında detaylıca açıklanmıştır.

Isı geri kazanım aşamasında ise yapay ışınlam kaynağının çalışmaması dolayısıyla ilk olarak katılma öncesi ön duyulur soğuma evresi oluşmuştur. Burada tüm ısı çiftler tarafından ölçülen sıcaklık değerlerinde keskin bir düşüş meydana gelmiştir. Bu bölgede depolanmış olan toplam ısı enerjisinin duyulur formundaki kısmı geri kazanılmaya başlamıştır. Daha sonraki aşamada ise katılma evresine geçilmiştir. Bu aşamada ergimiş haldeki FDM faz değiştirerek bünyesinde depolamış olduğu gizli ısı enerjisini dışarıya bırakmakta yani soğuyarak katılma evresine ulaşmıştır. Katılmanın tamamlanmasından sonra son duyulur soğuma evresine ulaşılmıştır. Tüm ısı çiftlerinden benzer sıcaklık değerleri elde edilene kadar ısı geri kazanım süreci devam etmiş ve duyulur formdaki ısı geri kazanılmıştır.

Isı çiftler kullanılarak incelenen sıcaklık ve faz değişim aşamalarının görselliğini artırmak için örnek olarak A₃B₃C₂ dizilimine sahip GIIED ünitesindeki FDM'nin zamana bağlı faz değişim süreci FLIR T440 tipi bir termal kamera ile görüntülenmiş ve elde edilen bulgular Resim. 6.1'de sunulmuştur.



Resim 6.1. $A_3B_3C_2$ deney dizilimine ait 40-160 dk. aralığındaki enerji depolama sürecine bağlı termal kamera görüntüleri ve zamana bağlı ergime değişimi

Resim 6.1’deki termal kamera görüntüleri 40 ile 160 dakika arasında her 40 dakikalık süre için elde edilmiştir. Termal kamera görüntülerinin alınabilmesi için $A_3B_3C_2$ dizilimine sahip GIIED ünitesindeki FDM deposunun yan yüzeylerinden biri kesilmiş ve o bölgeye sıvı conta ile 2,5 mm kalınlığındaki cam yapıştırılmıştır. Termal kameranın arayüzündeki emisivite değeri cam yüzeye göre ayarlanmış ve ondan sonra sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.

Resim 6.1 detaylı incelendiğinde ergime beklenildiği gibi ışıyım kaynağından yani emici plakadan FDM deposunun tabanına doğru iletimle ısı transferi mekanizmasıyla yukarıdan aşağıya doğru ilerlemiştir. $A_3B_3C_2$ dizilimine sahip GIIED ünitesindeki FDM’nin emici plakayla tam temasının bulunmadığı açıkça görülmektedir. Daha önceki bölümlerde ifade edildiği gibi emici plakayla tam temasın olması durumunda emici plakadan ölçülen sıcaklık değerleri daha düşük olacak ve FDM’nin ergime süresi kısılacaktır. Fakat FDM kütlelerinin kısıtlayıcı etkisinden dolayı ergime sürelerinde beklenen değerlerden daha uzun süreler elde edilmiştir.

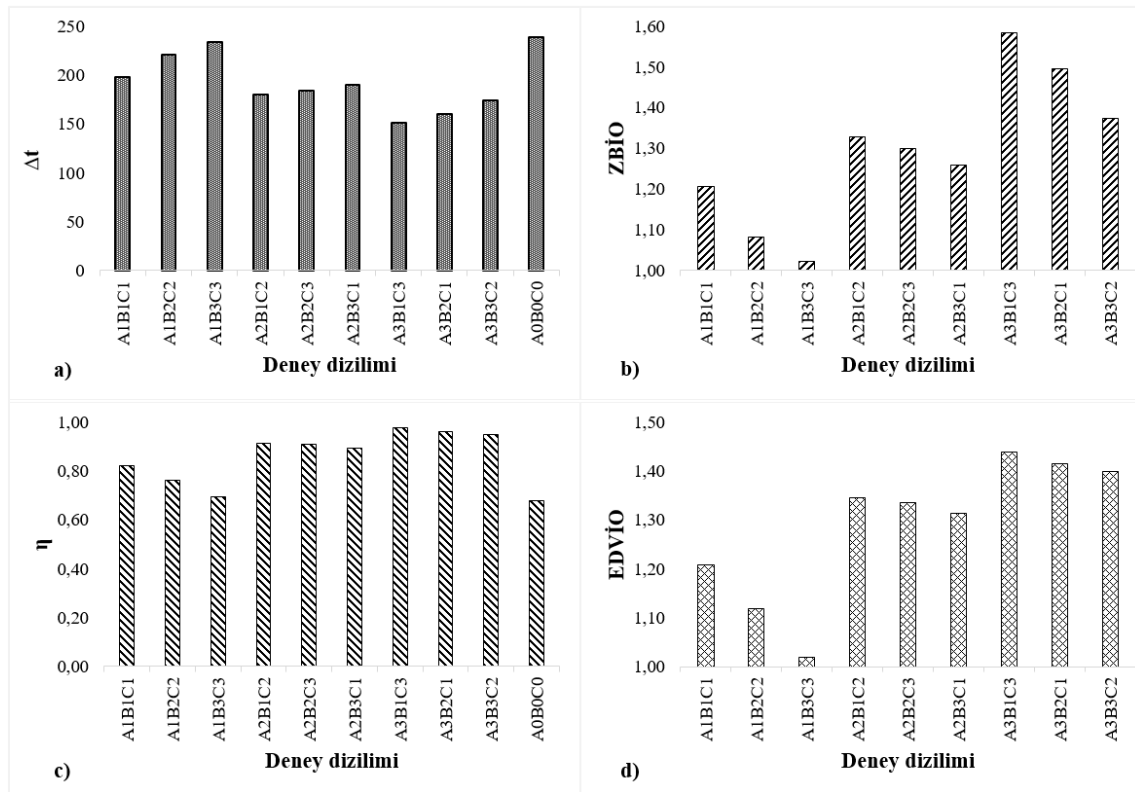
6.2. Taguchi’ye Göre Elde Edilen Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Taguchi deney tasarımına göre belirlenen deney dizilimleri dikkate alınarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 6.2’de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. L_9 ortogonal deney tasarımına göre elde edilen deneysel sonuçlar

Deney nu.	Deney dizilimi	Ergime süresi (Δt , dk)	Zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİO)	Enerji depolama verimi (η , %)	Enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİO)
1	$A_1B_1C_1$	198	1,20707	0,82061	1,20786
2	$A_1B_2C_2$	221	1,08145	0,76011	1,11881
3	$A_1B_3C_3$	234	1,02137	0,69219	1,01884
4	$A_2B_1C_2$	180	1,32778	0,91391	1,34518
5	$A_2B_2C_3$	184	1,29891	0,90700	1,33502
6	$A_2B_3C_1$	190	1,25789	0,89219	1,31322
7	$A_3B_1C_3$	151	1,58278	0,97736	1,43858
8	$A_3B_2C_1$	160	1,49375	0,96112	1,41467
9	$A_3B_3C_2$	174	1,37356	0,94974	1,39792
10	$A_0B_0C_0$ (yaysız)	239	-	0,67939	-

YTITA içermeyen boş haldeki GIIED ünitesinde FDM'nin ergime süresi (Δt) ise 239 dk. olarak bulunmuştur. Çizelge 6.2'ye göre tel çapının (d , mm) artması diğer girdi parametrelerinin de değişmesiyle Δt 'nin azalmasını sağlamıştır. Sabit d altında, yay çapı (D , mm) ve yay adımı (p , mm) seviyelerinin küçükten büyüğe doğru yükseltilmesi Δt 'yi artırmıştır. d 'nin 2 mm değerinde sabit olduğu ve D 'nin 20, 30 ve 40 mm değerlerinde sırasıyla değiştiği durumda p değerinin 18 mm'den 30 mm'ye çıkarılması Δt 'nin %15,38 oranında artarak 198 dk.'dan 234 dk.'ya yükselmesine neden olmuştur. Benzer şekilde diğer deney dizilimleri için de d 'nin sabit olduğu durumlarda Δt değerlerinde sırasıyla %3,16 ve %13,22 oranlarında artış meydana gelmiştir. Δt 'nin kısa olması emici plakanın üst orta noktasındaki T_5 numaralı ısı çiftten ölçülen sıcaklık değerlerinin de değişmesine neden olmuştur. T_5 numaralı ısı çiftten ölçülen sıcaklık değerleri deney numarasına göre sırasıyla 92°C, 94°C, 95°, 83,4°C, 85,6°C, 89,9°C, 81,3°C, 82,5°C ve 82,6°C olarak ölçülmüştür. YTITA içermeyen boş durumdaki GIIED ünitesinden ise 96°C sıcaklık değeri okunmuştur.



Şekil 6.2. L_9 ortogonal tasarımına göre deneysel sonuçlar, a) Δt , b) ZBİO, c) η ve d) EDVİO

Sıcaklık değerlerindeki değişim solar simülatörden gelen yapay güneş ışıınının (q , W/m²) miktarıyla ilişkilidir. Δt 'nin artışı q 'nın artmasına ve benzer şekilde ölçülen sıcaklık değerlerinin de yükselmesine neden olmuştur. YTITA kullanılarak emici plakanın üst

yüzeyinden ölçülen maksimum sıcaklık değeri en az %1,04 ile en fazla %15,31 oranında düşürülmüştür. Bunun yanında sıcaklıkların azalması benzer şekilde Δt 'nin azalmasına ve FDM bünyesinde daha fazla enerji depolanmasına imkân sağlamıştır. YTITA kullanılarak GIIED ünitesindeki FDM'nin Δt değerleri, YTITA içermeyen duruma göre en düşük %2,09 ile en fazla %36,82 oranında aşağıya çekilerek kısaltılmıştır. Elde edilen deneysel bulguların deney dizilimine göre değişimleri Çizelge 6.2'deki sayısal sonuçlar kullanılarak Şekil 6.2'deki gibi elde edilmiştir.

YTITA eklenmemiş boş durumdaki GIIED ünitesinde bulunan FDM'nin Δt 'sinin YTITA içeren dolu durumdaki GIIED ünitesinde bulunan FDM'nin Δt 'sine oranlanması ile tanımlanmış olan zamana bağlı iyileştirme oranının (ZBİO) deney dizilimlerine göre değişimi ise Δt 'nin sergilediği davranışın tam tersi şeklindedir. Bu davranış Şekil 6.2.b'de açıkça görülmektedir. Çünkü YTITA içeren yapıdaki FDM'nin Δt 'si ne kadar küçük olursa ZBİO değeri de o kadar yüksek çıkmaktadır. En yüksek ZBİO değeri 1,58278 olarak $A_3B_1C_3$ deney diziliminden elde edilmiştir. d 'nin 2 mm değerinde sabit olduğu, D 'nin 20 ve 30 mm değerlerinde değiştiği deney dizilimlerinde ZBİO değeri en küçük değerden sırasıyla %18,18 ve %5,88 oranında daha yüksek bulunmuştur. En küçük ZBİO değerine ise $A_1B_3C_3$ deney diziliminde 1,02137 olarak ulaşılmıştır. d 'nin 5 mm değerinde sabit olduğu, D 'nin 20, 30 ve 40 mm değerlerinde değiştiği deney dizilimlerinde ZBİO değeri en küçük değerden sırasıyla %30, %27,17 ve %23,16 oranında daha yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde d 'nin 8 mm değerinde sabit olduğu, D 'nin 20, 30 ve 40 mm değerlerinde değiştiği deney dizilimlerinde ise ZBİO değeri en küçük değerden sırasıyla %54,97, %46,25 ve %34,48 oranında daha yüksek bulunmuştur.

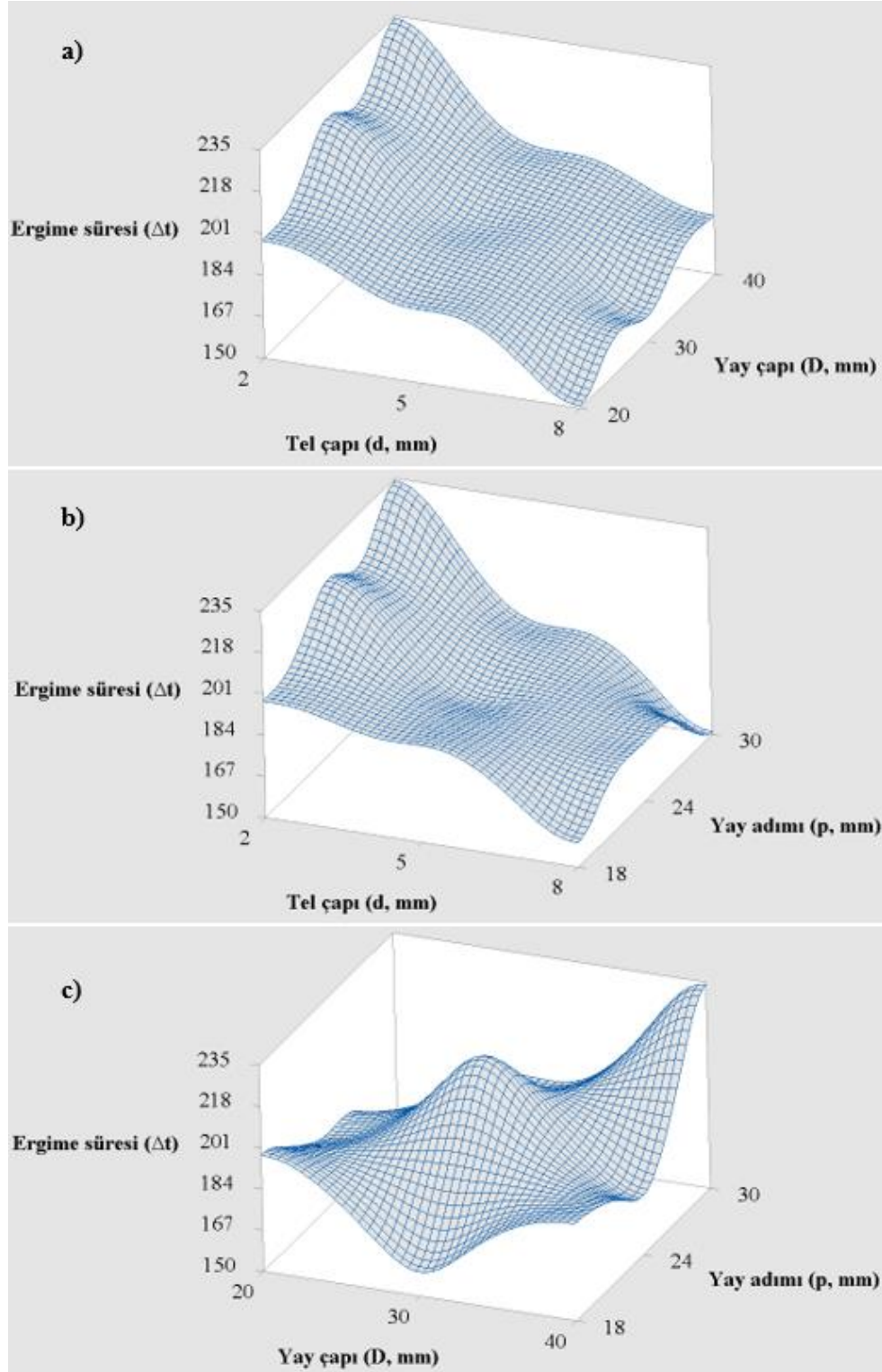
Enerji depolama verimi (η) oranları dikkate alınarak Şekil 6.2.c'deki gibi bir dağılım elde edilmiştir. η ifadesi GIIED ünitesi tarafından depolanan duyulur ve gizli ısıdan oluşan toplam ısı enerjisi miktarının kaynaktan emici plakaya ulaşan enerji miktarına oranı şeklinde ifade edilmiştir (Bkz. Bölüm 5.2.3). YTITA içermeyen durumdaki η ifadesi 0,67939 yani %67,94 olarak elde edilmiştir. Aynı deney dizilimi için elde edilen en yüksek Δt değerine karşılık en düşük η bulunmuştur. Çünkü GIIED ünitesinde kullanılan FDM'nin düşük ısı iletkenliğinden dolayı, kaynaktan gelen enerji FDM tarafından yeterli seviyede depolanamamıştır. T_5 numaralı ısı çiftten ölçülen en yüksek değerden de anlaşılabileceği gibi yapay güneş ışıını FDM bünyesinde depolanmak yerine çevreye ısı enerjisi olarak yayılmıştır. Bu nedenle YTITA içermeyen boş durumdaki deney durumu için en yüksek ısı

kaybı meydana gelmiştir. GIIED ünitesi içerisinde farklı girdi parametrelerine bağlı olarak YTITA kullanılması ile boş durumla kıyaslandığında η değerlerinde %1,88 ile %43,86 oranları arasında bir iyileşme meydana getirilmiştir. En yüksek %43,86 oranında iyileşme ile 0,97736 yani %97,74 oranında η değerine $A_3B_1C_3$ deney diziliminde ulaşılmıştır.

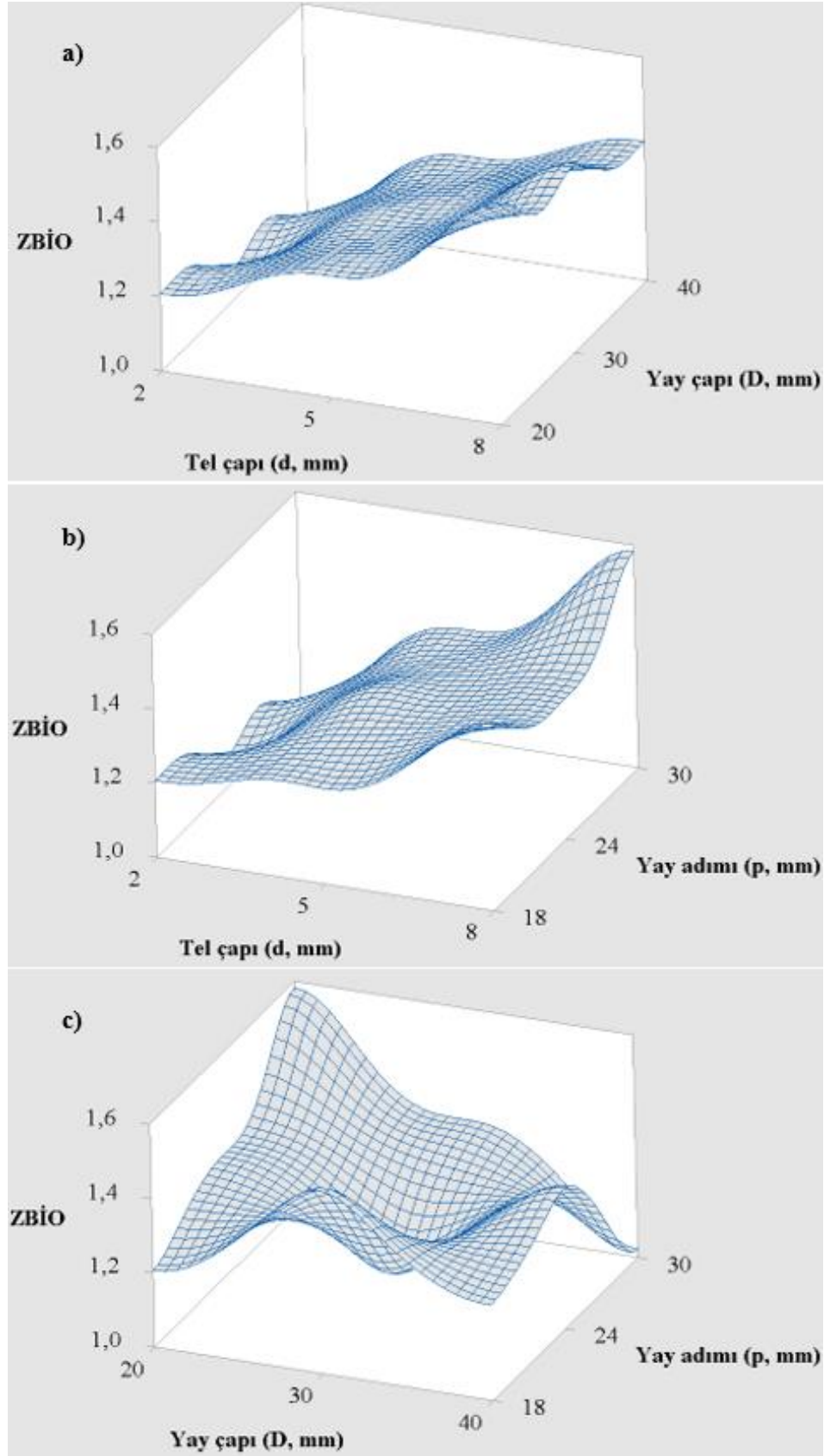
YTITA içeren dolu durumdaki GIIED ünitesinin η ifadesinin YTITA eklenmemiş boş durumdaki GIIED ünitesinin η ifadesine oranlanması ile tanımlanmış olan enerji depolama verimi iyileştirme oranının (EDVİÖ) deney dizilimlerine göre değişimi Şekil 6.2.d’de verilmiştir. EDVİÖ dağılımının sergilediği davranış η ile benzerdir. Çünkü YTITA kullanan GIIED ünitelerinin η ifadeleri ne kadar yüksek ise aynı dizilimlerin EDVİÖ değerleri de yüksek bulunmaktadır. En yüksek EDVİÖ 1,43858 olarak $A_3B_1C_3$ deney diziliminden elde edilmiştir. d’nin 2 mm değerinde sabit olduğu, D’nin 20 ve 30 mm değerlerinde değiştiği deney dizilimlerinde EDVİÖ değeri en küçük değerden sırasıyla %18,55 ve %9,81 oranında daha yüksek bulunmuştur. En küçük EDVİÖ değerine ise $A_1B_3C_3$ deney diziliminde 1,01884 olarak ulaşılmıştır. d’nin 5 mm değerinde sabit olduğu, D’nin 20, 30 ve 40 mm değerlerinde değiştiği deney dizilimlerinde EDVİÖ değeri en küçük değerden sırasıyla %32,03, %31,03 ve %28,89 oranında daha yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde d’nin 8 mm değerinde sabit olduğu, D’nin 20, 30 ve 40 mm değerlerinde değiştiği deney dizilimlerinde EDVİÖ değeri en küçük değerden sırasıyla %41,20, %38,85 ve %37,21 oranında daha yüksek bulunmuştur.

Girdi faktörleri olarak seçilmiş olan d, D ve p’nin Δt ve ZBİÖ üzerindeki etkisini daha detaylı incelemek için Kuram [140], Zwawi [176] ve Pekşen [177] tarafından yapılan çalışmalarda uygulanan yaklaşım dikkate alınarak Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’deki 3 boyutlu değişim yüzeyleri elde edilmiştir. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’deki yüzeyler Çizelge 6.2’de listelenmiş olan Δt ve ZBİÖ değerleri dikkate alınarak Minitab 17 yazılımı ile oluşturulmuştur. Şekil 6.3.a ve Şekil 6.3.b’ye göre d değerlerinin artışı genel olarak Δt ’nin düşmesine ve Şekil 6.4.a ve Şekil 6.4.b’ye göre ise ZBİÖ değerlerinin yükselmesine neden olmuştur. Çünkü bakır malzemeden imal edilmiş tellerin d değerlerinin artması emici plaka ile temas eden yüzey alanının artmasına ve böylece daha fazla miktarda yapay güneş ışıınının FDM’ye aktarılmasını sağlamıştır. Şekil 6.3.c’de ise D ve p değerlerinin değişimi Δt üzerinde dalgalı bir değişim meydana getirmiştir. Fakat yine de D’nin artması az da olsa Δt ’nin azalmasına neden olmuştur. p değerinin artması ise GIIED ünitesi içerisinde depolanabilecek duyulur ısı miktarını etkilediği için Δt ’nin yükselmesine neden olmuştur. Benzer şekilde Şekil 6.4.c’de

de dalgalı bir değişim söz konusudur. d değerinin artışına paralel olarak p değerinin de artması ZBİO değerinin yükselmesine neden olmuştur. D değerinin değişimi ile benzer bir yaklaşım p değerinin değişimi ile elde edilmiştir

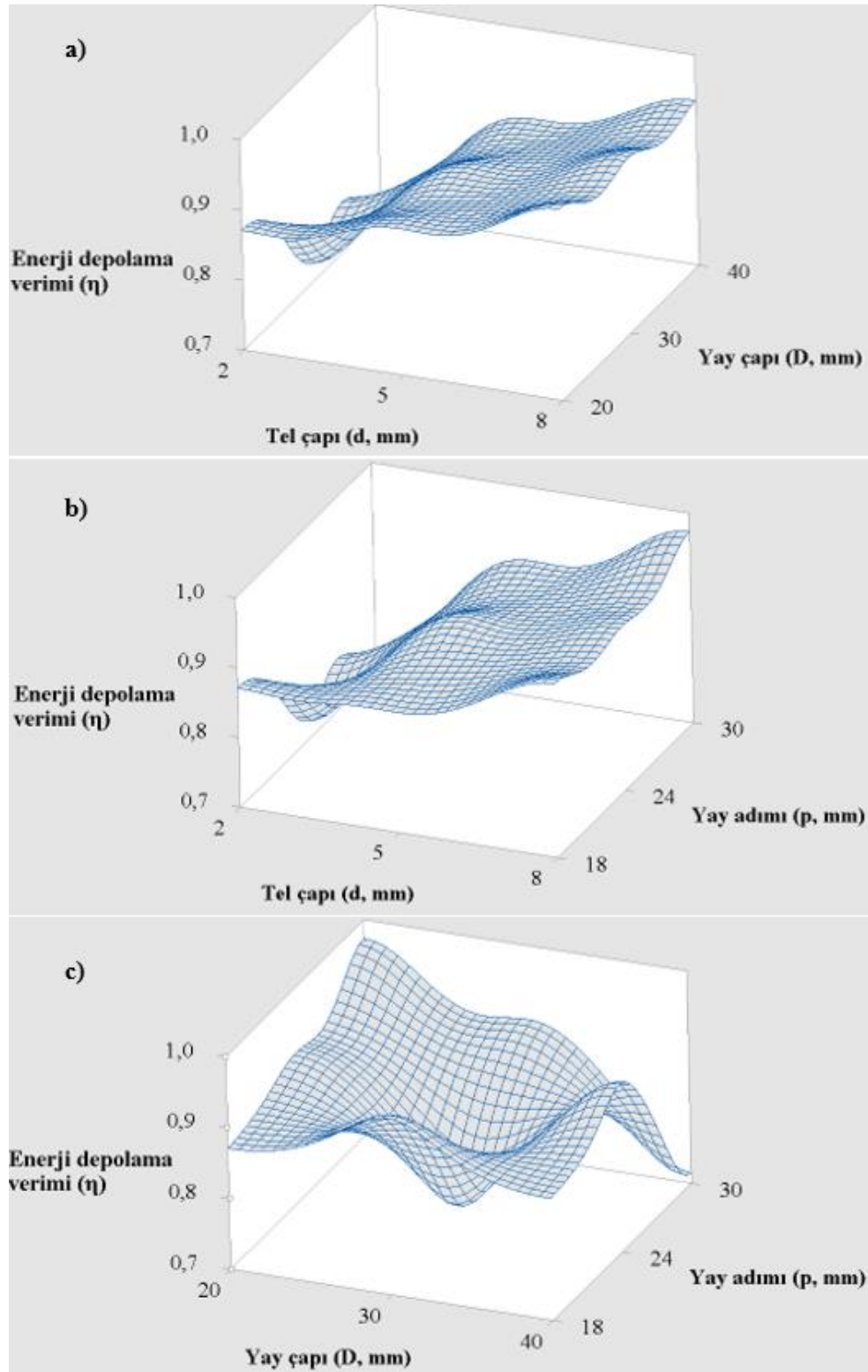


Şekil 6.3. Girdi parametrelerinin Δt 'ye etkisi, a) Δt - d - D değişimi, b) Δt - d - p değişimi, c) Δt - D - p değişimi

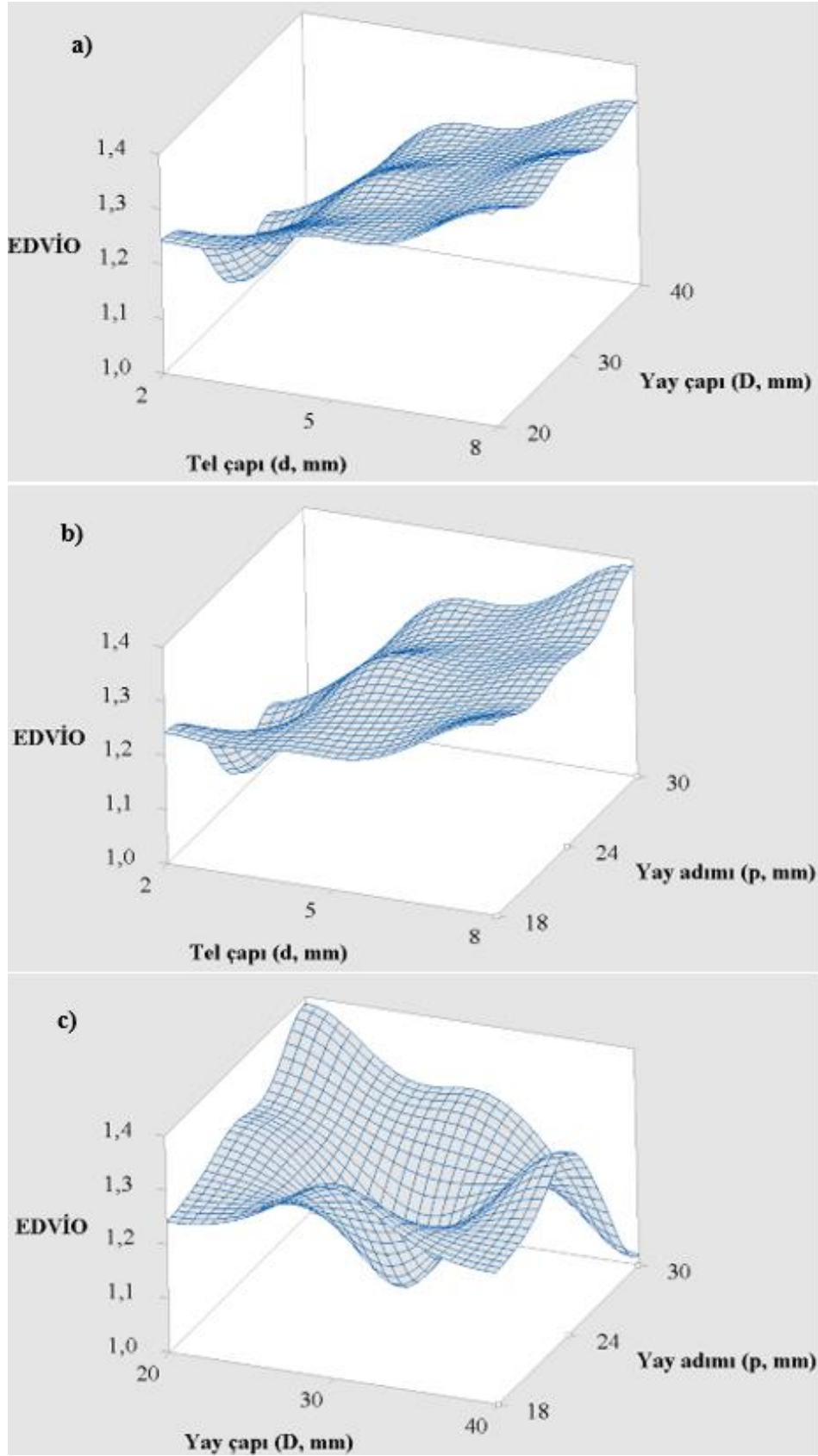


Şekil 6.4. Girdi parametrelerinin ZBiO'ya etkisi, a) ZBiO-d-D değişimi, b) ZBiO-d-p değişimi, c) ZBiO-D-p değişimi

Girdi faktörleri olarak seçilmiş olan d , D ve p 'nin η ve EDVİO üzerindeki etkisini daha detaylı incelemek için Kuram [140], Zwawi [176] ve Pekşen [177] tarafından yapılan çalışmalarda uygulanan yaklaşım dikkate alınarak Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'daki 3 boyutlu değişim yüzeyleri elde edilmiştir. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'daki yüzeyler Çizelge 6.2'de listelenmiş olan η ve EDVİO değerleri dikkate alınarak Minitab 17 yazılımı ile oluşturulmuştur. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6 detaylı incelendiğinde benzer davranış sergiledikleri açıkça görülmektedir. Δt değerinin en düşük değerini aldığı deney diziliminde en yüksek η ve EDVİO değerleri elde edilmiştir. Çünkü kaynaktan gelen ısıtım enerjisinin çevreye yayılmadan GIİED ünitesi içerisinde YTITA kullanılarak kısa sürede depolanması sağlanmıştır. FDM'nin tamamının ergimesi için gereken sürenin az olması ısı kaybının da minimum olmasını sağlamıştır.



Şekil 6.5. Girdi parametrelerinin η 'ye etkisi, a) η -d-D değişimi, b) η -d-p değişimi, c) η -D-p değişimi



Şekil 6.6. Girdi parametrelerinin EDVİO'ya etkisi, a) EDVİO-d-D değişimi, b) EDVİO-d-p değişimi, c) EDVİO-D-p değişimi

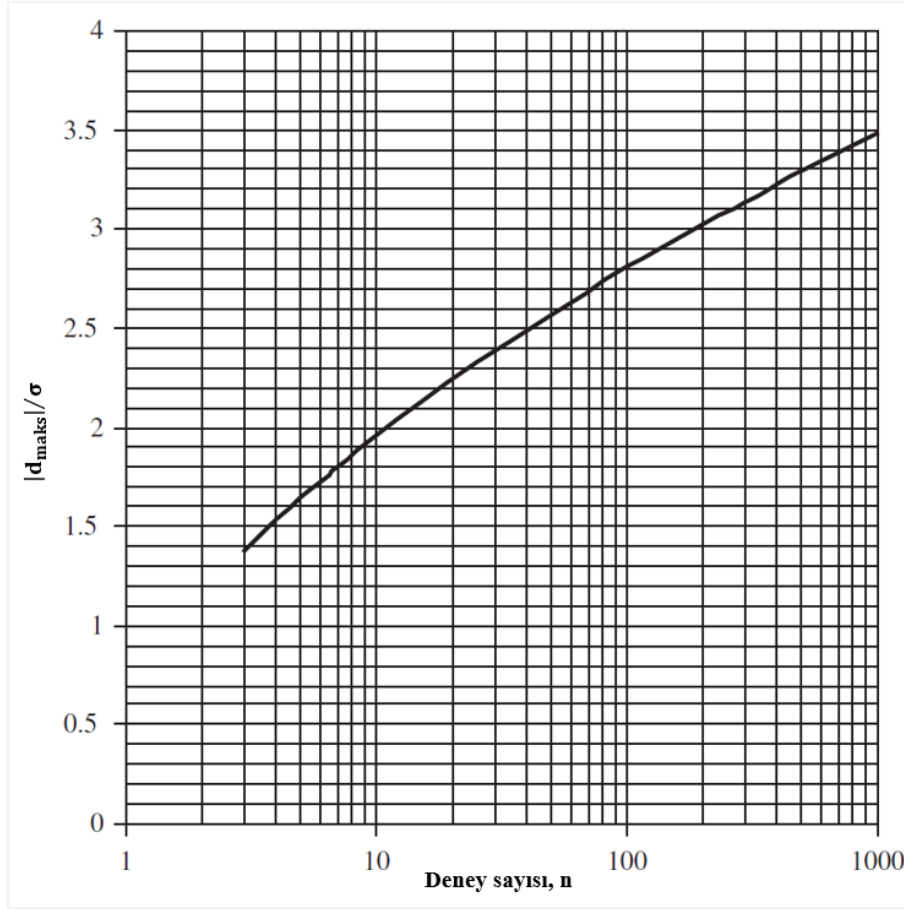
6.3. Deneysel Sonuçların Doğruluğunun Araştırılması

Deneysel çalışmalarda, elde edilen ölçüm sonuçlarının doğruluğunun kontrol edilmesi gerekmektedir. Ölçümler deneyimli uygulayıcılar tarafından kontrol edilip sübjektif olarak düzeltilebileceği gibi istatistiki yöntemler kullanılarak objektif olarak da değerlendirilebilmektedir.

Çizelge 6.3. Standart Chauvenet kriteri değerlendirme değerleri [126]

Deney sayısı (n)	Maksimum kabul edilebilir sapma/Standart sapma ($ d_{maks} /\sigma$)
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

Tez çalışması kapsamında elde edilen ölçüm sonuçlarının doğruluğunun kontrolünde William Chauvenet tarafından tanımlanmış olan Chauvenet kriteri [126, 127] kullanılmıştır. Bu değerlendirme yönteminde deney sayısına göre belirlenmiş olan maksimum kabul edilebilir sapmanın (d_{maks}) standart sapmaya (σ) olan oranına karşılık gelen Chauvenet kriteri değerlerinin çizelgesi kullanılmaktadır [126, 127]. Bu kullanılan çizelge, aşağıdaki gibi Çizelge 6.3’de ve çizelgedeki değerler kullanılarak oluşturulmuş Chauvenet kriteri dağılımı eğrisi Şekil 6.7’de verilmiştir. Her bir ölçüm sonucuna karşılık gelen d_{maks}/σ değeri, Çizelge 6.3 ve Şekil 6.7’de verilen değerlerden daha düşük bir değere sahip olduğu takdirde deneysel ölçüm sonuçlarının doğru olduğu çıkarımında bulunmaktadır.



Şekil 6.7. Deney sayısına göre çizilmiş olan standart Chauvenet kriteri eğrisi [126]

Chauvenet kriterinin hesaplanmasında her bir deney diziliminin mutlak sapma değeri ve yapılan toplam deneyin standart sapma değerleri kullanılmaktadır. Bu iki değer birbirine oranlanması ve tablo değeri ile karşılaştırılması sonucunda, elde edilen ölçüm değerlerinin doğruluğundan emin olunmaktadır. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen ölçüm değerlerinin (x_i), toplam ölçümlerin aritmetik ortalamasından (x_m) çıkarılması ile her bir deney diziliminin sapması (d_i) Eş. 6.1’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır [126, 127].

$$d_i = x_i - x_m \quad (6.1)$$

Eş. 6.1’de verilen aritmetik ortalama Eş. 6.2’de verildiği gibi elde edilmiştir.

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.2)$$

Burada, n toplam deney sayısını ve x_i her bir deney dizilimine karşılık gelen deneysel ölçüm sonucunu ifade etmektedir [126, 127]. Tüm ölçüm değerlerinin standart sapması ise deney sayısının 20'den çok olması durumunda Eş. 6.3 kullanılarak bulunmaktadır [126, 127]. Yapılan deneysel çalışmadaki gibi toplam deney sayısının 20'den az olması durumunda ise Eş. 6.4 ile hesaplama yapılmaktadır [126, 127]. Bu çalışmada da Eş. 6.4 kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

$$s = \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad n > 20 \quad (6.3)$$

$$s = \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad n < 20 \quad (6.4)$$

Chauvenet kriterine göre değerlendirme ise Eş. 6.5'de verildiği gibi Çizelge 6.3'de verilen standart tablo değerleri ile hesaplanan $|d_i|/\sigma$ değerlerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır.

$$\frac{|d_i|}{\sigma} < \frac{|d_{maks}|}{\sigma} \quad (6.5)$$

Yapılan tez çalışmasında, ergime süresi (Δt) ve enerji depolama verimi (η) sonuç parametreleri için toplam 10 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerden 9 tanesi YTITA içeren deney dizilimleri için ve 1 tanesi de YTITA içermeyen GIIED ünitesi için yapılmıştır. Bunun yanında zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİÖ) ve enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİÖ) sonuç parametreleri için toplam 9 adet YTITA içeren deney dizilimleri için hesaplama yapılmıştır. Enerji depolama performansının incelenmesinde sonuç parametreleri olarak seçilen Δt , ZBİÖ, η ve EDVİÖ ölçüm ve hesaplama değerlerine ait Chauvenet kriteri değerlendirme sonuçları toplam 9 adet deney dikkate alınarak Çizelge 6.4'deki elde edilmiştir.

Çizelge 6.4 detaylı bir şekilde incelendiğinde performans parametrelerinin hiç biri çizelge değerinden yüksek bulunmamıştır. Bu nedenle elde edilen ölçüm sonuçlarının ve bu ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan değerlerin tümünün doğru olduğu sonucuna varılmıştır. Çizelge

6.4’de verilen çizelge değeri Çizelge 6.3’de yer alan deney sayısına bağlı olarak interpolasyon yöntemiyle hesaplanmıştır.

Çizelge 6.4. YTITA içeren deneysel ölçüm ve hesaplama sonuçlarının Chauvenet kriterine göre değerlendirilmesi

Deney nu.	Deney dizilimi	Δt ($ d_i /\sigma$)	ZBİO ($ d_i /\sigma$)	η ($ d_i /\sigma$)	EDVİO ($ d_i /\sigma$)	Çizelge değeri ($ d_{maks} /\sigma$)
1	A ₁ B ₁ C ₁	0,37339	0,48210	0,55755	0,55755	1,91
2	A ₁ B ₂ C ₂	1,23219	1,18005	1,17871	1,17872	1,91
3	A ₁ B ₃ C ₃	1,71760	1,51386	1,87606	1,87606	1,91
4	A ₂ B ₁ C ₂	0,29871	0,18857	0,40037	0,40033	1,91
5	A ₂ B ₂ C ₃	0,14936	0,02817	0,32943	0,32946	1,91
6	A ₂ B ₃ C ₁	0,07468	0,19974	0,17737	0,17740	1,91
7	A ₃ B ₁ C ₃	1,38155	1,60536	1,05182	1,05185	1,91
8	A ₃ B ₂ C ₁	1,04550	1,11071	0,88508	0,88506	1,91
9	A ₃ B ₃ C ₂	0,52275	0,44293	0,76824	0,76822	1,91

Bunun yanında YTITA içermeyen yani boş deney diziliminin de yer aldığı 10 adet deney sonucuna ait Chauvenet kriteri değerlendirme sonuçları Çizelge 6.5’de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Çizelge 6.5’e bakıldığında Çizelge 6.4’e benzer şekilde tüm ölçüm ve hesaplama değerleri çizelge değerinden düşük bulunmuştur. Buna bağlı olarak elde edilen tüm değerlerin doğru olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 6.5 YTITA içermeyen (boş) deney diziliminin de dâhil edildiği durumda deneysel ölçüm ve hesaplama sonuçlarının Chauvenet kriterine göre değerlendirilmesi

Deney nu.	Deney dizilimi	$\Delta t(d_i /\sigma)$	$\eta(d_i /\sigma)$	Çizelge değeri ($ d_{maks} /\sigma$)
1	A ₁ B ₁ C ₁	0,16355	0,31392	1,96
2	A ₁ B ₂ C ₂	0,93121	0,86042	1,96
3	A ₁ B ₃ C ₃	1,36511	1,47395	1,96
4	A ₂ B ₁ C ₂	0,43724	0,52887	1,96
5	A ₂ B ₂ C ₃	0,30373	0,46645	1,96
6	A ₂ B ₃ C ₁	0,10347	0,33267	1,96
7	A ₃ B ₁ C ₃	1,40516	1,10202	1,96
8	A ₃ B ₂ C ₁	1,10477	0,95532	1,96
9	A ₃ B ₃ C ₂	0,63750	0,85253	1,96
10	A ₀ B ₀ C ₀	1,53200	1,58957	1,96

6.4. Taguchi Tabanlı Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Optimizasyon

Yapılan tez çalışması kapsamında Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz (GİA) yöntemiyle içerisine YTITA eklenmiş dikdörtgen şeklindeki bir GIİED ünitesinin enerji depolama performansını ifade eden Δt , ZBİÖ, η ve EDVİÖ değerlerini en büyükleyen en iyi deney parametrelerini belirlemek amaç edinilmiştir. Enerji depolama performansını etkileyen girdi değişkenleri veya girdi parametreleri, kullanılan ısı transferi arttırıcının geometrik tasarım şartlarına bağlı olarak tel çapı (d, mm), yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) şeklinde belirlenmiştir. Girdi parametreleri ve seviyeleri “Bölüm 5.1. Deney Sisteminin Tasarımı” başlığı altında listelenmiştir (Bkz. Çizelge 5.2).

Çizelge 6.6. Taguchi deney tasarımı kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları

Deney nu.	Deney dizilimi	Ergime süresi (Δt)	Zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİÖ)	Enerji depolama verimi (η)	Enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİÖ)
1	A ₁ B ₁ C ₁	198	1,20707	0,82061	1,20786
2	A ₁ B ₂ C ₂	221	1,08145	0,76011	1,11881
3	A ₁ B ₃ C ₃	234	1,02137	0,69219	1,01884
4	A ₂ B ₁ C ₂	180	1,32778	0,91391	1,34518
5	A ₂ B ₂ C ₃	184	1,29891	0,90700	1,33502
6	A ₂ B ₃ C ₁	190	1,25789	0,89219	1,31322
7	A ₃ B ₁ C ₃	151	1,58278	0,97736	1,43858
8	A ₃ B ₂ C ₁	160	1,49375	0,96112	1,41467
9	A ₃ B ₃ C ₂	174	1,37356	0,94974	1,39792

3 farklı girdi parametresi ve her girdi parametresinin 3 farklı seviyesi tez çalışmasında dikkate alınmıştır. Girdi parametreleri ve toplam seviye sayılarını dikkate alarak toplamda 27 adet deneye ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat Taguchi deney tasarımı yöntemiyle L₉ ortogonal dizisi ile 9 adet deney yapılarak, minimum deney sayısı ile tam faktöriyel dizilimden elde edilebilecek deney sonuçları belirlenmeye çalışılmıştır. Taguchi deney tasarımı yönteminin kullanılması ile deney maliyetlerinden ve harcanan emekten tasarruf edilmiştir.

Çizelge 6.7. Tez çalışması kapsamında yapılan Taguchi tabanlı GİA optimizasyonunun iş akış diyagramı

Sonuç parametrelerine etkiyen girdi değişkenlerinin belirlenmesi	Taguchi deney
Girdi değişkenlerinin seviyelerinin belirlenmesi	
Taguchi deney tasarımı ile uygun ortogonal (dikey) dizinin belirlenmesi	
Deneylerin gerçekleştirilmesi	
Elde edilen sonuç parametrelerinin uygun yaklaşım kullanılmasıyla S/N oranlarının hesaplanması	
Birden fazla sonuç parametresinin bulunması nedeniyle en iyilenen deney diziliminin belirlenmesi için ÇKKV yöntemlerinden olan GİA yönteminin kullanılması	Giri ilişkisel analiz yöntemi
S/N oranlarının veya deneysel olarak elde edilen sonuçların GİA yönteminin kullandığı uygun yaklaşım ile normalize edilmesi	
Normalize verilerin kullanılmasıyla mutlak değer matrisinin oluşturulması	
Mutlak değer matrisinin kullanılmasıyla GİK değerlerinin belirlenmesi	
Birden fazla sonuç parametresinin en iyi dizilim üzerindeki kriter ağırlığının belirlenmesi	
Shannon Entropi yöntemiyle kriter ağırlığının belirlenmesi	
Gri Entropi yöntemiyle kriter ağırlığının belirlenmesi	
Kriter ağırlıklarına bağlı olarak GİD değerlerinin hesaplanması	
Elde edilen GİD'lerin büyükten küçüğe doğru sıralanarak optimum (en iyilenen) deney diziliminin belirlenmesi	
Optimum deney diziliminin başlangıç deney dizilimi ile karşılaştırılması	
Sonuç parametrelerinin en iyi dizilim üzerindeki yüzde etki oranlarının ANOVA ile hesaplanması	
Güven aralıklarının belirlenmesi	
Eldeki verileri kullanarak farklı şartları tahmin edebilmek için regresyon analizinin yapılması	
Regresyon analizi ile elde edilen denklemlerin istatistiki olarak hata analizlerinin yapılması	

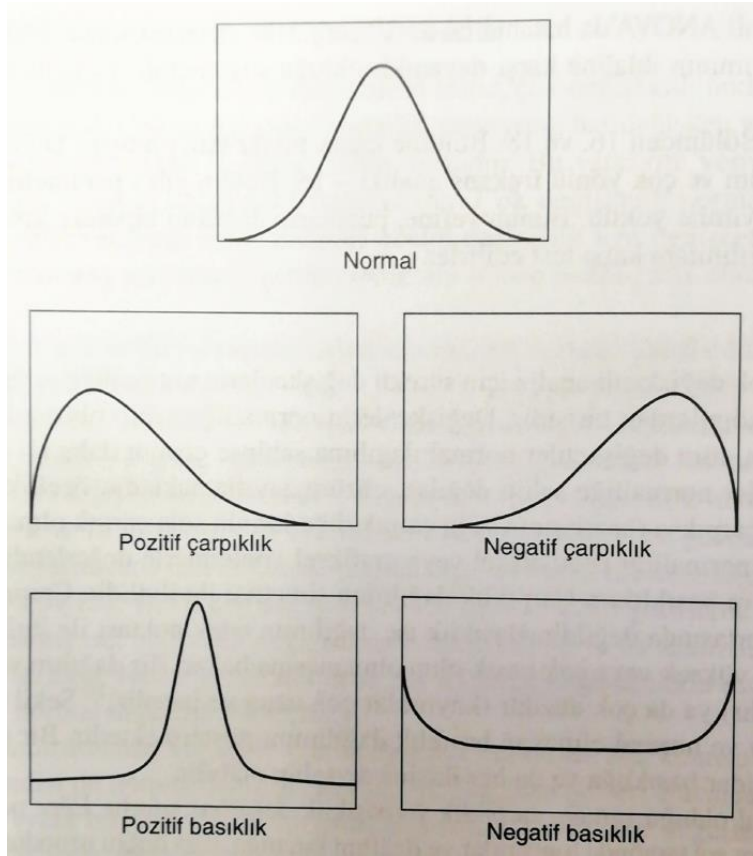
Optimizasyon çalışmalarında genellikle aynı deney dizilimi için birden fazla tekrara ihtiyaç duyulduğu farklı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [126, 127, 139, 141]. Fakat deney maliyetlerinin karşılanamadığı ve deney zamanının kısıtlı olduğu durumlarda ise tek deney yapılarak elde edilen sonuçların kullanılabileceği de ayrıca ifade edilmiştir [159, 178]. Bu nedenle yapılan tez çalışmasında Taguchi deney tasarımı yöntemiyle belirlenmiş olan L_9 ortogonal dizilimdeki her bir deney dizilimi için tek deney yapılmıştır.

Deneylerin yapılış sırasının belirlenmesi de bir diğer önemli konudur. Herhangi bir hatayı önceden belirlemek için deneylerin dizilim sırasına göre değil rastgele bir şekilde yapılması

gerekmektedir. Bu işleme rassallaştırma denilmektedir [102, 134, 135, 159, 178]. Deneyler rastgele olacak şekilde bir baştan bir sonadan seçilerek yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki Çizelge 6.6'da listelenmiştir. Bunun yanında Taguchi tabanlı GİA yönteminin iş akış diyagramı Çizelge 6.7'de özetlenmiştir.

6.4.1. Sonuç parametrelerinin normalliklerinin değerlendirilmesi

Tabachnick ve Fidell [172]'e göre çok değişkenli analizlerde, sürekli değişkenlerin normalliğe sahip olup olmadığının belirlenmesi ÇKKV işlem adımlarının ilkinin oluşturmaktadır. Tüm sürekli (bağımlı) değişkenlerin normal bir dağılım göstermesi optimizasyon işleminin daha iyi sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Aksi takdirde elde edilen çözümler zayıflamaktadır [172]. Çizelge 6.7'de verilen ANOVA çalışması ve regresyon analizinin yapılabilmesi için elde edilen deneysel sonuçların istatistiki olarak normal dağılım göstermesi gerekmektedir [172-174]. Çünkü normal dağılıma sahip olmayan sonuç parametrelerinin ANOVA ve regresyon analizleri yapılamamaktadır [172-174]. Sürekli değişkenlerin yani en iyi dizilimi elde etmek için kullanılan sonuç parametrelerinin normalliğine, anlamlılık değeriyle (p değeri veya α) karşılaştırılması neticesinde karar verilmektedir. Normalliğin 2 temel değerlendirme kriteri çarpıklık ve basıklık değerleridir. Normal dağılım, çarpık dağılım ve dağılımın basıklığı ile ilgili olarak Tabachnick ve Fidell [172] tarafından Şekil 6.8'de görülen örnek dağılım eğrileri verilmiştir. Buradan hareketle çarpıklık, normal dağılımda bulunan simetrikliğin sağa veya sola kayması olarak ifade edilmektedir. Basıklık ise Şekil 6.8'deki gibi dağılımın odak noktasının çok yüksek veya çok düşük olup olmaması durumunun incelenmesidir. Normal dağılımın incelenmesinde çarpıklık ve basıklık değerlerinin kullanılmasının yanında Anderson-Darling testi ve 20'den az deney veya gözlem olması durumunda kullanılan Shapiro-Wilk testleri de bulunmaktadır [172-174, 179]. Anderson-Darling ve Shapiro-Wilk testleri, elde edilmiş olan deneysel verilerin kullanılması ile uygulanmaktadır. Test yöntemlerinin detaylı açıklamaları [173] ve [179] numaralı çalışmalarda detaylıca anlatılmıştır. Burada detaylı tanımlamasına yer verilmemiştir. Çünkü yapılan tez çalışması kapsamında Minitab 17 yazılımı kullanılarak deney dizilimlerine göre oluşturulmuş olan çıktı verileri ile gerekli normallik testleri yapılmıştır.



Şekil 6.8. Normal, çarpık ve dik dağılımlar [172]

Normallik testi için elde edilen p değeri değerlendirilmiştir. Yapılan incelemelerde %95 güvenirlik düzeyinde ve $\alpha=0,05$ anlamlılık değeri (p değeri) altında incelemeler yapılmıştır. Anlamlılık değerinin 0,05 seçilmesi, yapılacak olan analizlerin sonucunda bulunacak olan değerlerin %95 oranında güvenilir olduğunun kabulüdür. %95 güvenirlik düzeyinin dışında yazılımlarda %90 ve %99 güven aralıkları da kullanılmaktadır [172-174, 179]. Bir dağılımın normal olup olmadığının belirlenmesinde aşağıda listelenmiş olan değerler dikkate alınmaktadır [172-174, 179, 180]:

- Çarpıklık ve basıklık değerlerinin -1,5 ile +1,5 arasında olması gerekmektedir.
- Anderson-Darling ve Shapiro-Wilk testleri sonucunda elde edilen p değerinin $p=\alpha=0,05$ değerinden büyük olması gerekmektedir.

Sonuç parametreleri olan Δt , ZBİÖ, η ve EDVİÖ değerleri için Minitab 17 ve SPSS IBM yazılımlarından elde edilen çarpıklık, basıklık, Anderson-Darling testi ve Shapiro-Wilk testi p değerleri Çizelge 6.8'de sunulmuştur. Çizelge 6.8'de sunulan çarpıklık ve basıklık değerleri Tabachnick ve Fidell [172] tarafından tanımlanmış olan sınırların içerisinde

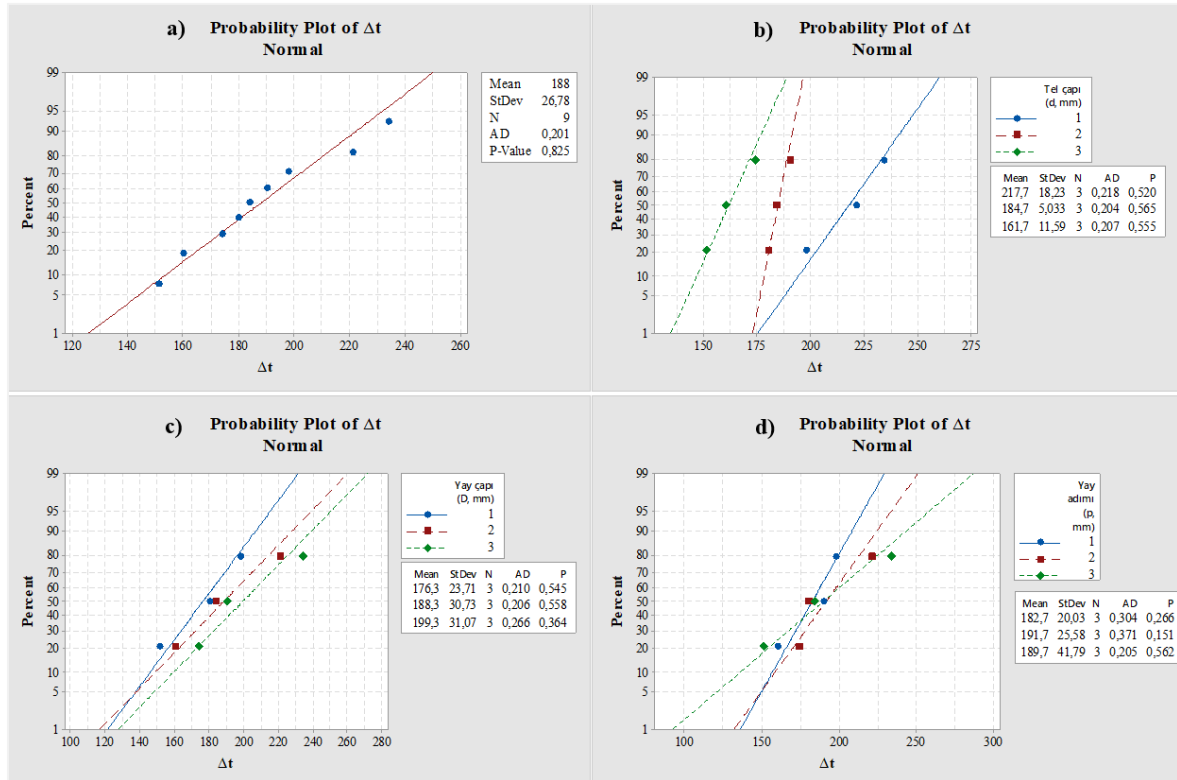
bulunmuştur. Yukarıda listelenen ilk normallik şartının sağlanmakta olduğu açıkça görülmüştür.

Çizelge 6.8. Normallik test sonuçları

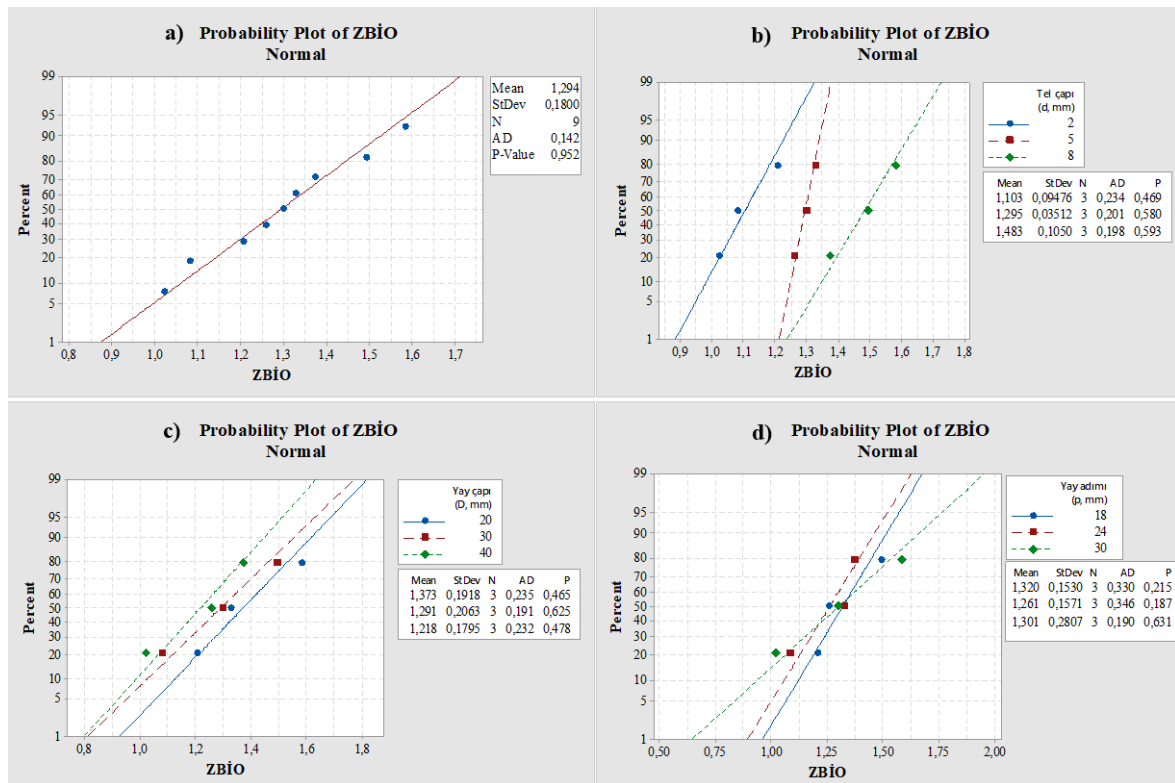
Sonuç parametresi	Çarpıklık değeri	Basıklık değeri	Anderson-Darling testine göre belirlenmiş p değeri	Shapiro-Wilk testine göre belirlenmiş p değeri
Δt	0,48824	-0,29935	0,825	0,832
ZBİO	0,05923	-0,43289	0,952	0,962
η	-0,96396	-0,11457	0,229	0,228
EDVİO	-0,96397	-0,11454	0,229	0,228

Çizelge 6.8’de verilen Anderson-Darling testine göre belirlenmiş olan p değerleri, girdi parametresi olarak belirlenmiş olan tel çapı (d, mm), yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) değişkenlerinin tamamını kapsayan çok değişkenli test sonucunda elde edilmiştir. Bulunan p değerleri incelendiğinde tüm değerlerin 0,05 anlamlılık düzeyinden yüksek çıktığı açıkça görülmektedir. Ayrıca Shapiro-Wilk testine göre belirlenmiş olan p değerleri de 0,05 anlamlılık düzeyinden yüksek çıkmıştır. Buradan hareketle Taguchi deney tasarımı yöntemine göre yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar normal bir şekilde dağılmaktadır.

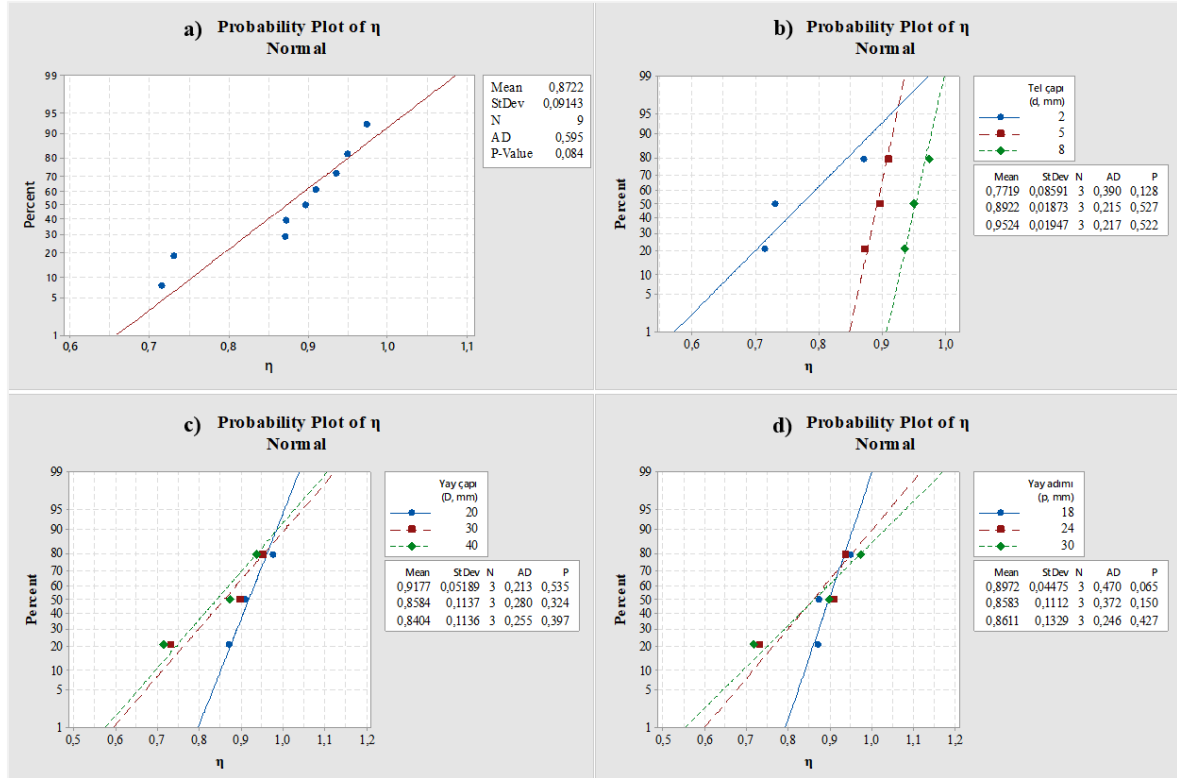
Tüm değişkenlere, her bir girdi değişkenine ve her bir girdi değişkeninin alt grubuna karşılık gelen Anderson-Darling testi p değerleri Minitab 17 yazılımı ile elde edilmiştir. Şekil 6.9, Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12 sırasıyla Δt , ZBİO, η ve EDVİO için hesaplanan tüm değişkenlere, her bir girdi değişkenine ve her bir girdi değişkeninin alt grubuna karşılık gelen Anderson-Darling testi p değerlerini ve olasılık grafiklerini göstermektedir. Elde edilen olasılık grafikleri incelendiğinde bulunan tüm p değerlerinin 0,05 değerinden büyük olduğu ve normal olasılık şartının sağlandığı açıkça görülmektedir.



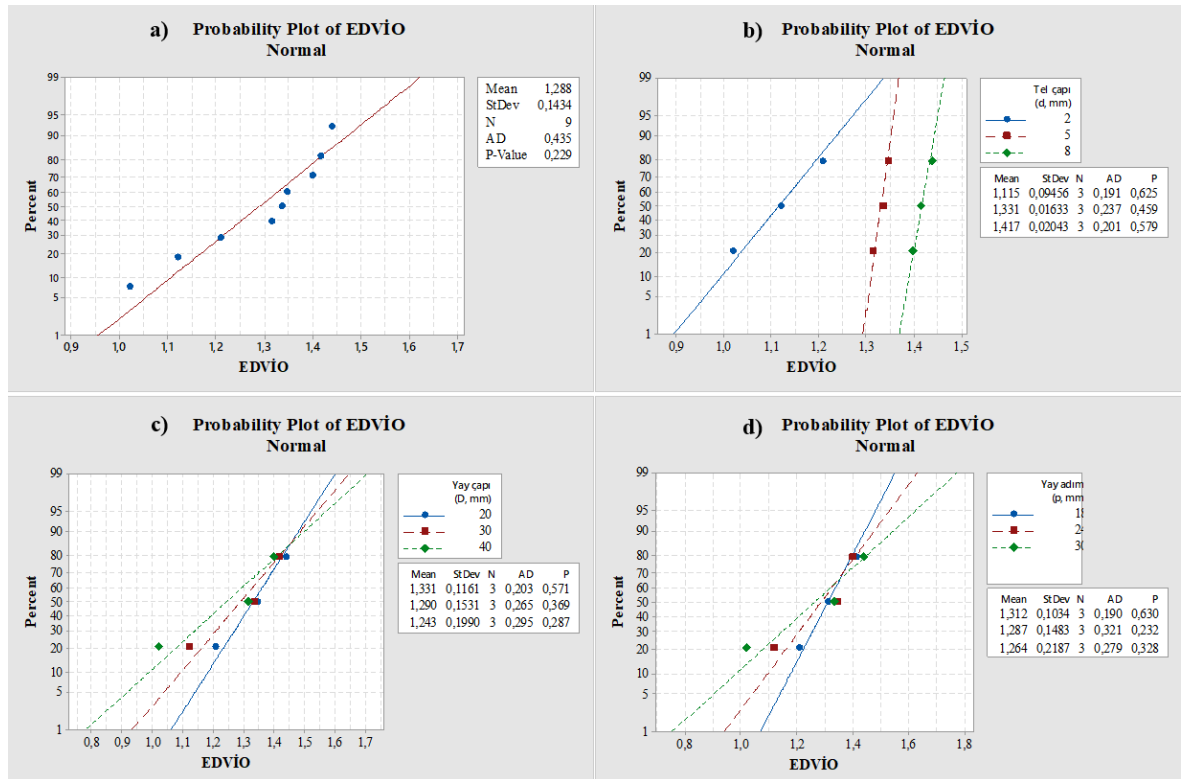
Şekil 6.9. Δt için normal olasılık grafiği; a) Tüm girdi değişkenlerine göre, b) Tel çapına göre, c) Yay çapına göre ve d) Yay adımına göre



Şekil 6.10. ZBİO için normal olasılık grafiği; a) Tüm girdi değişkenlerine göre, b) Tel çapına göre, c) Yay çapına göre ve d) Yay adımına göre



Şekil 6.11. η için normal olasılık grafiği; a) Tüm girdi değişkenlerine göre, b) Tel çapına göre, c) Yay çapına göre ve d) Yay adımına göre



Şekil 6.12. EDVİO için normal olasılık grafiği; a) Tüm girdi değişkenlerine göre, b) Tel çapına göre, c) Yay çapına göre ve d) Yay adımına göre

6.4.2. Gri ilişkisel analiz (GİA) sonuçları

YTITA içeren dikdörtgen şekilli bir GIİED ünitesinde, yapay güneş enerjisi depolama performansının belirlenmesi amacıyla yapılan tez çalışmasında birden fazla sonuç parametresi olduğu için ÇKKV yöntemlerinden olan GİA yöntemi kullanılarak optimum (en iyi) deney dizilimi belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç parametreleri olarak belirlenen Δt , ZBİO, η ve EDVİO değişkenlerinin değerleri farklı kaynaklardan gelmektedir. Bu nedenle ilk olarak GİA yönteminde kullanılan normalizasyon yaklaşımlarıyla Çizelge 6.9’da listelenmiş referans serideki deneysel sonuçlar veya değerlendirme kriterleri normalize edilmiştir.

Çizelge 6.9. Her bir deney dizilimine ait Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametrelerinin referans serisi

Deney nu.	Deney dizilimi	Δt	ZBİO	η	EDVİO
Referans seri		151	1,58278	0,97736	1,43858
1	$A_1B_1C_1$	198	1,20707	0,82061	1,20786
2	$A_1B_2C_2$	221	1,08145	0,76011	1,11881
3	$A_1B_3C_3$	234	1,02137	0,69219	1,01884
4	$A_2B_1C_2$	180	1,32778	0,91391	1,34518
5	$A_2B_2C_3$	184	1,29891	0,90700	1,33502
6	$A_2B_3C_1$	190	1,25789	0,89219	1,31322
7	$A_3B_1C_3$	151	1,58278	0,97736	1,43858
8	$A_3B_2C_1$	160	1,49375	0,96112	1,41467
9	$A_3B_3C_2$	174	1,37356	0,94974	1,39792

Deneysel sonuçlar için kullanılan normalizasyon yaklaşımları Çizelge 6.10’da verilmiştir.

Çizelge 6.10. Deney sonuçlarının GİA’ya göre normalizasyon yaklaşımları

Deney sonucu (Sonuç parametresi, Değerlendirme kriteri)	Normalizasyon yaklaşımı
Δt	“Daha düşük-daha iyi”
ZBİO	“Daha yüksek-daha iyi”
η	“Daha yüksek-daha iyi”
EDVİO	“Daha yüksek-daha iyi”

FDM'nin tamamen ergimesi için gereken Δt değeri ne kadar küçük olursa enerji depolama esnasında çevreye daha az miktarda ısı kaybı olacak ve böylece kaynaktan gelen enerjinin daha büyük bir miktarı GIİED tarafından depolanmıştır. Bu nedenle Δt için Eş. 5.31 ve ZBİO, η ve EDVİO değerleri için Eş. 5.32 kullanılarak normalizasyon işlemi yapılmıştır. Elde edilen normalize veriler Çizelge 6.11'de sunulmuştur.

Çizelge 6.11. Her bir deney dizilimine ait Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametrelerinin normalizasyon matrisi

Deney nu.	Deney dizilimi	Δt	ZBİO	η	EDVİO
Referans seri		1,00	1,00	1,00	1,00
1	$A_1B_1C_1$	0,43373	0,33077	0,45034	0,45034
2	$A_1B_2C_2$	0,15663	0,10702	0,23818	0,23818
3	$A_1B_3C_3$	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
4	$A_2B_1C_2$	0,65060	0,54579	0,77750	0,77750
5	$A_2B_2C_3$	0,60241	0,49436	0,75328	0,75328
6	$A_2B_3C_1$	0,53012	0,42130	0,70136	0,70136
7	$A_3B_1C_3$	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
8	$A_3B_2C_1$	0,89157	0,84142	0,94305	0,94305
9	$A_3B_3C_2$	0,72289	0,62733	0,90315	0,90315

Normalizasyon işleminden sonra her bir normalize verinin referans seri ile aralarındaki uzaklık Eş.5.34 kullanılarak hesaplanmıştır. Uzaklık matrisinin bir diğer tanımlaması da mutlak sapma değeridir. Yani normalize verinin referans serisiyle arasındaki sapmanın mutlak değerli halidir. Hesaplanan mutlak sapma değerleri Çizelge 6.12'de verilmiştir.

Çizelge 6.12. Her bir deney dizilimine ait Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametrelerinin normalizasyon değerleri için uzaklık matrisi

Deney nu.	Deney dizilimi	$\Delta 0i (\Delta t)$	$\Delta 0i (ZBİO)$	$\Delta 0i (\eta)$	$\Delta 0i (EDVİO)$
1	$A_1B_1C_1$	0,56627	0,66923	0,54966	0,54966
2	$A_1B_2C_2$	0,84337	0,89298	0,76182	0,76182
3	$A_1B_3C_3$	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
4	$A_2B_1C_2$	0,34940	0,45421	0,22250	0,22250
5	$A_2B_2C_3$	0,39759	0,50564	0,24672	0,24672
6	$A_2B_3C_1$	0,46988	0,57870	0,29864	0,29864
7	$A_3B_1C_3$	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
8	$A_3B_2C_1$	0,10843	0,15858	0,05695	0,05695
9	$A_3B_3C_2$	0,27711	0,37267	0,09685	0,09685

Mutlak sapma değerlerinin belirlenmesinden sonraki adımda gri ilişkisel katsayıların (GİK) hesaplaması yapılmıştır. GİK değerlerinin yüksek olması GİA yönteminde önemli bir parametre olduğu için mutlak sapma verilerinin minimum olması hedeflenmektedir. Çizelge 6.12 incelendiğinde mutlak sapma değerleri Δt , ZBİO, η ve EDVİO parametrelerinin hepsi için 7. deney dizilimi olan $A_3B_1C_3$ diziliminde ve 8 mm (d), 20 mm (D) ve 30 mm (p) şartlarında 0 değerini aldığı görülmektedir. Eş. 5.35 kullanılarak hesaplanan GİK değerleri Çizelge 6.13’de verilmiştir.

Çizelge 6.13. Her bir deney dizilimine ait Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametrelerinin gri ilişkisel katsayı (GİK) matrisi

Deney nu.	Deney dizilimi	$\xi (\Delta t)$	$\xi (ZBİO)$	$\xi (\eta)$	$\xi (EDVİO)$
1	$A_1B_1C_1$	0,46893	0,42763	0,47634	0,47634
2	$A_1B_2C_2$	0,37220	0,35894	0,39625	0,39625
3	$A_1B_3C_3$	0,33333	0,33333	0,33333	0,33333
4	$A_2B_1C_2$	0,58865	0,52399	0,69204	0,69204
5	$A_2B_2C_3$	0,55705	0,49720	0,66959	0,66959
6	$A_2B_3C_1$	0,51553	0,46352	0,62606	0,62606
7	$A_3B_1C_3$	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
8	$A_3B_2C_1$	0,82178	0,75921	0,89775	0,89775
9	$A_3B_3C_2$	0,64341	0,57296	0,83773	0,83773

Çizelge 6.13’de sunulan GİK değerleri kullanılarak Eş. 5.36’da verilen gri ilişkisel derece (GİD) değerleri hesaplanmaktadır. Yani GİD değerleri kullanılarak 4 farklı sonuç kriteri tek bir kritere düşürülmek suretiyle optimizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Burada her bir sonuç parametresi veya diğer adıyla değerlendirme kriterinin sonuç dizilimi üzerinde belirli bir kriter ağırlığı bulunmaktadır. Kriterlerin ağırlıklandırma işleminde Shannon entropi ve Gri entropi yöntemleri ayrı ayrı kullanılmıştır. Shannon entropi yöntemi Eş. 5.38-Eş. 5.42 sırasıyla uygulanarak kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Bunun yanında Eş.5.43-Eş.5.51 kullanılarak da Gri entropi yöntemiyle kriter ağırlıklandırma işlemi yapılmıştır. Elde edilen kriter ağırlıkları Çizelge 6.14’de verilmiştir. Çizelge 6.14 incelendiğinde Shannon entropi yöntemine göre Δt ve ZBİO’nun en iyi deney diziliminin bulunmasında η ve EDVİO’ya göre daha fazla etkisinin olduğu görülmektedir. Gri entropi yöntemine göre yapılan kriter ağırlıklandırma işlemi sonucunda ise en iyi deney diziliminin belirlenmesinde tüm sonuç parametrelerinin yaklaşık aynı etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.14. Kriter ağırlıklandırma işlemine göre elde edilen sonuç parametrelerine ait ağırlıklar

Yöntem	$W_{\Delta t}$	$W_{ZB\dot{I}O}$	W_{η}	$W_{EDV\dot{I}O}$
Shannon entropi yöntemi	0,30820	0,29856	0,19662	0,19662
Gri entropi yöntemi	0,25009	0,25007	0,24992	0,24992

Elde edilen kriter ağırlıklarıyla yeniden düzenlenen GİK matrisi Çizelge 6.15’de sunulmuştur.

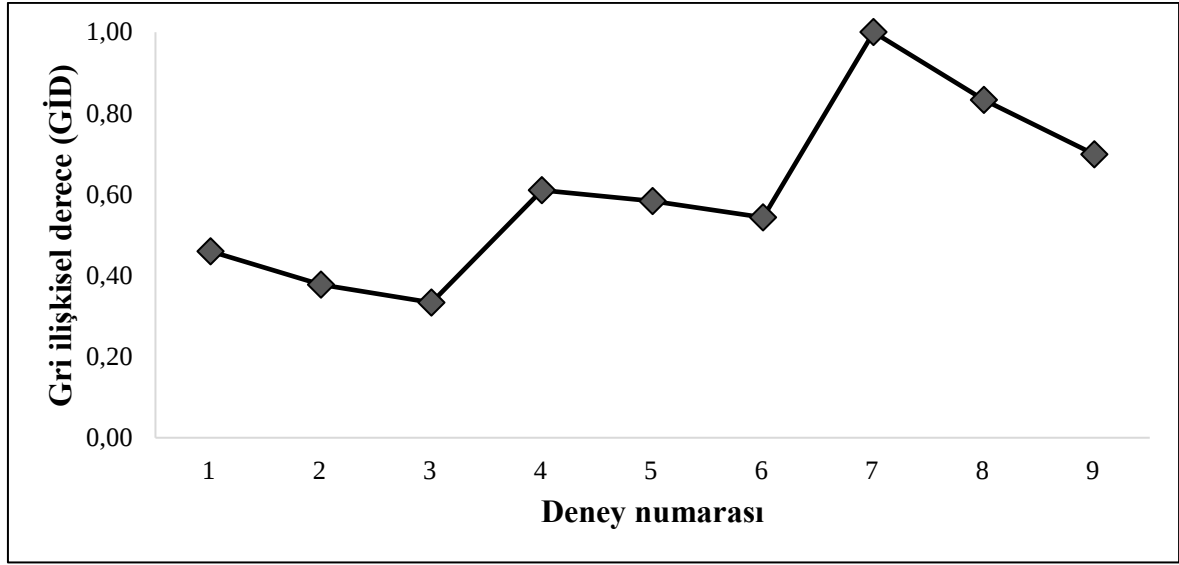
Çizelge 6.15. Kriter ağırlıkları eklendikten sonra her bir deney dizilimine ait Δt , $ZB\dot{I}O$, η ve $EDV\dot{I}O$ sonuç parametrelerinin gri ilişkisel katsayı (GİK) matrisi

Deney nu.	Deney dizilimi	Shannon entropi yöntemiyle belirlenen kriter ağırlıkları eklenmiş durum			
		$\xi(\Delta t)$	$\xi(ZB\dot{I}O)$	$\xi(\eta)$	$\xi(EDV\dot{I}O)$
1	$A_1B_1C_1$	0,14452	0,12767	0,09366	0,09366
2	$A_1B_2C_2$	0,11471	0,10717	0,07791	0,07791
3	$A_1B_3C_3$	0,10273	0,09952	0,06554	0,06554
4	$A_2B_1C_2$	0,18142	0,15644	0,13607	0,13607
5	$A_2B_2C_3$	0,17168	0,14844	0,13165	0,13165
6	$A_2B_3C_1$	0,15889	0,13839	0,12310	0,12310
7	$A_3B_1C_3$	0,30820	0,29856	0,19662	0,19662
8	$A_3B_2C_1$	0,25327	0,22667	0,17652	0,17652
9	$A_3B_3C_2$	0,19830	0,17106	0,16471	0,16471
Deney nu.	Deney dizilimi	Gri entropi yöntemiyle belirlenen kriter ağırlıkları eklenmiş durum			
		$\xi(\Delta t)$	$\xi(ZB\dot{I}O)$	$\xi(\eta)$	$\xi(EDV\dot{I}O)$
1	$A_1B_1C_1$	$\xi(\Delta t)$	$\xi(ZB\dot{I}O)$	$\xi(\eta)$	$\xi(EDV\dot{I}O)$
2	$A_1B_2C_2$	0,11727	0,11727	0,11727	0,11727
3	$A_1B_3C_3$	0,09308	0,09308	0,09308	0,09308
4	$A_2B_1C_2$	0,08336	0,08336	0,08336	0,08336
5	$A_2B_2C_3$	0,14722	0,14722	0,14722	0,14722
6	$A_2B_3C_1$	0,13931	0,13931	0,13931	0,13931
7	$A_3B_1C_3$	0,12893	0,12893	0,12893	0,12893
8	$A_3B_2C_1$	0,25009	0,25009	0,25009	0,25009

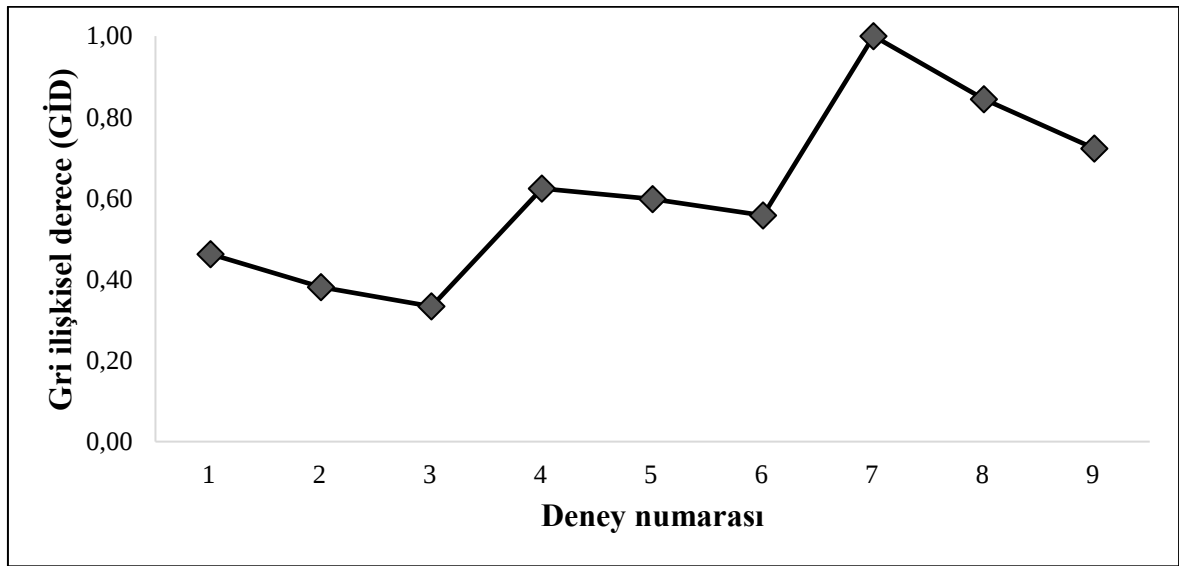
Çizelge 6.16. Her bir deney dizilimine ait Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametrelerinin kriter ağırlıklarının dikkate alınması ile hesaplanmış gri ilişkisel dereceleri (GİD) ve deney sıralaması

Deney nu.	Deney dizilimi	Gri ilişkisel derece, Y_i			
		Shannon entropi yöntemi göre hesaplanmış, Y_i	GİA'ya göre en iyi sıralama	Gri entropi yöntemine göre hesaplanmış, Y_i	GİA'ya göre en iyi sıralama
1	A ₁ B ₁ C ₁	0,45951	7	0,46231	7
2	A ₁ B ₂ C ₂	0,37770	8	0,38091	8
3	A ₁ B ₃ C ₃	0,33333	9	0,33333	9
4	A ₂ B ₁ C ₂	0,61000	4	0,62416	4
5	A ₂ B ₂ C ₃	0,58343	5	0,59833	5
6	A ₂ B ₃ C ₁	0,54347	6	0,55777	6
7	A ₃ B ₁ C ₃	1,00000	1	1,00000	1
8	A ₃ B ₂ C ₁	0,83297	2	0,84410	2
9	A ₃ B ₃ C ₂	0,69879	3	0,72292	3

GİA yönteminin son adımında, Çizelge 6.15’de kriter ağırlıklarıyla birlikte belirlenmiş olan GİK değerleri ve Eş. 5.37’deki hesaplama yöntemiyle gri ilişkisel derece (GİD) değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen GİD değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanarak en iyi (optimum) deney dizilimi Çizelge 6.16’daki gibi belirlenmiştir. Deney dizilimleri için her iki kriter ağırlıklandırma yöntemi sonucunda elde edilen GİD değerleri incelendiğinde en yüksek GİD değeri her iki yöntem için de 1,00000 olarak 7. deney olan A₃B₁C₃ diziliminde ve 8 mm (d), 20 mm (D) ve 30 mm (p) şartlarında bulunmuştur. GİD değerinin 1’e yakın veya 1 olması elde edilen deney diziliminin optimum deney dizilimini yüksek bir oranda belirleme kabiliyetinin olduğunu göstermektedir. En küçük GİD değeri ise her iki kriter ağırlıklandırma yöntemi için 0,33333 değerine sahip olan 3. deney olan A₁B₃C₃ diziliminde ve 2 mm (d), 40 mm (d) ve 30 mm (p) şartlarında bulunmuştur. Çizelge 6.16’da listelenen GİD’lerin ortalaması Shannon entropi yöntemi için 0,60436 ve Gri entropi yöntemi için 0,61376 olarak bulunmuştur. Kriter ağırlıklandırma yöntemleri kullanılarak hesaplanmış GİD değerlerinin yapılan deneyler ile değişimleri Şekil 6.13 ve Şekil 6.14’de verilmiştir.



Şekil 6.13. Kriter ağırlıklandırma yöntemi olarak shannon entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD değerlerinin yapılan deneyler ile değişimi



Şekil 6.14. Kriter ağırlıklandırma yöntemi olarak gri entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD değerlerinin yapılan deneyler ile değişimi

Şekil 6.13 ve Şekil 6.14 incelendiğinde en yüksek GİD değeri her iki kriter ağırlıklandırma yöntemine bağlı olarak 7. deney olan $A_3B_1C_3$ diziliminde elde edildiği açıkça görülmektedir. Gri entropi yöntemiyle belirlenen kriter ağırlıkları incelendiğinde tüm kriterlerin en iyi deney diziliminin bulunmasında eşit etkiye sahip olduğu yorumu yapılabilir. Bu nedenle Shannon entropi yöntemine göre kriter ağırlıkları belirlenerek hesaplanmış olan GİD'ler ile Gri entropi yöntemine göre belirlenen kriter ağırlıklarının dikkate alınarak bulunduğu GİD'ler arasındaki ortalama bağıl hata miktarı Gri GİD'lerin gerçek değer olarak

dikkate alınması durumunda %1,49 oranında bulunmuştur. Görüldüğü gibi bağıl hata miktarlarının ortalamaları çok düşük çıkmıştır. Kullanılan farklı kriter ağırlıklandırma yöntemlerinden biri tercih edilerek de GİD değerlerinin hesaplanması sonucunda elde edilen en iyi dizilimin değişmeyeceği böylece kanıtlanmıştır.

Çizelge 6.17. Kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen gri ilişkisel dereceleri için tepki dağılımı

Sembol	Parametre	Seviler			Maks.-Min.
		1	2	3	
A	Tel çapı (d, mm)	0,39018	0,57897	0,84392*	0,45374
B	Yay çapı (D, mm)	0,68984*	0,59804	0,52520	0,16464
C	Yay adımı (p, mm)	0,61198	0,56216	0,63892*	0,07676

*işareti optimum parametreleri ifade etmektedir.

Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak L_9 ortogonal diziye göre GİD'ler belirlendikten sonra her girdi parametresinin (değişkeninin) her bir seviyesi için GİD tepki değerleri belirlenmiştir. Kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'ler için tepki dağılımı Çizelge 6.17'de ve kriter ağırlıklandırmada Gri entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'ler için tepki dağılımı Çizelge 6.18'de sunulmuştur. Her girdi parametresinin (değişkeninin) her bir seviyesi için GİD'lerin ortalaması ele alınan seviye değerindeki tepki miktarını vermiştir.

Çizelge 6.18. Kriter ağırlıklandırmada Gri entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen gri ilişkisel dereceleri için tepki dağılımı

Sembol	Parametre	Seviler			Maks.-min.
		1	2	3	
A	Tel çapı (d, mm)	0,39218	0,59342	0,85568*	0,46349
B	Yay çapı (D, mm)	0,69549*	0,60778	0,53801	0,15748
C	Yay adımı (p, mm)	0,62139	0,57600	0,64389*	0,06789

*işareti optimum parametreleri ifade etmektedir.

Çizelge 6.17 ve Çizelge 6.18'de verilen her bir girdi parametresinin en yüksek değere sahip olan seviyesi yapılan deneysel çalışmadaki optimum (en iyi) deney dizilimine ait seviyeleri

göstermektedir. Çizelge 6.18'e göre A parametresi olarak tanımlanan tel çapı (d , mm) girdi faktörünün 3. seviyesi, B parametresi olarak tanımlanan yay çapı (D , mm) girdi faktörünün 1. seviyesi ve C parametresi olarak tanımlanan yay adımı (p , mm) girdi faktörünün 3. seviyesi en yüksek GİD tepki değerlerine sahiptir. A, B ve C parametrelerine ait en yüksek GİD tepki değerleri, kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla sırasıyla 0,84392, 0,68984 ve 0,63892 olarak bulunmuştur. Ayrıca aynı parametrelere ait en yüksek GİD tepki değerleri, kriter ağırlıklandırmada Gri entropi yönteminin kullanılmasıyla sırasıyla 0,85568, 0,69549 ve 0,64389 olarak hesaplanmıştır. Tepki dağılımı çizelgelerinde de görüldüğü gibi en iyi dizilim $A_3B_1C_3$ deney dizilimi olarak 8 mm tel çapında, 20 mm yay çapında ve 30 mm yay adımında bulunmuştur. Böylece yapılan deneysel çalışma ile elde edilen optimizasyon sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Çizelge 6.17 ve Çizelge 6.18'de verilmiş olan maks.-min. değerleri her bir parametrenin tüm seviyelerdeki en büyük ve en küçük değerlerinin farkından oluşmaktadır. Maks.-min. değeri Çizelge 6.17'de 0,45374 olarak A parametresi yani tel çapı (d , mm) için bulunmuştur. Benzer şekilde maks.-min. değeri Çizelge 6.18'de 0,46349 olarak yine A parametresi yani tel çapı (d , mm) için bulunmuştur. Maks.-min. değerinin anlamı, enerji depolama performansının kalite parametrelerini etkileyen 3 girdi faktöründen en etkilisinin tel çapı (d , mm) olduğunu ve yapılacak taarımlarda d 'nin değişiminin daha ön planda olması gerektiğini göstermektedir.

6.4.3. Doğrulama deneylerinin yapılması

Optimizasyon işlemi sonucunda bulunan en iyi deney diziliminin doğruluğu bu aşamada kontrol edilmektedir. İlk olarak bir başlangıç deney dizilimi belirlenmektedir. Başlangıç deney dizilimi GİD'lerin tepki dağılımında bulunan ortalama eğriye yakın olan faktör seviyesinin başlangıç diziliminde kullanılmasıyla elde edilebilmektedir. Farklı araştırmacılar tarafından başlangıç deney dizilimi olarak ortogonal dizilerin kullanılmasıyla elde edilen ilk deney dizilimi de kullanılmaktadır [98, 105, 135]. Yapılan tez çalışması kapsamında kriter ağırlıklandırma yöntemine göre 2 farklı GİD tepki dağılımı elde edilmiştir. Bu nedenle doğrulama deneylerinin yapılmasında da bu yaklaşım sürdürülmüştür. Bu çalışmada tüm girdi parametrelerinin orta seviyelerindeki değerlerden oluşan $A_2B_2C_2$ deney dizilimi başlangıç deney dizilimi olarak seçilmiştir. Ayrıca bu dizilimin GİD tepki dağılımındaki değerleri ortalama GİD'lere yakın değerlerdir.

Çizelge 6.19. Kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'nin deneysel doğrulama sonuçları

	Başlangıç parametresi	Optimum parametre	
		Tahmini deney dizilimi sonucu	Deneysel deney dizilimi sonucu
Seviye	$A_2B_2C_2$	$A_3B_1C_3$	$A_3B_1C_3$
GİD	0,58799	0,96397	1,00000
S/N oranı (dB)	-4,61260	-0,27369	0,00000

Çizelge 6.19'da kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'nin başlangıç deney dizilimine göre deneysel doğrulama sonuçları verilmiştir. GİA yöntemiyle elde edilen optimum deney dizilimi olan $A_3B_1C_3$ deneyi, Taguchi deney tasarımıda yer almaktadır. En iyi dizilimin deneysel sonuçları yapılan ölçüm ve hesaplamalarla belirlenmiştir. Bunun yanında optimum dizilime ait tahmini deney veya ölçüm sonuçları Minitab 17 yazılımının ilgili arayüzleri kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca başlangıç deney dizilimine ait GİD değeri, GİA yönteminde kullanılan yaklaşım ile hesaplanmıştır. Başlangıç dizilimine ait GİD değeri 0,58799 olarak bulunmuştur. GİA yöntemi ile belirlenen optimum deney dizilimine ait deneysel GİD değeri ise 1,00000 olarak bulunmuştur. Optimum dizilime ait GİD değeri başlangıçtaki dizilime göre %70,07 oranında arttırılmıştır. Bunun yanında tahmini olarak elde edilen optimum dizilimin GİD değeri 0,96397 olarak deneysel sonuca yakın ve uyumlu bir şekilde bulunmuştur. Benzer şekilde “En büyük-en iyi” yaklaşımı kullanılarak hesaplanan S/N oranları incelendiğinde başlangıç deney dizilimine ait -4,61260 dB değerindeki S/N oranı, optimum deney diziliminde 0,00000 dB olarak bulunmuştur. Böylece başlangıç dizilimine ait S/N oranı ile optimum dizilime ait S/N oranı arasında %100 oranında bir değişim meydana getirilmiştir. GİD değeri optimum deney dizilimi için 1,00000 olduğundan S/N oranı da 0,00000 dB olarak hesaplanmıştır. Çünkü GİA yöntemiyle belirlenmiş olan en iyi deney dizilimi istenilen optimum şartları sağlamaktadır. Başlangıç deney dizilimine ait S/N oranı, optimum dizilimin tahmini S/N oranı ile karşılaştırıldığında GİD değerlerindeki artışa paralel olarak S/N oranlarında da bir artış meydana gelmiştir. Bu artış 4,33891 dB olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 6.20. Kriter ağırlıklandırmada Gri entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen gri ilişkisel derecenin deneysel doğrulama sonuçları

	Başlangıç parametresi	Optimum parametre	
		Tahmini deney dizilimi sonucu	Deneysel deney dizilimi sonucu
Seviye	$A_2B_2C_2$	$A_3B_1C_3$	$A_3B_1C_3$
GİD	0,59617	0,96753	1,00000
S/N oranı (dB)	-4,49260	-0,24225	0,00000

Çizelge 6.20’de kriter ağırlıklandırmada Gri entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD’nin başlangıç deney dizilimine göre deneysel doğrulama sonuçları verilmiştir. En iyi dizilimin deneysel sonuçları yapılan ölçüm ve hesaplamalarla belirlenmiştir. Bunun yanında optimum dizilime ait tahmini deney veya ölçüm sonuçları Minitab 17 yazılımının ilgili arayüzleri kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca başlangıç deney dizilimine ait GİD değeri, GİA yönteminde kullanılan yaklaşım ile hesaplanmıştır. Başlangıç dizilimine ait GİD değeri 0,59617 olarak bulunmuştur. GİA yöntemi ile belirlenen optimum deney dizilimine ait deneysel GİD değeri ise 1,00000 olarak bulunmuştur. Optimum dizilime ait GİD değeri başlangıçtaki dizilime göre %67,74 oranında arttırılmıştır. Bunun yanında tahmini olarak elde edilen optimum dizilimin GİD değeri 0,96753 olarak deneysel sonuca yakın ve uyumlu bir şekilde bulunmuştur. Benzer şekilde “En büyük-en iyi” yaklaşımı kullanılarak hesaplanan S/N oranları incelendiğinde başlangıç deney dizilimine ait -4,49260 dB değerindeki S/N oranı, optimum deney diziliminde 0,00000 dB olarak bulunmuştur. Böylece başlangıç dizilimine ait S/N oranı ile optimum dizilime ait S/N oranı arasında %100 oranında bir değişim meydana getirilmiştir. GİD değeri optimum deney dizilimi için 1,00000 olduğundan S/N oranı da 0,00000 dB olarak hesaplanmıştır. Çünkü GİA yöntemiyle belirlenmiş olan en iyi deney dizilimi istenilen optimum şartları sağlamaktadır. Başlangıç deney dizilimine ait S/N oranı, optimum dizilimin tahmini S/N oranı ile karşılaştırıldığında GİD değerlerindeki artışa paralel olarak S/N oranlarında da bir artış meydana gelmiştir. Bu artış 4,25035 dB olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 6.19 ve Çizelge 6.20’de GİA yöntemi sonucunda elde edilen iki farklı GİD’nin deneysel doğrulama sonuçlarına ait uygulanan yaklaşım, sonuç parametresi (değerlendirme kriteri) olarak belirlenmiş olan Δt , ZBİO, η ve EDVİO bağımlı değişkenler için de ayrı ayrı uygulanmış ve sırasıyla aşağıdaki gibi sunulmuştur.

Çizelge 6.21. Δt 'nin deneysel doğrulama sonuçları

	Başlangıç parametresi	Optimum parametre	
		Tahmini deney dizilimi sonucu	Deneysel deney dizilimi sonucu
Seviye	$A_2B_2C_2$	$A_3B_1C_3$	$A_3B_1C_3$
Δt	180	151,667	151
S/N oranı (dB)	-45,1055	-43,6382	-43,5795

Çizelge 6.21’de Δt ’nin deneysel doğrulama sonuçları verilmiştir. Başlangıç parametresi olarak belirlenmiş olan $A_2B_2C_2$ deney dizilimi Taguchi deney tasarımında yer almadığı için öncelikle bu dizilimin deneysel ölçümleri yapılmıştır. $A_2B_2C_2$ başlangıç dizilimine ait Δt 180 dk. olarak bulunmuştur. Optimum parametre olarak belirlenmiş olan $A_3B_1C_3$ deney dizilimine ait Δt , başlangıç dizilimine göre %16,11 oranında düşürülerek 151 dk. olarak bulunmuştur. GIIED ünitesindeki FDM’nin Δt değerinin düşük olmasının daha iyi olacağı göz önüne alındığında GİA yöntemiyle elde edilen optimum deney diziliminin bu şartı yerine getirdiği açıkça görülmektedir. Ayrıca optimum dizilime ait tahmini ve deneysel Δt değerleri arasında 0,667 dk’lık bir fark bulunmaktadır. Bu iki değer arasındaki farkın küçük olması elde edilen değerlerin uyumlu olduğunu göstermiştir. Bunun yanında “En küçük-en iyi” S/N oranı belirleme yaklaşımı kullanılarak hesaplanmış olan S/N oranları incelendiğinde başlangıç dizilimine ait S/N oranı -45,1055 dB olarak bulunmuştur. Optimum deney diziliminin deneysel sonucuna göre hesaplanan S/N oranı ise başlangıç dizilimine göre 1,5260 dB iyileştirilerek -43,5795 dB olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında Minitab 17 yazılımı ile elde edilen optimum deney diziliminin tahmini S/N oranı ile deneysel dizilimin S/N oranı arasında 0,0587 dB kadarlık bir fark bulunmaktadır. Aradaki farkın çok küçük olması tahmini ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.22. ZBİO’nun deneysel doğrulama sonuçları

	Başlangıç parametresi	Optimum parametre	
		Tahmini deney dizilimi sonucu	Deneysel deney dizilimi sonucu
Seviye	$A_2B_2C_2$	$A_3B_1C_3$	$A_3B_1C_3$
ZBİO	1,32778	1,56925	1,58278
S/N oranı (dB)	2,46252	3,92976	3,98841

Çizelge 6.22’de ZBİO’nun deneysel doğrulama sonuçları verilmiştir. Başlangıç parametresi olarak belirlenmiş olan $A_2B_2C_2$ deney dizilimi Taguchi deney tasarımıyla yer almadığı için öncelikle bu dizilimin deneysel ölçümleri yapılmıştır. $A_2B_2C_2$ başlangıç dizilimine ait ZBİO 1,32778 olarak bulunmuştur. Optimum parametre olarak belirlenmiş olan $A_3B_1C_3$ deney dizilimine ait ZBİO, başlangıç dizilimine göre %19,20 oranında yükseltilecek 1,58278 olarak bulunmuştur. GIIED ünitesindeki FDM’nin Δt değerinin düşük olmasına bağlı olarak ZBİO değerinin daha iyi olacağı göz önüne alındığında GİA yöntemiyle elde edilen optimum deney diziliminin bu şartı yerine getirdiği açıkça görülmektedir. Ayrıca optimum dizilime ait tahmini ve deneysel ZBİO değerleri arasında 0,01353 kadarlık bir fark bulunmaktadır. Bu iki değer arasındaki farkın küçük olması elde edilen değerlerin uyumlu olduğunu göstermiştir. Bunun yanında “En büyük-en iyi” S/N oranı belirleme yaklaşımı kullanılarak hesaplanmış olan S/N oranları incelendiğinde başlangıç dizilimine ait S/N oranı 2,46252 dB olarak bulunmuştur. Optimum deney diziliminin deneysel sonucuna göre hesaplanan S/N oranı ise başlangıç dizilimine göre 1,52589 dB iyileştirilerek 3,98841 dB olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında Minitab 17 yazılımı ile elde edilen optimum deney diziliminin tahmini S/N oranı ile deneysel dizilimin S/N oranı arasında 0,05865 dB kadarlık bir fark bulunmaktadır. Aradaki farkın çok küçük olması tahmini ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.23. η ’nin deneysel doğrulama sonuçları

	Başlangıç parametresi	Optimum parametre	
		Tahmini deney dizilimi sonucu	Deneysel deney dizilimi sonucu
Seviye	$A_2B_2C_2$	$A_3B_1C_3$	$A_3B_1C_3$
η	0,89577	0,97572	0,97736
S/N oranı (dB)	-0,95607	-0,22007	-0,19891

Çizelge 6.23’de η ’nin deneysel doğrulama sonuçları verilmiştir. Başlangıç parametresi olarak belirlenmiş olan $A_2B_2C_2$ deney dizilimi Taguchi deney tasarımıyla yer almadığı için öncelikle bu dizilimin deneysel ölçümleri yapılmıştır. $A_2B_2C_2$ başlangıç dizilimine ait ZBİO 0,89577 olarak bulunmuştur. Optimum parametre olarak belirlenmiş olan $A_3B_1C_3$ deney dizilimine ait η , başlangıç dizilimine göre %9,11 oranında artırılarak 0,97736 olarak bulunmuştur. GIIED ünitesindeki FDM’nin Δt değerinin düşük olmasıyla kaynaktan gelen yapay güneş enerjisinin daha hızlı şekilde ve daha az ısı kaybıyla GIIED ünitesi tarafından

depolanacağı göz önüne alındığında GİA yöntemiyle elde edilen optimum deney diziliminin bu şartı yerine getirdiği açıkça görülmektedir. Ayrıca optimum dizilime ait tahmini ve deneysel η değerleri arasında 0,00164 kadarlık bir fark bulunmaktadır. Bu iki değer arasındaki farkın küçük olması elde edilen değerlerin uyumlu olduğunu göstermektedir. Bunun yanında “En büyük-en iyi” S/N oranı belirleme yaklaşımı kullanılarak hesaplanmış olan S/N oranları incelendiğinde başlangıç dizilimine ait S/N oranı -0,95607 dB olarak bulunmuştur. Optimum deney diziliminin deneysel sonucuna göre hesaplanan S/N oranı ise başlangıç dizilimine göre 0,75716 dB iyileştirilerek -0,19891 dB olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında Minitab 17 yazılımı ile elde edilen optimum deney diziliminin tahmini S/N oranı ile deneysel dizilimin S/N oranı arasında 0,02116 dB kadarlık bir fark bulunmaktadır. Aradaki farkın çok küçük olması tahmini ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.24’de EDVİO’nun deneysel doğrulama sonuçları verilmiştir. Başlangıç parametresi olarak belirlenmiş olan $A_2B_2C_2$ deney dizilimi Taguchi deney tasarımında yer almadığı için öncelikle bu dizilimin deneysel ölçümleri yapılmıştır. $A_2B_2C_2$ başlangıç dizilimine ait EDVİO 1,31849 olarak bulunmuştur. Optimum parametre olarak belirlenmiş olan $A_3B_1C_3$ deney dizilimine ait EDVİO, başlangıç dizilimine göre %9,11 oranında arttırılarak 1,43858 olarak bulunmuştur. YTITA içeren GIİED ünitesi tarafından depolanan enerjinin, YTITA içermeyen boş durumundaki GIİED ünitesi tarafından depolana enerji miktarına oranı olarak tanımlanmış olan EDVİO’nun daha yüksek miktarda enerji depolayabilecek GIİED ünitesi tasarımının optimum parametrelerinin belirlenmesinde GİA yöntemiyle elde edilen optimum deney diziliminin bu şartı yerine getirdiği açıkça görülmektedir. Ayrıca optimum dizilime ait tahmini ve deneysel EDVİO değerleri arasında 0,00241 kadarlık bir fark bulunmaktadır. Bu iki değer arasındaki farkın küçük olması elde edilen değerlerin uyumlu olduğunu göstermektedir. Bunun yanında “En büyük-en iyi” S/N oranı belirleme yaklaşımı kullanılarak hesaplanmış olan S/N oranları incelendiğinde başlangıç dizilimine ait S/N oranı 2,40154 dB olarak bulunmuştur. Optimum deney diziliminin deneysel sonucuna göre hesaplanan S/N oranı ise başlangıç dizilimine göre 0,75714 dB iyileştirilerek 3,15868 dB olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında Minitab 17 yazılımı ile elde edilen optimum deney diziliminin tahmini S/N oranı ile deneysel dizilimin S/N oranı arasında 0,02117 dB kadarlık bir fark bulunmaktadır. Aradaki farkın çok küçük olması tahmini ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.24. EDVİO'nun deneysel doğrulama sonuçları

	Başlangıç parametresi	Optimum parametre	
		Tahmini deney dizilimi sonucu	Deneysel deney dizilimi sonucu
Seviye	$A_2B_2C_2$	$A_3B_1C_3$	$A_3B_1C_3$
EDVİO	1,31849	1,43617	1,43858
S/N oranı (dB)	2,40154	3,13751	3,15868

Tüm sonuç parametreleri ve GİD'ler için yapılan tüm doğrulama deneyleri incelendiğinde, yapılan Taguchi tabanlı GİA sonucunda belirlenen optimum deney diziliminin tüm sonuç parametrelerinde en yüksek sonuçları verdiği belirlenmiştir. Böylece yapılan optimizasyon işleminin en iyi dizilimi belirleyebildiği sonucuna ulaşılmıştır.

6.4.4. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Değişkenlerin analizi olarak tanımlanan ANOVA (Analysis of Variance), belirlenen parametrelerin istatistiki olarak sonuç (cevap) değişkeni üzerinde hangi oranda etkisinin olduğunun belirlenmesi için kullanılmaktadır [129]. ANOVA, bağımlı değişken üzerinde ölçülen toplam varyansı kaynaklarına veya bileşenlerine ayırmamıza (bölmemize) izin veren istatistiksel bir süreçtir [136]. ANOVA analizinde her bir sonuç veya cevap değişkeninin uygun olan yaklaşım ile belirlenmiş S/N oranlarına ihtiyaç duyulmaktadır. S/N belirleme yaklaşımlarında hangisi kullanılırsa kullanılsın, parametrelerin optimal değeri en büyük S/N oranına sahip değer ile sağlanmaktadır [147]. Kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi ve Gri entropi yöntemlerinin kullanılmasıyla hesaplanmış GİD'lerin ANOVA sonuçları Çizelge 6.25 ve Çizelge 6.26'da verilmiştir. Varyans analizi Minitab 17 yazılımı kullanılarak %95 güven aralığında ve "En büyük-en iyi" S/N oranı belirleme yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 6.25'de yer alan girdi parametrelerinden tel çapının (d, mm) p değeri, anlamlılık düzeyi (α) olan 0,05 değerinden küçük olduğu için ($0,007 < 0,05$) Shannon entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD ile arasında anlamlı bir ilişki olduğu görülmüştür. Ayrıca yüzde katkı oranı (%PCR) değeri d için %87,20 olarak hesaplanmıştır. d'nin p değerine bağlı olarak Shannon entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD üzerindeki etkisinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanında yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) için

hesaplanan p değerleri sırasıyla 0,055 ve 0,344 olarak bulunmuştur. Bu iki değer 0,05 değerinden yüksek olduğu için Shannon entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD ile aralarında anlamlı bir ilişkinin olmadığı görülmüştür. İlişkinin anlamlı olmaması D ve p'nin Shannon entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD üzerinde etkisinin olmadığı anlamını taşımamaktadır. d değerine kıyasla daha az miktarda etki göstermektedir. D ve p'nin Shannon entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD üzerinde %9,81 ve %0,55 kadarlık bir yüzde etkisi bulunmaktadır. Böylece Shannon entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD üzerinde girdi parametrelerinin etkisi $d > D > p$ sıralamasındaki gibi bulunmuştur. Bunun yanında bütün girdi parametrelerinin PCR değerlerinin toplamı %97,56 olarak hesaplanmıştır. F-test değerleri, Eş. 5.62 ve Demirrutku ve diğeleri [163] tarafından hazırlanmış çizelgeler kullanılarak belirlenmiş olan ve Çizelge 6.25'de verilen F-tablo değerleri ile karşılaştırılmıştır. Varyans analizi ile her bir girdi parametresi için elde edilen F-test değerlerinin F-tablo değerlerinden yüksek olanının değerlendirilen sonuç parametresi üzerindeki etkisinin varlığından söz edilmektedir. F-tablo değeri 19 olarak bulunmuştur. d'ye ait F-test değeri 144,24 olduğu için F-tablo değerinden büyüktür. Diğer girdi değişkenleri için bulunan F-test değerleri, F-tablo değerlerinden küçüktür. Çizelge 6.25 incelendiğinde p değeri (anlamlılık düzeyi) ve PCR değerleri ile benzer şekilde sonuç değişkeni üzerinde en büyük etkinin d tarafından olduğu açıkça görülmektedir.

Çizelge 6.25. Kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen gri ilişkisel derecenin (GİD) S/N oranına göre ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	F-tablo	P değeri	Yüzde katkı oranı (%PCR)
Tel çapı (d, mm)	2	67,0672	33,5336	144,24	19	0,007	87,20
Yay çapı (D, mm)	2	7,9570	3,9785	17,11	19	0,055	9,81
Yay adımı (p, mm)	2	0,8875	0,4437	1,91	19	0,344	0,55
Hata	2	0,4650	0,2325				2,44
Toplam	8	76,3766					100

Seo ve diğeleri [102], sonuç parametrelerinin performans özelliklerini etkileyen tüm önemli girdi faktörlerinin dikkate alındığından emin olmak için ANOVA sonuçlarındaki hata

ifadesinin PCR değerinin %15'in altında olması gerektiğini açıklamıştır. Yapılan ANOVA çalışmasında toplam hata miktarının etkisi %2,44 olarak bulunmuştur. Böylece yapılan ANOVA çalışmasında yer alan tüm girdi değişkenlerinin önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. GİA yöntemi sonucunda Shannon entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD değerlerine ait S/N oranlarının kullanılması ile gerçekleştirilen ANOVA çalışmasının kabul edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 6.26'da yer alan girdi parametrelerinden d'nin p değeri (anlamlılık düzeyi), 0,05 değerinden küçük olduğu için ($0,007 < 0,05$) Gri entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD ile arasında anlamlı bir ilişki olduğu görülmüştür. Ayrıca yüzde katkı oranı (%PCR) değeri d için %88,38 olarak hesaplanmıştır. d'nin p değerine (anlamlılık düzeyi) bağlı olarak Gri entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD üzerindeki etkisinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanında D ve p için hesaplanan p değerleri (anlamlılık düzeyi) sırasıyla 0,061 ve 0,399 olarak bulunmuştur. Bu iki değer 0,05 değerinden yüksek olduğu için Gri entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD ile aralarında anlamlı bir ilişkinin olmadığı görülmüştür. İlişkinin anlamlı olmaması D ve p'nin Gri entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD üzerinde etkisinin olmadığı anlamını taşımamakta, sadece d değerine kıyasla daha az miktarda etkisi olduğunu göstermektedir. D ve p'nin Gri entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD üzerinde %8,85 ve %0,31 kadarlık bir PCR'si bulunmaktadır. Böylece Gri entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD üzerinde girdi parametrelerinin etkisi $d > D > p$ sıralamasındaki gibi bulunmuştur. Bunun yanında bütün girdi parametrelerinin PCR değerlerinin toplamı %97,54 olarak hesaplanmıştır. F-test değerleri, Eş. 5.62 ve Demirrutku ve diğeleri [163] tarafından hazırlanmış çizelgeler kullanılarak belirlenmiş olan ve Çizelge 6.26'da verilen F-tablo değerleri ile karşılaştırılmıştır. Varyans analizi ile her bir girdi parametresi için elde edilen F-test değerlerinin F-tablo değerlerinden yüksek olanının değerlendirilen sonuç parametresi üzerindeki etkisinin varlığından söz edilmektedir. F-tablo değeri 19 olarak bulunmuştur. d'ye ait F-test değeri 145,10 olduğu için F-tablo değerinden büyüktür. Diğer girdi değişkenleri için bulunan F-test değerleri, F-tablo değerlerinden küçüktür. Çizelge 6.25 incelendiğinde p değeri (anlamlılık düzeyi) ve PCR değerleri ile benzer şekilde sonuç değişkeni üzerinde en büyük etkinin d tarafından olduğu açıkça görülmektedir.

Çizelge 6.26. Kriter ağırlıklandırmada Gri entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen gri ilişkisel derecenin (GİD) S/N oranına göre ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	F-tablo	P değeri	Yüzde katkı oranı (%PCR)
Tel çapı (d, mm)	2	69,0875	34,5437	145,10	19	0,007	88,38
Yay çapı (D, mm)	2	7,3486	3,6743	15,43	19	0,061	8,85
Yay adımı (p, mm)	2	0,7173	0,3586	1,51	19	0,399	0,31
Hata	2	0,4761	0,2381				2,46
Toplam	8	77,6295					100

ANOVA sonuçlarının doğruluğunun araştırılmasında, Seo ve diğerleri [102] tarafından açıklanan yaklaşım burada da göz önüne alınmıştır. Çizelge 6.26'daki hatanın PCR değeri %2,46 olarak hesaplanmıştır. Bu değer Seo ve diğerleri [102]'nin ifade ettiği %15 değerinden düşük bulunmuştur. Böylece yapılan ANOVA çalışmasında yer alan tüm girdi değişkenlerinin önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. GİA yöntemi sonucunda Gri entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmış GİD değerlerine ait S/N oranlarının kullanılması ile gerçekleştirilen ANOVA çalışmasının kabul edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 6.25 ve Çizelge 6.26'da verilen ANOVA sonuçları birbirleriyle uyum içerisindedir.

Taguchi tabanlı GİA yöntemi sonucunda elde edilen GİD değerleri üzerindeki her bir girdi parametresi veya girdi faktörünün etki yüzdeleri Çizelge 6.25 ve Çizelge 6.26'da verilmiştir. Aşağıda verilen Çizelge 6.27 ve Çizelge 6.28'de ise FDM'nin Δt 'si ve Δt değerlerinin oranlanması ile tanımlanmış olan ZBİO değerlerinin varyans analizi (ANOVA) sonuçları sunulmuştur. Δt ve ZBİO için varyans analizi Minitab 17 yazılımı kullanılarak %95 güven aralığında yapılmıştır. Δt 'nin S/N oranlarının belirlenmesinde "En küçük-en iyi" S/N oranı belirleme yaklaşımı kullanılmıştır. ZBİO'nun S/N oranlarının belirlenmesinde ise "En büyük-en iyi" S/N oranı belirleme yaklaşımı kullanılmıştır. İki farklı S/N yaklaşımı kullanılmasına karşın Çizelge 6.27 ve Çizelge 6.28'de verilmiş olan ANOVA sonuçları benzerlik göstermiştir.

Çizelge 6.27 ve Çizelge 6.28’de yer alan girdi parametrelerinden d’nin p değeri (anlamlılık düzeyi) 0,05 değerinden küçük olduğu için ($0,006 < 0,05$) Δt ve ZBİO ile arasında ayrı ayrı anlamlı bir ilişki olduğu görülmüştür. Ayrıca her iki çizelge için PCR değeri d için %83,04 olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında D’nin p değeri (anlamlılık düzeyi) de 0,05 değerinden küçük olduğu için ($0,036 < 0,05$) Δt ve ZBİO ile arasında ayrı ayrı anlamlı bir ilişki olduğu görülmüştür. Her iki çizelge için PCR değeri D için %13,33 olarak bulunmuştur. p için hesaplanan p değerleri (anlamlılık düzeyi) ise Çizelge 6.27 ve Çizelge 6.28’de 0,203 olarak bulunmuştur. Bu değer 0,05 değerinden yüksek olduğu için Δt ve ZBİO ile aralarında ayrı ayrı anlamlı bir ilişkinin olmadığı görülmüştür. İlişkinin anlamlı olmaması p’nin Δt ve ZBİO üzerinde etkisinin olmadığı anlamını taşımamaktadır. d ve D’ye kıyasla daha az miktarda etki göstermektedir. p’nin Δt ve ZBİO %1,54 kadarlık bir yüzde etkisi bulunmaktadır. Böylece Δt ve ZBİO üzerinde girdi parametrelerinin etkisi $d > D > p$ sıralamasındaki gibi bulunmuştur. Bunun yanında bütün girdi parametrelerinin PCR değerlerinin toplamı %97,91 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.27. Δt ’nin S/N oranına göre ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	F-tablo	P değeri	Yüzde katkı oranı (%PCR)
Tel çapı (d, mm)	2	9,9945	4,99727	159,74	19	0,006	83,04
Yay çapı (D, mm)	2	1,6571	0,82855	26,48	19	0,036	13,33
Yay adımı (p, mm)	2	0,2463	0,12315	3,94	19	0,203	1,54
Hata	2	0,0626	0,03128				2,09
Toplam	8	11,9605					100

F-test değerleri, Eş. 5.62 ve Demirrutku ve diğeleri [163] tarafından hazırlanmış çizelgeler kullanılarak belirlenmiş olan ve Çizelge 6.27 ve Çizelge 6.28’de verilen F-tablo değerleri ile karşılaştırılmıştır. Varyans analizi ile her bir girdi parametresi için elde edilen F-test değerlerinin F-tablo değerlerinden yüksek olanının değerlendirilen sonuç parametresi üzerindeki etkisinin varlığından söz edilmektedir. F-tablo değeri 19 olarak bulunmuştur. Çizelge 6.27’de d ve D’ye ait F-test değerleri sırasıyla 159,74 ve 26,48 olarak bulunduğu için F-tablo değerinden büyüktür. Son girdi değişkeni olan p’ye ait F-test değeri ise F-tablo

değerinden düşük bulunmuştur. Benzer şekilde Çizelge 6.28’de de d ve D’ye ait F-test değerleri sırasıyla 159,78 ve 26,49 olarak bulunmuştur. İncelenen girdi parametreleri için F-test değerleri F-tablo değerinden yüksek bulunmuştur. Son girdi değişkeni olan p’ye ait F-test değeri de F-tablo değerinden düşük çıkmıştır. Çizelge 6.27 ve Çizelge 6.28 incelendiğinde p değeri (anlamlılık düzeyi) ve PCR değerleri ile benzer şekilde Δt ve ZBİO üzerinde en büyük etkinin d tarafından olduğu ve sonrasında ise D’nin de etkisinin hissedilir olduğu açıkça görülmektedir. Δt ve ZBİO sonuç parametreleri için yapılan ANOVA çalışmasında toplam hata miktarının etkisi Çizelge 6.27 ve Çizelge 6.28’de %2,09 olarak bulunmuştur. Seo ve diğerleri [102] tarafından yapılan açıklamalar ışığında, yapılan ANOVA çalışmasında yer alan tüm girdi değişkenlerinin önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Δt ve ZBİO değerlerine ait S/N oranlarının kullanılması ile gerçekleştirilen ANOVA çalışmasının kabul edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır

Çizelge 6.28. ZBİO’nun S/N oranına göre ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	F-tablo	P değeri	Yüzde katkı oranı (%PCR)
Tel çapı (d, mm)	2	9,9944	4,99719	159,78	19	0,006	83,04
Yay çapı (D, mm)	2	1,6571	0,82857	26,49	19	0,036	13,33
Yay adımı (p, mm)	2	0,2463	0,12314	3,94	19	0,203	1,54
Hata	2	0,0626	0,03128				2,09
Toplam	8	11,9603					100

Çizelge 6.29 ve Çizelge 6.30’da YTITA içeren GIİED ünitesinin η ’si ve η değerlerinin oranlanması ile tanımlanmış olan EDVİO değerlerinin varyans analizi (ANOVA) sonuçları sunulmuştur. η ve EDVİO için varyans analizi Minitab 17 yazılımı kullanılarak %95 güven aralığında yapılmıştır. η ve EDVİO değerlerinin S/N oranlarının belirlenmesinde “En büyük-en iyi” S/N oranı belirleme yaklaşımı kullanılmıştır. Aynı S/N yaklaşımı kullanılmasına karşın hesaplamadaki değerler farklıdır. Ama yine de Çizelge 6.29 ve Çizelge 6.30’da verilmiş olan ANOVA sonuçları benzerlik göstermiştir.

Çizelge 6.29 ve Çizelge 6.30’da yer alan girdi parametrelerinden d’nin p değeri (anlamlılık düzeyi) 0,05 değerinden küçük olduğu için ($0,039 < 0,05$) η ve EDVİO ile arasında ayrı ayrı anlamlı bir ilişki olduğu görülmüştür. Ayrıca her iki çizelge için PCR değeri d için %82,65 olarak hesaplanmıştır. D ve p için hesaplanan p değerleri (anlamlılık düzeyi) ise Çizelge 6.29 ve Çizelge 6.30’da sırasıyla 0,315 ve 0,549 olarak bulunmuştur. Bu değer 0,05 değerinden yüksek olduğu için η ve EDVİO ile aralarında ayrı ayrı anlamlı bir ilişkinin olmadığı görülmüştür. İlişkinin anlamlı olmaması D ve p’nin η ve EDVİO üzerinde etkisinin olmadığı anlamını taşımamaktadır. d’ye kıyasla daha az miktarda etki göstermektedir. D’nin η ve EDVİO üzerinde %4,09 kadarlık bir yüzde etkisi bulunmaktadır. Ayrıca p’nin η ve EDVİO üzerinde %0,62 kadarlık bir yüzde etkisi bulunmaktadır. Böylece η ve EDVİO üzerinde girdi parametrelerinin etkisi $d > D > p$ sıralamasındaki gibi bulunmuştur. Bunun yanında bütün girdi parametrelerinin PCR değerlerinin toplamı %87,36 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.29. η ’nün S/N oranına göre ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	F-tablo	P değeri	Yüzde katkı oranı (%PCR)
Tel çapı (d, mm)	2	7,1385	3,5693	24,03	19	0,039	82,65
Yay çapı (D, mm)	2	0,6266	0,3133	2,18	19	0,315	4,09
Yay adımı (p, mm)	2	0,2362	0,1181	0,82	19	0,549	0,62
Hata	2	0,2875	0,1438				12,64
Toplam	8	8,2888					100

Eş. 5.62 ve Demirrutku ve diğeleri [163] tarafından hazırlanmış çizelgeler kullanılarak belirlenmiş olan ve Çizelge 6.29 ve Çizelge 6.30’da verilen F-tablo değerleri, F-test değerleri ile karşılaştırılmıştır. Varyans analizi ile her bir girdi parametresi için elde edilen F-test değerlerinin F-tablo değerlerinden yüksek olanının, değerlendirilen sonuç parametresi üzerindeki etkisinin varlığından söz edilmektedir. F-tablo değeri 19 olarak bulunmuştur. Çizelge 6.29’da d’ye ait F-test değeri 24,03 olarak bulunduğu için F-tablo değerinden büyüktür. D ve p girdi değişkenlerine ait F-test değerleri ise F-tablo değerinden düşük bulunmuştur. Benzer şekilde Çizelge 6.30’da de d’ye ait F-test değeri 24,82 olarak bulunmuştur. İncelenen girdi parametresi için F-test değeri F-tablo değerinden yüksek

bulunmuştur. D ve p girdi değişkenlerine ait F-test değerleri de F-tablo değerinden düşük çıkmıştır. Çizelge 6.29 ve Çizelge 6.30 incelendiğinde p değeri (anlamlılık düzeyi) ve PCR değerleri ile benzer şekilde η ve EDVİO üzerinde en büyük etkinin d tarafından olduğu açıkça görülmektedir. η ve EDVİO sonuç parametreleri için yapılan ANOVA çalışmasında toplam hata miktarının etkisi Çizelge 6.29 ve Çizelge 6.30’da %12,64 olarak bulunmuştur. Seo ve diğerleri [102] tarafından yapılan açıklamalar ışığında, yapılan ANOVA çalışmasında yer alan tüm girdi değişkenlerinin önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. η ve EDVİO değerlerine ait S/N oranlarının kullanılması ile gerçekleştirilen ANOVA çalışmasının kabul edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır

Çizelge 6.30. EDVİO’nun S/N oranına göre ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	F-tablo	P değeri	Yüzde katkı oranı (%PCR)
Tel çapı (d, mm)	2	7,1383	3,5691	24,82	19	0,039	82,65
Yay çapı (D, mm)	2	0,6266	0,3133	2,18	19	0,315	4,09
Yay adımı (p, mm)	2	0,2361	0,1181	0,82	19	0,549	0,62
Hata	2	0,2876	0,1438				12,64
Toplam	8	8,2886					100

6.4.5. Güven aralıklarının belirlenmesi

Taguchi tabanlı GİA yöntemiyle optimize edilen deneysel veya sayısal çalışmalarda, hesaplanan veya ölçüm sonucunda bulunan verilerin güven aralıklarının da belirlenmesi gerekmektedir [134, 141, 164-168]. Güven aralığının belirlenmesi optimizasyon işlemi ile belirlenen deney diziliminin gerçekten optimum dizilim olup olmadığının tespiti için kullanılmaktadır [134, 141, 164-168]. Deneysel olarak elde edilen sonuçların güven aralığı (confidence interval, CI) Eş. 5.63 ve Eş. 5.64 kullanılarak hesaplanmaktadır [134, 141, 155-157, 160, 164-168]. Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametreleri için hesaplanmış olan güven aralığı değerleri Çizelge 6.31’de verilmiştir.

Çizelge 6.31’de verilen güven aralığı değerleri kullanılarak deneysel olarak bulunan Δt ’nin $150,6524 < 151 < 152,6816$ arasında olduğu belirlenmiştir. Deneysel ölçümlere dayanarak hesaplanan ZBİO’nun $0,55470 < 1,58278 < 2,58380$ arasında olduğu bulunmuştur. Deneysel olarak bulunan η ’nin $\%95,3967 < \%97,7360 < \%99,7473$ arasında olduğu ve son olarak deneysel ölçümler dikkate alınarak hesaplanan EDVİO’nun $0,73914 < 1,43858 < 3,61148$ arasında olduğu belirlenmiştir. En iyi deney dizilimine ait olan tüm sonuç parametrelerinin ölçülen ya da hesaplanan değerleri güven aralığının sınırları içerisinde bulunmuştur. Böylelikle, Taguchi tabanlı GİA yöntemiyle yapılan optimizasyon uygulamasının %5 anlamlılık düzeyinde başarılı olduğunu söylemek mümkündür.

Çizelge 6.31. Sonuç parametreleri için güven aralıkları

Sonuç parametresi	Güven aralığı
Δt	$\pm 1,01455$ (dk)
ZBİO	$\pm 1,01455$
η	$\pm 2,17531$ (%)
EDVİO	$\pm 2,17531$

6.4.6. Regresyon analizi

Regresyon analizi, elde olan bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkende meydana gelebilecek değişimlerin belirlenmesine imkân tanıyan matematiksel modellerin geliştirilmesi sürecidir. Ölçülen sonuç değerlerini temsil eden en iyi eğri denklemini belirlemek için kullanılan en yaygın yöntem, hataların kareler toplamını minimum yapan bir eğri denklemi türetme esasına dayanan en küçük kareler (EKK) yöntemidir [140, 145]. EKK yöntemi lineer regresyon işlemlerini içermektedir. Çoklu regresyon analizinde yer alan korelasyon katsayısının karesi (R^2) regresyon modelindeki bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı olarak tanımlanmaktadır [169, 170]. Bu değer 0-1 aralığında ve ne kadar yüksek ise eldeki regresyon eşitliği, bağımlı değişkeni o derecede iyi tahmin edebilmektedir. Tel çapı (d, mm) yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) parametreleri girdi parametreleri olarak değerlendirilmiş ve girdi parametrelerindeki değişimin sonuç parametreleri olan Δt , ZBİO, η ve EDVİO üzerindeki etkileri regresyon analizi ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan tez çalışması kapsamında Taguchi L₉ ortogonal deney dizilimi kullanıldığı için toplamda 9 adet deney yapılmıştır. Yapılan bu 9 deneyden ilk ve son deney regresyon eşitliğinin türetilmesinde yer almamıştır. Regresyon analizinde kullanılmayan 1. ve 9. deney sonuçları, türetilen regresyon eşitliğinin test edilmesinde kullanılmıştır. Regresyon analizine başlamadan önce bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyonun incelenmesi gerekmektedir. Elde edilen deneysel bulguların normal dağılım gösterdiği daha önce belirlendiği için yapılan bu tez çalışmasında bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyonlar, Pearson korelasyon testi (PKT) ile incelenmiştir. PKT, en az iki sürekli (bağımlı) veya süreksiz (bağımsız) değişken arasındaki ilişkiyi ifade etmek için kullanılmaktadır. Korelasyon katsayısı (r veya R) -1, +1 aralığında değer alabilmektedir. -1 değerine yakın olan değerler iki değişken arasındaki negatif yönlü yani biri artar iken diğerinin azalması ile sonuçlanan bir ilişkinin var olduğunu ifade etmektedir. Benzer şekilde +1 değerine yakın değerler ise iki değişken arasında pozitif yönlü bir ilişkinin varlığından ve bir değişkenin değerlerinin artışına paralel olarak diğer değişkenin değerlerinde de bir artış meydana geldiğini ifade etmektedir.

Çok değişkenli doğrusal regresyon analizi (ÇDDRA)

Δt için ÇDDRA

Çizelge 6.32. Δt ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d, mm) yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar

	Δt	Tel çapı (d, mm)	Yay çapı (D, mm)	Yay adımı (p, mm)
Δt	1,000	-0,976	0,630	0,187
Tel çapı (d, mm)	-0,976	1,000	-0,500	-0,227
Yay çapı (D, mm)	0,630	-0,500	1,000	-0,227
Yay adımı (p, mm)	0,187	-0,227	-0,227	1,000

Deneysel bulguların normal dağıldığı bilindiği için PKT, IBM SPSS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PKT’de 1. ve 9. deney test için ayrıldığı için 2’den 8’e kadar olan toplam 7 deney dikkate alınarak işlem yapılmıştır. Δt ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış

olan tel çapı (d, mm) yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.32’de sunulmuştur.

Dikkate alınan bağımsız değişkenler arasındaki PKT’nın Berry ve Feldman [180] tarafından ifade edilmiş olan 0,80 değerinden düşük olması gerekmektedir. Eğer R değeri 0,80’den büyük olursa çoklu doğrusallık meydana gelmekte ve bulunabilecek muhtemel anlamlı ilişkilerin bulunamamasına neden olmaktadır [180]. Anlamlı ilişkilerin bulunamaması da regresyon denkleminin sonuç parametresini istenilen düzeyde yordayamamasıyla sonuçlanmaktadır [180]. Çizelge 6.32 incelendiğinde bağımsız değişkenler arasındaki R’nin 0,80’den küçük olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanında bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasında lineer bir ilişkinin olması da önemlidir [180]. Δt ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan d, D ve p arasındaki R’ler sırasıyla -0,976, 0,630 ve 0,187 olarak bulunmuştur. Elde edilen R değerlerine göre Δt ile d arasında negatif yönlü çok kuvvetli bir ilişki, Δt ile D arasında kuvvetli bir ilişki ve Δt ile p arasında zayıf bir ilişkinin var olduğunu ifade etmektedir. İlişkinin zayıf olması, regresyon analizi sonucunda elde edilecek regresyon denkleminde p değişkenine ait katsayıların oldukça küçük olacağını anlamına gelmektedir

Çizelge 6.33. Δt için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları

Model	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	P değeri
Regresyon	3	5337,298	1779,099	52,114	0,004
Hata	3	102,417	34,139		
Toplam	6	5439,71			

Bağımsız değişkenler olan d, D ve p kombinasyonunun Δt bağımlı değişkeni ile olan R’si 0,991 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkende açıkladığı varyansı ifade eden R^2 değeri ise 0,981 olarak elde edilmiştir. Birden fazla girdi değişkeni yani bağımsız değişken olduğu için R^2 değeri yerine ayarlanmış R^2 değeri olan R^2_{adj} değeri ise 0,962 olarak hesaplanmıştır. Üretilen regresyon denklemindeki bağımsız değişken kombinasyonu, bağımlı değişkeni %96,20 oranında yordayabilmektedir. Çizelge 6.33’de Δt için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin %95 güven aralığında ve %5 anlamlılık düzeyindeki ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 6.33’de regresyon

denkleminin p değeri (anlamlılık değeri) 0,05’den küçük olduğu için ($0,004 < 0,05$), bağımsız değişkenler bağımlı değişkeni anlamlı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Yapılan çok değişkenli regresyon analizinin anlamlı ve doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Δt için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki Eş. 6.6’da verilmiştir.

$$\Delta t = 213,463 - 10,62d + 0,764D + 0,213p \quad (6.6)$$

Çizelge 6.34. Δt için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin katsayıları

Model	Standartlaştırılmamış katsayılar		Standartlaştırılmış katsayılar	t	p değeri	B için %95 güven aralığı		VIF
	B	St. hata	Beta					
Sabit	213,463	23,812		8,964	0,003	137,682	289,244	
Tel çapı (d, mm)	-10,620	1,229	-0,864	-8,642	0,003	-14,531	-6,709	1,593
Yay çapı (D, mm)	0,764	0,369	0,207	2,072	0,130	-0,409	1,937	1,593
Yay adımı (p, mm)	0,213	0,496	0,038	0,430	0,697	-1,365	1,791	1,259

Çizelge 6.34’de Δt için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin IBM SPSS yazılımından alınan katsayı sonuçları listelenmiştir. Çizelge 6.34’de görülen VIF değeri varyans şişirme faktörü (variance inflation factor), modeldeki tahmin ediciler arasındaki korelasyonlar nedeniyle bir katsayının varyansının ne kadar şişirildiğini göstermektedir. Birden fazla tahmin edici bağımsız değişken olduğu için çoklu doğrusallığın incelenmesi önemlidir. Çünkü regresyon katsayılarının varyansını artırabilir ve bu da ilişkili tahmin edicilerin her birinin yanıt üzerindeki bireysel etkisini değerlendirmeyi zorlaştırmaktadır [173, 181]. VIF değeri her bir tahmin edici bağımsız değişken için ayrı ayrı verilmektedir. Bu değer, 1’ eşit ise yanıt değişkeni ile tahmin edici değişken arasında doğrusallık olmadığı ve regresyon denkleminin başarılı olduğunu ifade etmektedir. Benzer şekilde VIF değeri 1 ile 5 arasında ise orta derecede korelasyon olduğu ama yine de tahmin edici değişkenin yanıt değişkenini yeterli miktarda tahmin edebildiğini ifade etmektedir. Eğer VIF değeri 5’den büyük ise bağımsız değişken ile bağımlı değişken arasında çoklu bağlantı nedeniyle regresyon katsayısının yetersiz tahmin edildiğini göstermektedir [173, 181]. Çizelge 6.34’ göre VIF değerleri d ve D için 1,593 ve p için 1,259 olarak bulunmuştur. Böylece bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni tahmin etmesinde çoklu doğrusallık bulunmadığı ve

bağımsız değişkenlerin regresyon denklemindeki katsayıları yeterli derecede tahmin edilmekte olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca regresyon denkleminde bulunan katsayıların $\pm 0,95$ güven aralığının sınırları içerisinde bulunmuştur.

ZBİO için ÇDDRA

ZBİO ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d, mm) yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.35’de sunulmuştur.

Çizelge 6.35. ZBİO ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d, mm) yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar

	ZBİO	Tel çapı (d, mm)	Yay çapı (D, mm)	Yay adımı (p, mm)
ZBİO	1,000	0,983	-0,637	-0,131
Tel çapı (d, mm)	0,983	1,000	-0,500	-0,227
Yay çapı (D, mm)	-0,637	-0,500	1,000	-0,227
Yay adımı (p, mm)	-0,131	-0,227	-0,227	1,000

Dikkate alınan bağımsız değişkenler arasındaki PKT’nın Berry ve Feldman [180] tarafından ifade edilmiş olan 0,80 değerinden düşük olması gerekmektedir. Çizelge 6.35 incelendiğinde bağımsız değişkenler arasındaki R’nin 0,80’den küçük olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanında bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasında lineer bir ilişkinin olması da önemlidir [180]. ZBİO ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan d, D ve p arasındaki R’ler sırasıyla 0,983, -0,637 ve -0,131 olarak bulunmuştur. Elde edilen R değerlerine göre ZBİO ile d arasında pozitif yönlü çok kuvvetli bir ilişki, ZBİO ile D arasında negatif yönlü kuvvetli bir ilişki ve ZBİO ile p arasında negatif yönlü zayıf bir ilişkinin var olduğunu ifade etmektedir. İlişkinin zayıf olması, regresyon analizi sonucunda elde edilecek regresyon denkleminde p değişkenine ait katsayıların oldukça küçük olacağını anlamına gelmektedir.

Bağımsız değişkenler olan d, D ve p kombinasyonunun ZBİO bağımlı değişkeni ile olan R’si 0,998 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkende açıkladığı varyansı ifade eden R^2 değeri ise 0,996 olarak elde edilmiştir. Birden fazla girdi değişkeni yani bağımsız değişken olduğu için R^2 değeri yerine ayarlanmış R^2 değeri olan R^2_{adj} değeri ise

0,991 olarak hesaplanmıştır. Üretilen regresyon denklemindeki bağımsız değişken kombinasyonu, bağımlı değişkeni %99,10 oranında yordayabilmektedir. Çizelge 6.36'da ZBİO için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin %95 güven aralığında ve %5 anlamlılık düzeyindeki ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 6.36'da regresyon denkleminin p değeri (anlamlılık değeri) 0,05'den küçük olduğu için ($0,001 < 0,05$), bağımsız değişkenler bağımlı değişkeni anlamlı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Yapılan çok değişkenli regresyon analizinin anlamlı ve doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 6.36. ZBİO için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları

Model	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	P değeri
Regresyon	3	0,244	0,081	226,084	0,001
Hata	3	0,001	0,000		
Toplam	6	0,245			

Çizelge 6.37'de ZBİO için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin IBM SPSS yazılımından alınan katsayı sonuçları listelenmiştir. Çizelge 6.37'ye göre VIF değerleri d ve D için 1,593 ve p için 1,259 olarak bulunmuştur. 1 ile 5 arasında ve 1' yakın bulunan VIF değerlerine göre, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni tahmin etmesinde çoklu doğrusallık bulunmadığı ve bağımsız değişkenlerin regresyon denklemindeki katsayıları yeterli derecede tahmin edilmekte olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 6.37. ZBİO için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin katsayıları

Model	Standartlaştırılmamış katsayılar		Standartlaştırılmış katsayılar	t	p değeri	B için %95 güven aralığı		VIF
	B	St. hata	Beta					
Sabit	1,027	0,077		13,282	0,001	0,781	1,273	
Tel çapı (d, mm)	0,074	0,004	0,900	18,622	0,001	0,062	0,087	1,593
Yay çapı (D, mm)	-0,004	0,001	-0,180	-3,721	0,034	-0,008	0,001	1,593
Yay adımı (p, mm)	0,001	0,002	0,032	0,745	0,510	-0,004	0,006	1,259

ZBİO için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki Eş. 6.7’de verilmiştir

$$ZBİO = 1,027 + 0,074d - 0,004D + 0,001p \quad (6.7)$$

η için ÇDDRA

η ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d, mm) yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.38’de sunulmuştur.

Çizelge 6.38. η ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d, mm) yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar

	η	Tel çapı (d, mm)	Yay çapı (D, mm)	Yay adımı (p, mm)
η	1,000	0,937	-0,592	-0,260
Tel çapı (d, mm)	0,937	1,000	-0,500	-0,227
Yay çapı (D, mm)	-0,592	-0,500	1,000	-0,227
Yay adımı (p, mm)	-0,260	-0,227	-0,227	1,000

Dikkate alınan bağımsız değişkenler arasındaki PKT’nın Berry ve Feldman [180] tarafından ifade edilmiş olan 0,80 değerinden düşük olması gerekmektedir. Çizelge 6.38 incelendiğinde bağımsız değişkenler arasındaki R’nin 0,80’den küçük olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanında bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasında lineer bir ilişkinin olması da önemlidir [180]. η ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan d, D ve p arasındaki R’ler sırasıyla 0,937, -0,592 ve -0,260 olarak bulunmuştur. Elde edilen R değerlerine göre η ile d arasında pozitif yönlü çok kuvvetli bir ilişki, η ile D arasında negatif yönlü kuvvetli bir ilişki ve η ile p arasında negatif yönlü zayıf bir ilişkinin var olduğunu ifade etmektedir. İlişkinin zayıf olması, regresyon analizi sonucunda elde edilecek regresyon denkleminde p değişkenine ait katsayıların oldukça küçük olacağını anlamına gelmektedir.

Bağımsız değişkenler olan d, D ve p kombinasyonunun η bağımlı değişkeni ile olan R’si 0,955 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkende açıkladığı varyansı ifade eden R^2 değeri ise 0,912 olarak elde edilmiştir. Birden fazla girdi değişkeni yani

bağımsız değişken olduğu için R^2 değeri yerine ayarlanmış R^2 değeri olan R^2_{adj} değeri ise 0,824 olarak hesaplanmıştır. Üretilen regresyon denklemindeki bağımsız değişken kombinasyonu, bağımlı değişkeni %82,40 oranında yordayabilmektedir. Çizelge 6.39’da η için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin %95 güven aralığında ve %5 anlamlılık düzeyindeki ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 6.39’da regresyon denkleminin p değeri (anlamlılık değeri) 0,05’den küçük olduğu için ($0,043 < 0,05$), bağımsız değişkenler bağımlı değişkeni anlamlı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Yapılan çok değişkenli regresyon analizinin anlamlı ve doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 6.39. η için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları

Model	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	P değeri
Regresyon	3	0,061	0,020	10,350	0,043
Hata	3	0,006	0,002		
Toplam	6	0,067			

Çizelge 6.40’da η için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin IBM SPSS yazılımından alınan katsayı sonuçları listelenmiştir. Çizelge 6.40’a göre VIF değerleri d ve D için 1,593 ve p için 1,259 olarak bulunmuştur. 1 ile 5 arasında ve 1’ yakın bulunan VIF değerlerine göre, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni tahmin etmesinde çoklu doğrusallık bulunmadığı ve bağımsız değişkenlerin regresyon denklemindeki katsayıları yeterli derecede tahmin edilmekte olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 6.40. η için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin katsayıları

Model	Standartlaştırılmamış katsayılar		Standartlaştırılmış katsayılar	t	p değeri	B için %95 güven aralığı		VIF
	B	St. hata	Beta					
Sabit	0,850	0,181		4,693	0,018	0,274	1,427	
Tel çapı (d, mm)	0,034	0,009	0,796	3,681	0,035	0,005	0,064	1,593
Yay çapı (D, mm)	-0,003	0,003	-0,223	-1,031	0,378	-0,012	0,006	1,593
Yay adımı (p, mm)	-0,003	0,004	-0,130	-0,677	0,547	-0,015	0,009	1,259

η için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki Eş. 6.8’de verilmiştir.

$$\eta = 0,850 + 0,034d - 0,003D - 0,003p \quad (6.8)$$

EDVİO için ÇDDRA

EDVİO ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d, mm) yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.41’de sunulmuştur.

Çizelge 6.41. EDVİO ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d, mm) yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) arasındaki korelasyonlar

	EDVİO	Tel çapı (d, mm)	Yay çapı (D, mm)	Yay adımı (p, mm)
EDVİO	1,000	0,937	-0,592	-0,260
Tel çapı (d, mm)	0,937	1,000	-0,500	-0,227
Yay çapı (D, mm)	-0,592	-0,500	1,000	-0,227
Yay adımı (p, mm)	-0,260	-0,227	-0,227	1,000

Dikkate alınan bağımsız değişkenler arasındaki PKT’nın Berry ve Feldman [180] tarafından ifade edilmiş olan 0,80 değerinden düşük olması gerekmektedir. Çizelge 6.41 incelendiğinde bağımsız değişkenler arasındaki R’nin 0,80’den küçük olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanında bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasında lineer bir ilişkinin olması da önemlidir [180]. EDVİO ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan d, D ve p arasındaki R’ler sırasıyla 0,937, -0,592 ve -0,260 olarak bulunmuştur. Elde edilen R değerlerine göre EDVİO ile d arasında pozitif yönlü çok kuvvetli bir ilişki, EDVİO ile D arasında negatif yönlü kuvvetli bir ilişki ve EDVİO ile p arasında negatif yönlü zayıf bir ilişkinin var olduğunu ifade etmektedir. İlişkinin zayıf olması, regresyon analizi sonucunda elde edilecek regresyon denkleminde p değişkenine ait katsayıların oldukça küçük olacağını anlamına gelmektedir.

Bağımsız değişkenler olan d, D ve p kombinasyonunun EDVİO bağımlı değişkeni ile olan R’si 0,955 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkende açıkladığı varyansı ifade eden R² değeri ise 0,912 olarak elde edilmiştir. Birden fazla girdi değişkeni

yani bağımsız değişken olduğu için R^2 değeri yerine ayarlanmış R^2 değeri olan R^2_{adj} değeri ise 0,824 olarak hesaplanmıştır. Üretilen regresyon denklemindeki bağımsız değişken kombinasyonu, bağımlı değişkeni %82,40 oranında yordayabilmektedir.

Çizelge 6.42. EDVİÖ için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları

Model	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	P değeri
Regresyon	3	0,133	0,044	10,349	0,043
Hata	3	0,013	0,004		
Toplam	6	0,146			

Çizelge 6.42’de ZBİÖ için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin %95 güven aralığında ve %5 anlamlılık düzeyindeki ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 6.42’de regresyon denkleminin p değeri (anlamlılık değeri) 0,05’den küçük olduğu için ($0,043 < 0,05$), bağımsız değişkenler bağımlı değişkeni anlamlı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Yapılan çok değişkenli regresyon analizinin anlamlı ve doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 6.43. EDVİÖ için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin katsayıları

Model	Standartlaştırılmamış katsayılar		Standartlaştırılmış katsayılar	t	p değeri	B için %95 güven aralığı		VIF
	B	St. hata						
Sabit	1,251	0,267		4,693	0,018	0,403	2,100	
Tel çapı (d, mm)	0,051	0,014	0,796	3,681	0,035	0,007	0,094	1,593
Yay çapı (D, mm)	-0,004	0,004	-0,223	-1,031	0,378	-0,017	0,009	1,593
Yay adımı (p, mm)	-0,004	0,006	-0,130	-0,677	0,547	-0,021	0,014	1,259

Çizelge 6.43’de EDVİÖ için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin IBM SPSS yazılımından alınan katsayı sonuçları listelenmiştir. Çizelge 6.43’e göre VIF değerleri d ve D için 1,593 ve p için 1,259 olarak bulunmuştur. 1 ile 5 arasında ve 1’ yakın bulunan VIF değerlerine göre, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni tahmin etmesinde çoklu doğrusallık bulunmadığı ve bağımsız değişkenlerin regresyon denklemindeki katsayıları

yeterli derecede tahmin edilmekte olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca regresyon denkleminde bulunan katsayıların ütü %95 güven aralığının sınırları içerisinde bulunmuştur.

EDVİO için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki Eş. 6.9'da verilmiştir.

$$EDVİO = 1,251 + 0,051d - 0,004D - 0,004p \quad (6.9)$$

Tüm bağımlı değişkenler için türetilen regresyon denklemlerinde R^2_{adj} değeri, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenleri kabul edilebilir seviyede açıklama sınırı olan 0,80 değerinden daha yüksek bulunmuştur.

Lineerleştirilmiş çok değişkenli kuvvet fonksiyonu (ÇDKF) şeklinde doğrusal regresyon analizi

ÇDDRA'dan sonra yapılan tez çalışması kapsamında, bağımsız değişkenlerin kuvvet fonksiyonu şeklinde Eş.6.10'daki gibi bağımlı değişkeni tahmin edebilen regresyon denklemleri de ayrıca türetilmiştir.

$$y = a_0 d^{b_1} D^{b_2} p^{b_3} \quad (6.10)$$

Eş. 6.10'daki regresyon denklemi, denklemin her iki tarafının da doğal logaritması alınarak lineerleştirilmiş ve işlem çok değişkenli lineer regresyon analizine indirgenmiştir. İndirgenmiş kuvvet fonksiyonu Eş.6.11'de verilmiştir.

$$\ln(y) = \ln(a_0) + b_1 \ln(d) + b_2 \ln(D) + b_3 \ln(p) \quad (6.11)$$

Eş. 6.11'de yer alan $\ln$ tabanındaki ifadeler Eş. 6.12'deki gibi değişken dönüşümü yapılarak çok değişkenli doğrusal regresyon analizine uygun hale getirilmiştir.

$$y' = a_0' + b_1 d' + b_2 D' + b_3 p' \quad (6.12)$$

Kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler, deneysel olarak elde edilen verilerin doğal logaritması alınarak bulunmuş ve hesaplanan veriler Çizelge 6.44'de verilmiştir.

Çizelge 6.44. Çok değişkenli kuvvet fonksiyonu (ÇDKF) şeklinde regresyon analizi için kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler

Deney dizilimi	Bağımsız değişkenler			Bağımlı değişkenler			
	d'	D'	p'	$\Delta t'$	$ZB\dot{I}O'$	η'	$EDV\dot{I}O'$
A ₁ B ₁ C ₁	0,69315	2,99573	2,89037	5,28827	0,18820	-0,19771	0,18885
A ₁ B ₂ C ₂	0,69315	3,40120	3,17805	5,39816	0,07830	-0,27429	0,11227
A ₁ B ₃ C ₃	0,69315	3,68888	3,40120	5,45532	0,02114	-0,36789	0,01866
A ₂ B ₁ C ₂	1,60944	2,99573	3,17805	5,19296	0,28351	-0,09003	0,29653
A ₂ B ₂ C ₃	1,60944	3,40120	3,40120	5,21494	0,26153	-0,09761	0,28894
A ₂ B ₃ C ₁	1,60944	3,68888	2,89037	5,24702	0,22944	-0,11407	0,27248
A ₃ B ₁ C ₃	2,07944	2,99573	3,40120	5,01728	0,45918	-0,02290	0,36365
A ₃ B ₂ C ₁	2,07944	3,40120	2,89037	5,07517	0,40129	-0,03966	0,34690
A ₃ B ₃ C ₂	2,07944	3,68888	3,17805	5,15906	0,31741	-0,05157	0,33499

$\Delta t'$ için lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon analizi

Deneysel bulguların normal dağıldığı bilindiği için PKT, IBM SPSS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PKT’de 1. ve 9. deney test için ayrıldığı için 2’den 8’e kadar olan toplam 7 deney dikkate alınarak işlem yapılmıştır. $\Delta t'$ ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d' , mm) yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.45’de sunulmuştur. Dikkate alınan bağımsız değişkenler arasındaki PKT’nin Berry ve Feldman [180] tarafından ifade edilmiş olan 0,80 değerinden düşük olması gerekmektedir. Çizelge 6.45 incelendiğinde bağımsız değişkenler arasındaki R’nin 0,80’den küçük olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanında bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasında lineer bir ilişkinin olması da önemlidir [180]. $\Delta t'$ ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan d' , D' ve p' arasındaki R’ler sırasıyla -0,974, 0,632 ve 0,181 olarak bulunmuştur. Elde edilen R değerlerine göre $\Delta t'$ ile d' arasında negatif yönlü çok kuvvetli bir ilişki, $\Delta t'$ ile D' arasında pozitif yönlü kuvvetli bir ilişki ve $\Delta t'$ ile p' arasında pozitif yönlü zayıf bir ilişkinin var olduğunu ifade etmektedir. İlişkinin zayıf olması, regresyon analizi sonucunda elde edilecek regresyon denkleminde p' değişkenine ait katsayıların oldukça küçük olacağını anlamına gelmektedir.

Çizelge 6.45. $\Delta t'$ ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d' , mm) yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar

	$\Delta t'$	Tel çapı (d' , mm)	Yay çapı (D' , mm)	Yay adımı (p' , mm)
$\Delta t'$	1,000	-0,974	0,632	0,181
Tel çapı (d' , mm)	-0,974	1,000	-0,490	-0,281
Yay çapı (D' , mm)	0,632	-0,490	1,000	-0,271
Yay adımı (p' , mm)	0,181	-0,281	-0,271	1,000

Bağımsız değişkenler olan d' , D' ve p' kombinasyonunun $\Delta t'$ bağımlı değişkeni ile olan R 'si 0,990 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkende açıkladığı varyansı ifade eden R^2 değeri ise 0,979 olarak elde edilmiştir. Birden fazla girdi değişkeni yani bağımsız değişken olduğu için R^2 değeri yerine ayarlanmış R^2 değeri olan R^2_{adj} değeri ise 0,959 olarak hesaplanmıştır. Üretilen regresyon denklemindeki bağımsız değişken kombinasyonu, bağımlı değişkeni %95,90 oranında yordayabilmektedir. Çizelge 6.46'da $\Delta t'$ için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin %95 güven aralığında ve %5 anlamlılık düzeyindeki ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 6.46'da regresyon denkleminin p değeri (anlamlılık değeri) 0,05'den küçük olduğu için ($0,005 < 0,05$), bağımsız değişkenler bağımlı değişkeni anlamlı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Yapılan çok değişkenli regresyon analizinin anlamlı ve doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 6.46. $\Delta t'$ için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları

Model	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	P değeri
Regresyon	3	0,147	0,049	47,467	0,005
Hata	3	0,003	0,001		
Toplam	6	0,150			

$\Delta t'$ için üretilen lineerleştirilmiş çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklinde doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki Eş. 6.13'de verilmiştir.

$$\Delta t' = 5,249 - 0,241d' + 0,109D' - 0,009p' \quad (6.13)$$

Eş. 6.13’de verilen çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi, tersine dönüşüm yapılarak Eş. 6.14’de verilen çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklinde ifade edilmiştir.

$$\Delta t = 190,376d^{-0,241}D^{0,109}p^{-0,009} \quad (6.14)$$

Çizelge 6.47’de $\Delta t'$ için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin IBM SPSS yazılımından alınan katsayı sonuçları listelenmiştir. Çizelge 6.47’ye göre VIF değerleri d' için 1,739, D' için 1,729 ve p' için 1,426 olarak bulunmuştur. 1 ile 5 arasında ve 1’e yakın bulunan VIF değerlerine göre, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni tahmin etmesinde çoklu doğrusallık bulunmadığı ve bağımsız değişkenlerin regresyon denklemindeki katsayıların yeterli derecede tahmin edilmekte olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca regresyon denkleminde bulunan katsayıların tümü %95 güven aralığının sınırları içerisinde bulunmuştur.

Çizelge 6.47. $\Delta t'$ için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklindeki doğrusal regresyon denkleminin katsayıları

Model	Standartlaştırılmamış katsayılar		Standartlaştırılmış katsayılar	t	p değeri	B için %95 güven aralığı		VIF
	B	St. hata	Beta					
Sabit	5,249	0,395		13,301	0,001	3,993	6,505	
Tel çapı (d' , mm)	-0,241	0,030	-0,881	-8,060	0,004	-0,336	-0,146	1,739
Yay çapı (D' , mm)	0,109	0,061	0,196	1,797	0,170	-0,084	0,302	1,729
Yay adımı (p' , mm)	-0,009	0,069	-0,014	-0,138	0,899	-0,227	0,209	1,426

ZBİO' için lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon analizi

DeneySEL bulguların normal dağıldığı bilindiği için PKT, IBM SPSS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PKT’de 1. ve 9. deney test için ayrıldığı için 2’den 8’e kadar olan toplam 7 deney dikkate alınarak işlem yapılmıştır. ZBİO’ ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d' , mm) yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.48’de sunulmuştur. Dikkate alınan bağımsız değişkenler arasındaki PKT’nin Berry ve Feldman [180] tarafından ifade edilmiş olan 0,80 değerinden düşük olması gerekmektedir. Çizelge 6.48 incelendiğinde bağımsız değişkenler arasındaki R’nin 0,80’den

küçük olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanında bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasında lineer bir ilişkinin olması da önemlidir [180]. ZBİO' ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan d' , D' ve p' arasındaki R'ler sırasıyla 0,974, -0,632 ve -0,181 olarak bulunmuştur. Elde edilen R değerlerine göre ZBİO' ile d' arasında pozitif yönlü çok kuvvetli bir ilişki, ZBİO' ile D' arasında negatif yönlü kuvvetli bir ilişki ve ZBİO' ile p' arasında negatif yönlü zayıf bir ilişkinin var olduğunu ifade etmektedir. İlişkinin zayıf olması, regresyon analizi sonucunda elde edilecek regresyon denkleminde p' değişkenine ait katsayının oldukça küçük olacağını anlamına gelmektedir.

Çizelge 6.48. ZBİO' ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d' , mm) yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar

	ZBİO'	Tel çapı (d' , mm)	Yay çapı (D' , mm)	Yay adımı (p' , mm)
ZBİO'	1,000	0,974	-0,632	-0,181
Tel çapı (d' , mm)	0,974	1,000	-0,490	-0,281
Yay çapı (D' , mm)	-0,632	-0,490	1,000	-0,271
Yay adımı (p' , mm)	-0,181	-0,281	-0,271	1,000

Bağımsız değişkenler olan d' , D' ve p' kombinasyonunun ZBİO' bağımlı değişkeni ile olan R'si 0,990 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkende açıkladığı varyansı ifade eden R^2 değeri ise 0,979 olarak elde edilmiştir. Birden fazla girdi değişkeni yani bağımsız değişken olduğu için R^2 değeri yerine ayarlanmış R^2 değeri olan R^2_{adj} değeri ise 0,959 olarak hesaplanmıştır. Üretilen regresyon denklemindeki bağımsız değişken kombinasyonu, bağımlı değişkeni %95,90 oranında yordayabilmektedir. Çizelge 6.49'da ZBİO' için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin %95 güven aralığında ve %5 anlamlılık düzeyindeki ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 6.49'da regresyon denkleminin p değeri (anlamlılık değeri) 0,05'den küçük olduğu için ($0,005 < 0,05$), bağımsız değişkenler bağımlı değişkeni anlamlı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Yapılan çok değişkenli regresyon analizinin anlamlı ve doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 6.49. $ZBİO'$ için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları

Model	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	P değeri
Regresyon	3	0,147	0,049	47,483	0,005
Hata	3	0,003	0,001		
Toplam	6	0,150			

$ZBİO'$ için üretilen lineerleştirilmiş çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki Eş. 6.15'de verilmiştir.

$$ZBİO' = 0,227 + 0,241d' - 0,109D' + 0,009p' \quad (6.15)$$

Eş. 6.15'de verilen çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi, tersine dönüşüm yapılarak Eş. 6.16'da verilen çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklinde ifade edilmiştir.

$$ZBİO = 1,255d^{0,241}D^{-0,109}p^{0,009} \quad (6.16)$$

Çizelge 6.50. $ZBİO'$ için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklindeki doğrusal regresyon denkleminin katsayıları

Model	Standartlaştırılmamış katsayılar		Standartlaştırılmış katsayılar	t	p değeri	B için %95 güven aralığı		VIF
	B	St. hata	Beta					
Sabit	0,227	0,395		0,575	0,605	-1,029	1,483	
Tel çapı (d' , mm)	0,241	0,030	0,881	8,061	0,004	0,146	0,336	1,739
Yay çapı (D' , mm)	-0,109	0,061	-0,196	-1,798	0,170	-0,302	0,084	1,729
Yay adımı (p' , mm)	0,009	0,069	0,014	0,138	0,899	-0,209	0,227	1,426

Çizelge 6.50'de $ZBİO'$ için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin IBM SPSS yazılımından alınan katsayı sonuçları listelenmiştir. Çizelge 6.50'ye göre VIF değerleri d' için 1,739, D' için 1,729 ve p' için 1,426 olarak bulunmuştur. 1 ile 5 arasında ve 1'e yakın bulunan VIF değerlerine göre, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni tahmin etmesinde çoklu doğrusallık bulunmadığı ve bağımsız değişkenlerin regresyon

denklemindeki katsayıların yeterli derecede tahmin edilmekte olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca regresyon denkleminde bulunan katsayıların tümü %95 güven aralığı sınırları içerisinde bulunmuştur.

η' için lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon analizi

Çizelge 6.51. η' ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d' , mm) yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar

	η'	Tel çapı (d' , mm)	Yay çapı (D' , mm)	Yay adımı (p' , mm)
η'	1,000	0,968	-0,579	-0,291
Tel çapı (d' , mm)	0,968	1,000	-0,490	-0,281
Yay çapı (D' , mm)	-0,579	-0,490	1,000	-0,271
Yay adımı (p' , mm)	-0,291	-0,281	-0,271	1,000

Deneysel bulguların normal dağıldığı bilindiği için PKT, IBM SPSS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PKT'de 1. ve 9. deney test için ayrıldığı için 2'den 8'e kadar olan toplam 7 deney dikkate alınarak işlem yapılmıştır. η' ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d' , mm) yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.51'de sunulmuştur. Dikkate alınan bağımsız değişkenler arasındaki PKT'nin Berry ve Feldman [180] tarafından ifade edilmiş olan 0,80 değerinden düşük olması gerekmektedir. Çizelge 6.51 incelendiğinde bağımsız değişkenler arasındaki R'nin 0,80'den küçük olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanında bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasında lineer bir ilişkinin olması da önemlidir [180]. η' ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan d' , D' ve p' arasındaki R'ler sırasıyla 0,968, -0,579 ve -0,291 olarak bulunmuştur. Elde edilen R değerlerine göre η' ile d' arasında pozitif yönlü çok kuvvetli bir ilişki, η' ile D' arasında negatif yönlü kuvvetli bir ilişki ve η' ile p' arasında negatif yönlü zayıf bir ilişkinin var olduğunu ifade etmektedir. İlişkinin zayıf olması, regresyon analizi sonucunda elde edilecek regresyon denkleminde p' değişkenine ait katsayının oldukça küçük olacağını anlamına gelmektedir.

Bağımsız değişkenler olan d' , D' ve p' kombinasyonunun η' bağımlı değişkeni ile olan R'si 0,980 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkende açıkladığı varyansı

ifade eden R^2 değeri ise 0,960 olarak elde edilmiştir. Birden fazla girdi değişkeni yani bağımsız değişken olduğu için R^2 değeri yerine ayarlanmış R^2 değeri olan R^2_{adj} değeri ise 0,919 olarak hesaplanmıştır. Üretilen regresyon denklemindeki bağımsız değişken kombinasyonu, bağımlı değişkeni %91,90 oranında yordayabilmektedir. Çizelge 6.52’de η' için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin %95 güven aralığında ve %5 anlamlılık düzeyindeki ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 6.52’de regresyon denkleminin p değeri (anlamlılık değeri) 0,05’den küçük olduğu için ($0,014 < 0,05$), bağımsız değişkenler bağımlı değişkeni anlamlı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Yapılan çok değişkenli regresyon analizinin anlamlı ve doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 6.52. η' için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları

Model	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	P değeri
Regresyon	3	0,095	0,032	23,734	0,014
Hata	3	0,004	0,001		
Toplam	6	0,099			

η' için üretilen lineerleştirilmiş çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki Eş. 6.17’de verilmiştir.

$$\eta' = 0,068 + 0,187d' - 0,088D' - 0,060p' \quad (6.17)$$

Eş. 6.17’de verilen çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi, tersine dönüşüm yapılarak Eş. 6.18’de verilen çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklinde ifade edilmiştir.

$$\eta = 1,070d^{0,187}D^{-0,088}p^{-0,060} \quad (6.18)$$

Çizelge 6.50’de η' için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin IBM SPSS yazılımından alınan katsayı sonuçları listelenmiştir. Çizelge 6.50’ye göre VIF değerleri d' için 1,739, D' için 1,729 ve p' için 1,426 olarak bulunmuştur. 1 ile 5 arasında ve 1’e yakın bulunan VIF değerlerine göre, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni tahmin etmesinde çoklu doğrusallık bulunmadığı ve bağımsız değişkenlerin regresyon denklemindeki

katsayıların yeterli derecede tahmin edilmekte olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca regresyon denkleminde bulunan katsayıların tümü %95 güven aralığı sınırları içerisinde bulunmuştur.

Çizelge 6.53. η' için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklindeki doğrusal regresyon denkleminin katsayıları

Model	Standartlaştırılmamış katsayılar		Standartlaştırılmış katsayılar	t	p değeri	B için %95 güven aralığı		VIF
	B	St. hata	Beta					
Sabit	0,068	0,448		0,152	0,888	-1,357	1,493	
Tel çapı (d' , mm)	0,187	0,034	0,842	5,502	0,012	0,079	0,295	1,739
Yay çapı (D' , mm)	-0,088	0,069	-0,195	-1,279	0,291	-0,307	0,131	1,729
Yay adımı (p' , mm)	-0,060	0,078	-0,108	-0,777	0,494	-0,308	0,187	1,426

EDVİO' için lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon analizi

Deneysel bulguların normal dağıldığı bilindiği için PKT, IBM SPSS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PKT'de 1. ve 9. deney test için ayrıldığı için 2'den 8'e kadar olan toplam 7 deney dikkate alınarak işlem yapılmıştır. EDVİO' ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d' , mm) yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.54'de sunulmuştur. Dikkate alınan bağımsız değişkenler arasındaki PKT'nın Berry ve Feldman [180] tarafından ifade edilmiş olan 0,80 değerinden düşük olması gerekmektedir. Çizelge 6.54 incelendiğinde bağımsız değişkenler arasındaki R'nin 0,80'den küçük olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanında bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasında lineer bir ilişkinin olması da önemlidir [180]. EDVİO' ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan d' , D' ve p' arasındaki R'ler sırasıyla 0,968, -0,579 ve -0,291 olarak bulunmuştur. Elde edilen R değerlerine göre EDVİO' ile d' arasında pozitif yönlü çok kuvvetli bir ilişki, EDVİO' ile D' arasında negatif yönlü kuvvetli bir ilişki ve EDVİO' ile p' arasında negatif yönlü zayıf bir ilişkinin var olduğunu ifade etmektedir. İlişkinin zayıf olması, regresyon analizi sonucunda elde edilecek regresyon denkleminde p' değişkenine ait katsayının oldukça küçük olacağı anlamına gelmektedir.

Çizelge 6.54. EDVİO' ve bağımsız değişkenler olarak tanımlanmış olan tel çapı (d' , mm) yay çapı (D' , mm) ve yay adımı (p' , mm) arasındaki korelasyonlar

	EDVİO'	Tel çapı (d' , mm)	Yay çapı (D' , mm)	Yay adımı (p' , mm)
EDVİO'	1,000	0,968	-0,579	-0,291
Tel çapı (d' , mm)	0,968	1,000	-0,490	-0,281
Yay çapı (D' , mm)	-0,579	-0,490	1,000	-0,271
Yay adımı (p' , mm)	-0,291	-0,281	-0,271	1,000

Bağımsız değişkenler olan d' , D' ve p' kombinasyonunun EDVİO' bağımlı değişkeni ile olan R 'si 0,980 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkende açıkladığı varyansı ifade eden R^2 değeri ise 0,960 olarak elde edilmiştir. Birden fazla girdi değişkeni yani bağımsız değişken olduğu için R^2 değeri yerine ayarlanmış R^2 değeri olan R^2_{adj} değeri ise 0,919 olarak hesaplanmıştır. Üretilen regresyon denklemindeki bağımsız değişken kombinasyonu, bağımlı değişkeni %91,90 oranında yordayabilmektedir.

Çizelge 6.55. EDVİO' için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklinde doğrusal regresyon denkleminin ANOVA sonuçları

Model	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Karelerin ortalaması (MS)	F-test	P değeri
Regresyon	3	0,095	0,032	23,735	0,014
Hata	3	0,004	0,001		
Toplam	6	0,099			

Çizelge 6.55'de EDVİO' için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin %95 güven aralığında ve %5 anlamlılık düzeyindeki ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 6.55'deki regresyon denkleminin p değeri (anlamlılık değeri) 0,05'den küçük olduğu için ($0,014 < 0,05$), bağımsız değişkenler bağımlı değişkeni anlamlı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Yapılan çok değişkenli regresyon analizinin anlamlı ve doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

EDVİO' için üretilen lineerleştirilmiş çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki Eş. 6.19'da verilmiştir.

$$EDV\dot{I}O' = 0,455 + 0,187d' - 0,088D' - 0,060p' \quad (6.19)$$

Eş. 6.19'da verilen çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi, tersine dönüşüm yapılarak Eş. 6.20'de verilen çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklinde ifade edilmiştir.

$$EDV\dot{I}O = 1,576d^{0,187}D^{-0,088}p^{-0,060} \quad (6.20)$$

Çizelge 6.56. EDV $\dot{I}O'$ için üretilen lineerleştirilmiş ÇDKF şeklindeki doğrusal regresyon denkleminin katsayıları

Model	Standartlaştırılmamış katsayılar		Standartlaştırılmış katsayılar	t	p değeri	B için %95 güven aralığı		VIF
	B	St. hata	Beta					
Sabit	0,455	0,448		1,016	0,384	-0,970	1,880	
Tel çapı (d', mm)	0,187	0,034	0,842	5,502	0,012	0,079	0,295	1,739
Yay çapı (D', mm)	-0,088	0,069	-0,195	-1,279	0,291	-0,307	0,131	1,729
Yay adımı (p', mm)	-0,060	0,078	-0,108	-0,777	0,494	-0,308	0,187	1,426

Çizelge 6.56'da EDV $\dot{I}O'$ için üretilen çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin IBM SPSS yazılımından alınan katsayı sonuçları listelenmiştir. Çizelge 6.56'ya göre VIF değerleri d' için 1,739, D' için 1,729 ve p' için 1,426 olarak bulunmuştur. 1 ile 5 arasında ve 1'e yakın bulunan VIF değerlerine göre, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni tahmin etmesinde çoklu doğrusallık bulunmadığı ve bağımsız değişkenlerin regresyon denklemindeki katsayıların yeterli derecede tahmin edilmekte olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca regresyon denkleminde bulunan katsayıların tümü %95 güven aralığı sınırları içerisinde bulunmuştur.

Tüm bağımlı değişkenler için türetilen regresyon denklemlerinde R^2_{adj} değeri, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenleri kabul edilebilir seviyede açıklama sınırı olan 0,80 değerinden daha yüksek bulunmuştur.

6.4.7. Deneysel ve regresyon analizi ile elde edilen sonuç parametrelerinin karşılaştırılması

Yapılan tez çalışmasında her bir sonuç parametresi için ÇDDRA ve lineerleştirilmiş ÇDKF şeklindeki regresyon analizleri yapılmış ve iki farklı regresyon denklemi türetilmiştir. Türetilen regresyon denklemleri kullanılarak Δt , ZBİO, η ve EDVİO sonuç parametreleri için hesaplamalar yapılmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

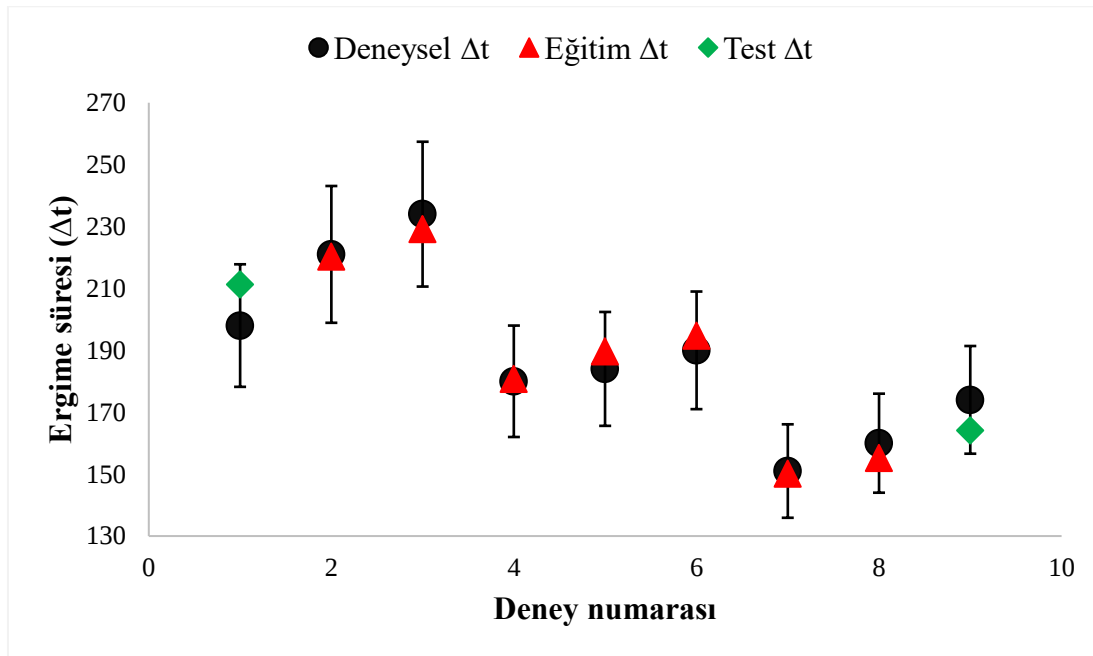
Çizelge 6.57. İki farklı regresyon analizi ile hesaplanan Δt parametresinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

Deney dizilimi	Deneysel Δt , dk.	Doğrusal regresyon denklemi ile hesaplanan Δt , dk.	Bağıl hatanın mutlak değeri ($ \varepsilon_b $, %)	Kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemi ile hesaplanan Δt , dk.	Bağıl hatanın mutlak değeri ($ \varepsilon_b $, %)
A ₁ B ₁ C ₁	198	211,337	6,74	217,560	9,88
A ₁ B ₂ C ₂	221	220,255	0,34	226,803	2,63
A ₁ B ₃ C ₃	234	229,173	2,06	233,558	0,19
A ₂ B ₁ C ₂	180	180,755	0,42	174,001	3,33
A ₂ B ₂ C ₃	184	189,673	3,08	181,498	1,36
A ₂ B ₃ C ₁	190	194,757	2,50	188,143	0,98
A ₃ B ₁ C ₃	151	150,173	0,55	155,055	2,69
A ₃ B ₂ C ₁	160	155,257	2,96	162,808	1,76
A ₃ B ₃ C ₂	174	164,175	5,65	167,560	3,70
Bağıl hatanın ortalaması			2,70	Bağıl hatanın ortalaması	2,95

Çizelge 6.57’de iki farklı regresyon analizi ile hesaplanan Δt parametresinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. ÇDDRA denklemi kullanılarak elde edilen Δt değerleri ile deneysel Δt değerleri arasındaki bağıl hatanın mutlak değerinin ($|\varepsilon_b|$), yüzdesel olarak en çok %6,74 ile en az %0,34 arasında değiştiği belirlenmiştir. Ortalama $|\varepsilon_b|$ ise %2,70 olarak elde edilmiştir. ÇDKF şeklindeki regresyon denklemi ile hesaplanan Δt değerleri ile deneysel Δt değerleri arasındaki $|\varepsilon_b|$, yüzdesel olarak en çok %9,88 ile en az %0,19 arasında değişmiştir. Ortalama $|\varepsilon_b|$ ise %2,95 olarak elde edilmiştir. Böylece Δt sonuç

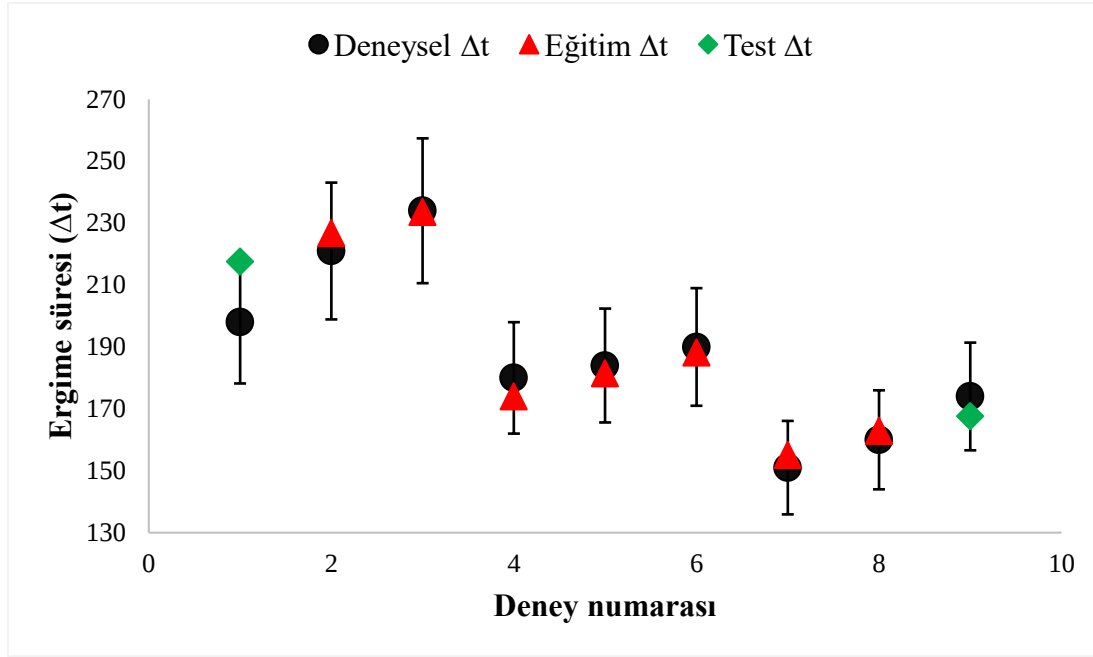
parametresi için elde edilen regresyon denklemlerinden ÇDDRA kullanılarak türetilen denklemin daha başarılı tahmin yapabildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 6.15’de deneysel Δt ile ÇDDRA ile türetilmiş regresyon denkleminin kullanılmasıyla elde edilmiş ve Çizelge 6.57’de listelenmiş olan sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. Taguchi deney tasarımı yöntemine göre belirlenmiş olan L_9 ortogonal dizi kullanılarak 9 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerden 7 tanesi ÇDDRA’da eğitim verisi olarak kullanılmıştır. 1. ve 9. deneyler ise regresyon denkleminin test edilmesi için ayrılmıştır. Şekil 6.15 incelendiğinde, deneysel Δt ile eğitim Δt ve test Δt değerlerinin $\pm\%10$ bağıl hata içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

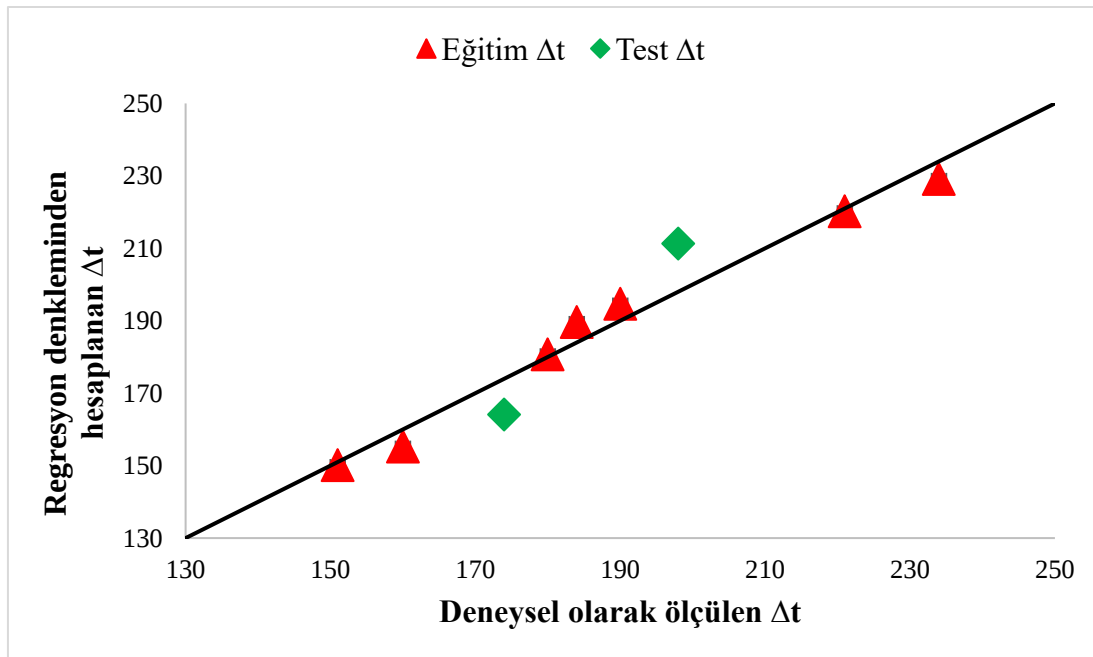


Şekil 6.15. Deneysel Δt ile ÇDDRA sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.16’da deneysel Δt ile ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile türetilmiş olan regresyon denkleminin kullanılmasıyla elde edilmiş ve Çizelge 6.57’de listelenmiş olan sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. Taguchi deney tasarımı yöntemine göre belirlenmiş olan L_9 ortogonal dizi kullanılarak 9 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerden 7 tanesi ÇDKF şeklindeki regresyonda eğitim verisi olarak kullanılmıştır. Kalan 1. ve 9. deneyler ise regresyon denkleminin test edilmesi için ayrılmıştır. Şekil 6.16 incelendiğinde, deneysel Δt ile eğitim Δt ve test Δt değerlerinin $\pm\%10$ bağıl hata içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.



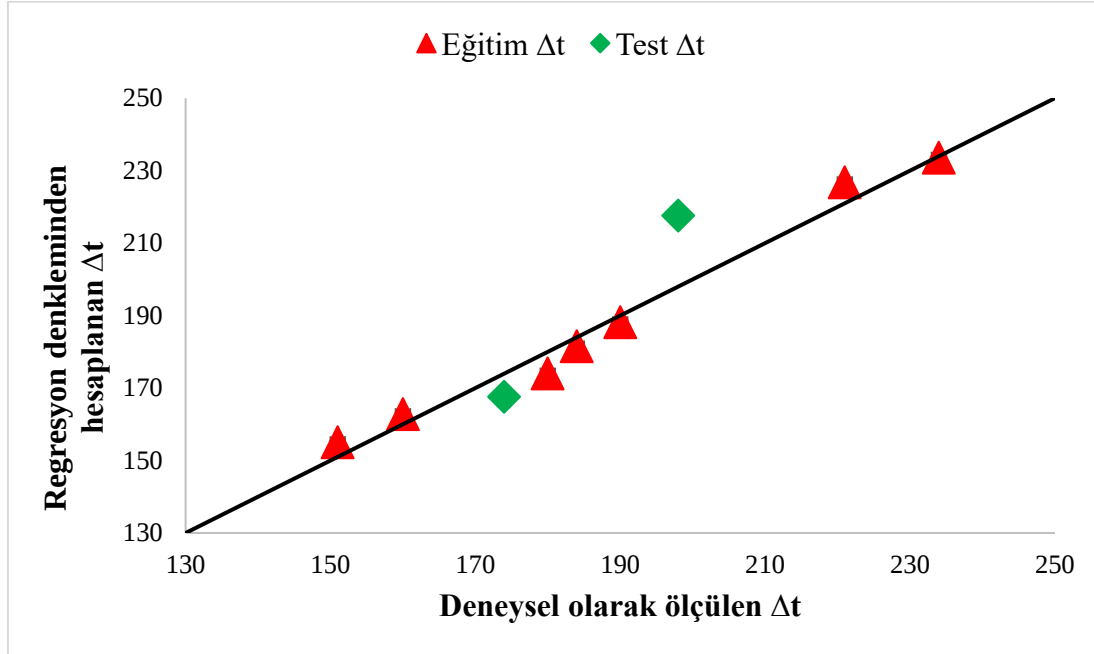
Şekil 6.16. Deneysel Δt ile ÇDKF şeklindeki regresyon sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.17. Deneysel olarak ölçülen Δt ile ÇDDRA denkleminde hesaplanan Δt 'nin değişimi

Deneysel olarak ölçülen Δt ile ÇDDRA denkleminde hesaplanan Δt 'nin ve ÇDKF şeklindeki regresyon denkleminde hesaplanan Δt 'nin değişimi, sırasıyla Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de verilmiştir. Şekil 6.17 ve Şekil 6.18 incelendiğinde, eğitim Δt ve test Δt değerlerinin şeklin tam ortasından çizilen eğim çizgisine yakın dağılım gösterdiği ve uyum içerisinde

olduğu gözlemlenmiştir. Eğitim değerleri kullanılarak oluşturulan regresyon denklemlerinin test edilmesi neticesinde, elde edilen sonuçların eğim çizgisine yakın değerler verdiği açıkça görülmüştür.

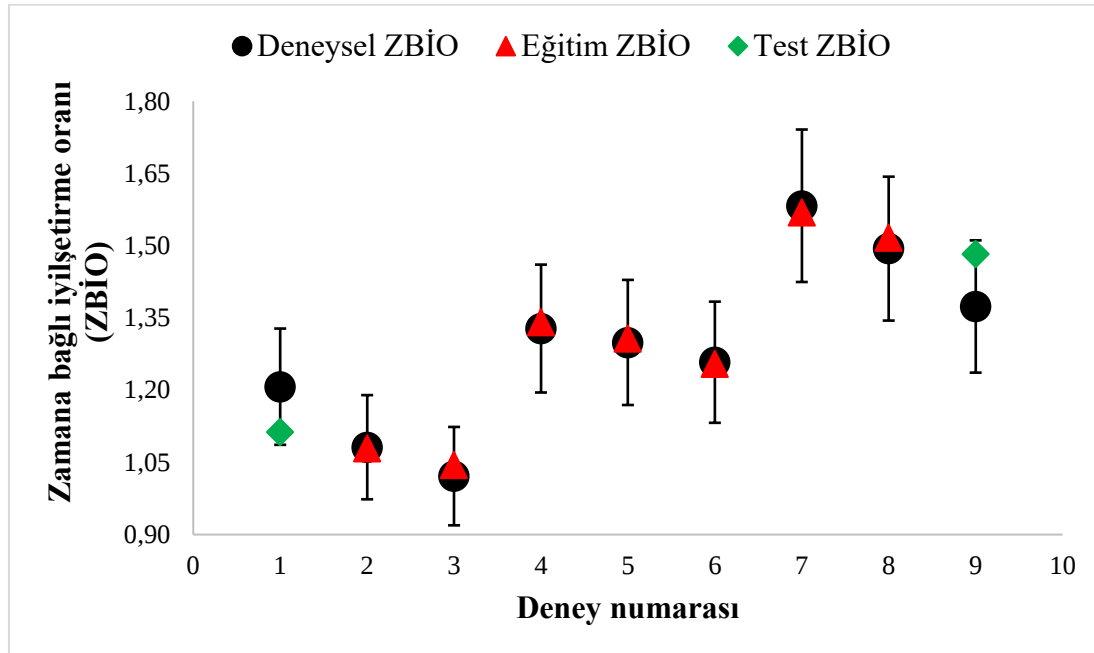


Şekil 6.18. Deneysel olarak ölçülen Δt ile ÇDKF şeklindeki regresyon denkleminden hesaplanan Δt 'nin değişimi

Çizelge 6.58'de iki farklı regresyon analizi ile hesaplanan ZBİO parametresinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. ÇDDRA denklemi kullanılarak elde edilen ZBİO değerleri ile deneysel ZBİO değerleri arasındaki bağıl hatanın mutlak değerinin ($|\varepsilon_b|$), yüzdesel olarak en çok %7,97 ile en az %0,23 arasında değiştiği belirlenmiştir. Ortalama $|\varepsilon_b|$ ise %2,51 olarak elde edilmiştir. ÇDKF şeklindeki regresyon denklemi ile hesaplanan ZBİO değerleri ile deneysel ZBİO değerleri arasındaki $|\varepsilon_b|$, yüzdesel olarak en çok %9,02 ile en az %0,16 arasında değişmiştir. Ortalama $|\varepsilon_b|$ ise %2,85 olarak elde edilmiştir. Böylece ZBİO sonuç parametresi için elde edilen regresyon denklemlerinden ÇDDRA kullanılarak türetilen denklemin daha başarılı tahmin yapabildiği sonucuna ulaşılmıştır.

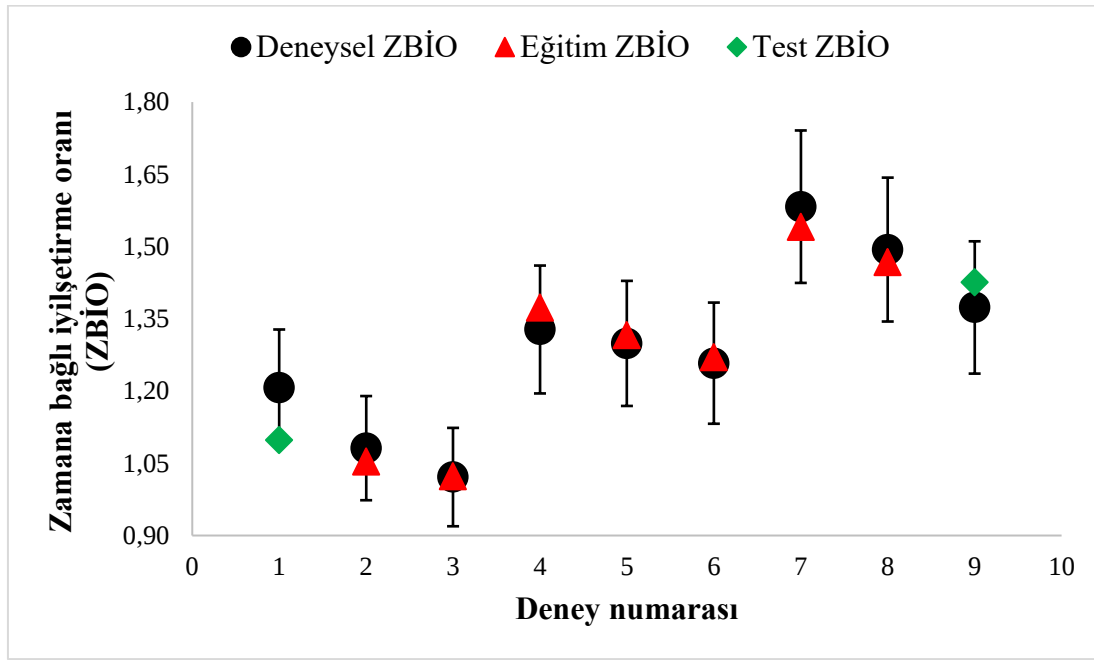
Çizelge 6.58. İki farklı regresyon analizi ile hesaplanan ZBİO parametresinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

Deney dizilimi	Deneysel ZBİO	Doğrusal regresyon denklemi ile hesaplanan ZBİO	Bağıl hatanın mutlak değeri ($ \varepsilon_b $, %)	Kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemi ile hesaplanan ZBİO.	Bağıl hatanın mutlak değeri ($ \varepsilon_b $, %)
A ₁ B ₁ C ₁	1,20707	1,113	7,79	1,098	9,02
A ₁ B ₂ C ₂	1,08145	1,079	0,23	1,053	2,59
A ₁ B ₃ C ₃	1,02137	1,045	2,31	1,023	0,16
A ₂ B ₁ C ₂	1,32778	1,341	1,00	1,373	3,41
A ₂ B ₂ C ₃	1,29891	1,307	0,62	1,316	1,35
A ₂ B ₃ C ₁	1,25789	1,255	0,23	1,270	0,95
A ₃ B ₁ C ₃	1,58278	1,569	0,87	1,541	2,65
A ₃ B ₂ C ₁	1,49375	1,517	1,56	1,468	1,76
A ₃ B ₃ C ₂	1,37356	1,483	7,97	1,426	3,81
Bağıl hatanın ortalaması			2,51	Bağıl hatanın ortalaması	2,85



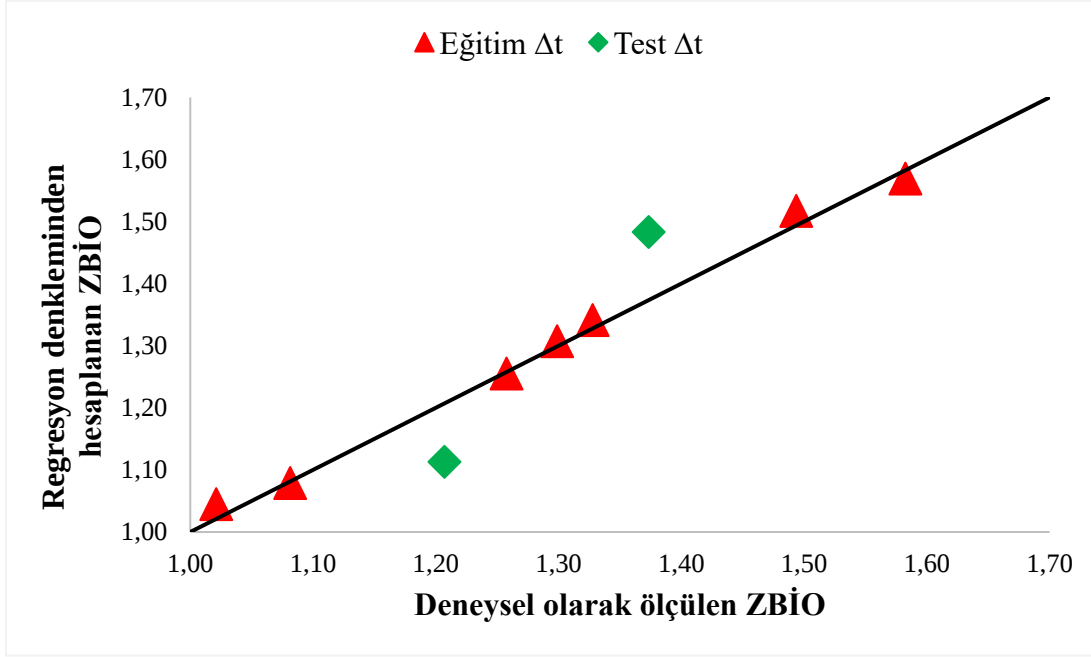
Şekil 6.19. Deneysel ZBİO ile çok değişkenli doğrusal regresyon sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.19’da deneysel ZBİO ile ÇDDRA ile türetilmiş regresyon denkleminin kullanılmasıyla elde edilmiş ve Çizelge 6.58’de listelenmiş olan sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. Taguchi deney tasarımı yöntemine göre belirlenmiş olan L_9 ortogonal dizi kullanılarak 9 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerden 7 tanesi ÇDDRA’da eğitim verisi olarak kullanılmıştır. 1. ve 9. deneyler ise regresyon denkleminin test edilmesi için ayrılmıştır. Şekil 6.19 incelendiğinde, deneysel ZBİO ile eğitim ZBİO ve test ZBİO değerlerinin $\pm\%10$ bağıl hata içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

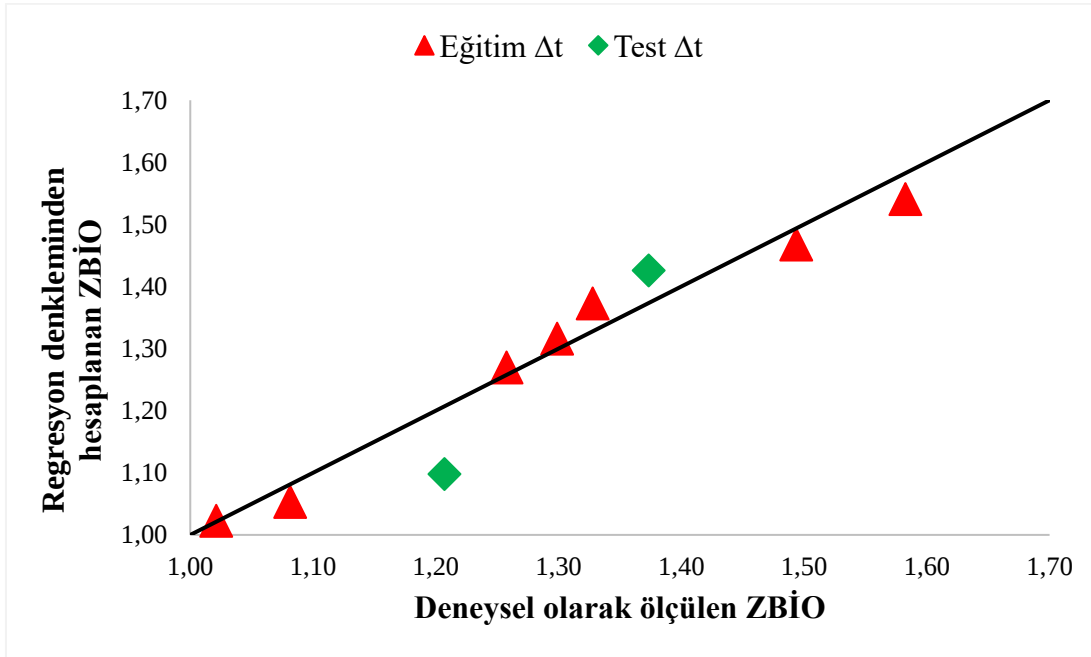


Şekil 6.20. Deneysel ZBİO ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.20’de deneysel ZBİO ile ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile türetilmiş olan regresyon denkleminin kullanılmasıyla elde edilmiş ve Çizelge 6.58’de listelenmiş olan sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. Taguchi deney tasarımı yöntemine göre belirlenmiş olan L_9 ortogonal dizi kullanılarak 9 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerden 7 tanesi ÇDKF şeklindeki regresyonda eğitim verisi olarak kullanılmıştır. Kalan 1. ve 9. deneyler ise regresyon denkleminin test edilmesi için ayrılmıştır. Şekil 6.20 incelendiğinde, deneysel ZBİO ile eğitim ZBİO ve test ZBİO değerlerinin $\pm\%10$ bağıl hata içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.21. DeneySEL olarak ölçülen ZBİO ile çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminde hesaplanan ZBİO'nun değişimi



Şekil 6.22. DeneySEL olarak ölçülen ZBİO ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denkleminde hesaplanan ZBİO'nun değişimi

DeneySEL olarak ölçülen ZBİO ile ÇDDRA denkleminde hesaplanan ZBİO'nun ve ÇDKF şeklindeki regresyon denkleminde hesaplanan ZBİO'nun değişimi, sırasıyla Şekil 6.21 ve Şekil 6.22'de verilmiştir. Şekil 6.21 ve Şekil 6.22 incelendiğinde, eğitim ZBİO ve test ZBİO

değerlerinin, şeklin tam ortasından çizilen eğim çizgisine yakın dağılım gösterdiği ve uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Eğitim değerleri kullanılarak oluşturulan regresyon denklemlerinin test edilmesi neticesinde, elde edilen sonuçların eğim çizgisine yakın değerler verdiği açıkça görülmüştür.

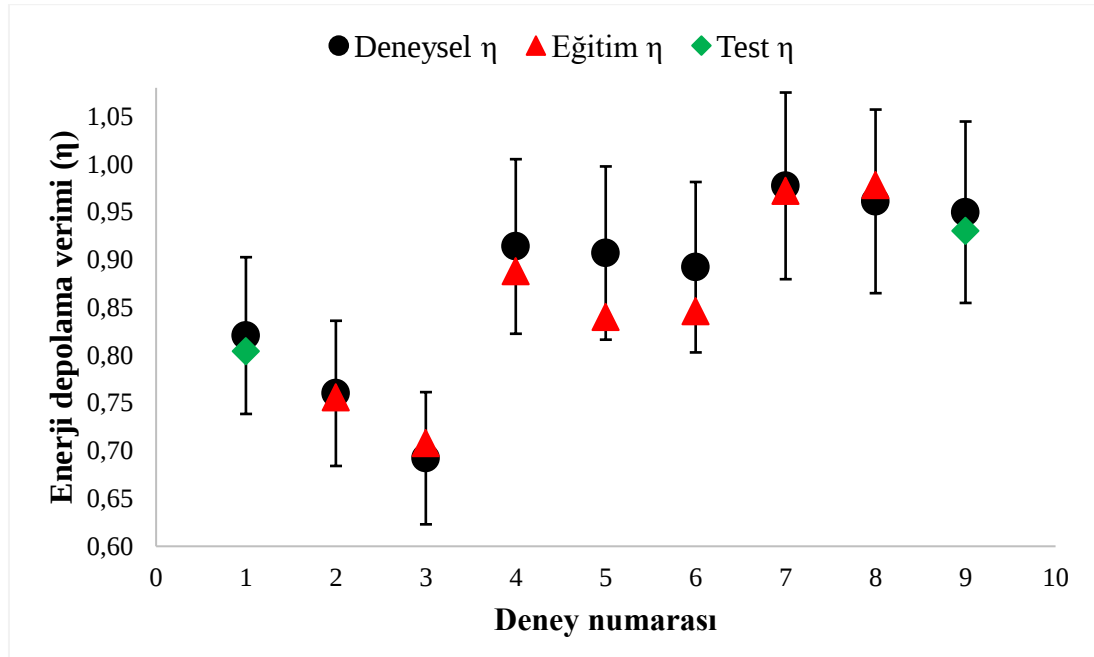
Çizelge 6.59. İki farklı regresyon analizi ile hesaplanan η parametresinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

Deney dizilimi	Deneysel η	Doğrusal regresyon denklemi ile hesaplanan η	Bağıl hatanın mutlak değeri ($ \varepsilon_b $, %)	Kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemi ile hesaplanan η	Bağıl hatanın mutlak değeri ($ \varepsilon_b $, %)
A ₁ B ₁ C ₁	0,82061	0,804	2,02	0,787	4,12
A ₁ B ₂ C ₂	0,76011	0,756	0,54	0,746	1,83
A ₁ B ₃ C ₃	0,69219	0,708	2,28	0,718	3,72
A ₂ B ₁ C ₂	0,91391	0,888	2,83	0,918	0,44
A ₂ B ₂ C ₃	0,90700	0,840	7,39	0,874	3,65
A ₂ B ₃ C ₁	0,89219	0,846	5,18	0,879	1,52
A ₃ B ₁ C ₃	0,97736	0,972	0,55	0,989	1,18
A ₃ B ₂ C ₁	0,96112	0,978	1,76	0,984	2,37
A ₃ B ₃ C ₂	0,94974	0,930	2,08	0,943	0,72
Bağıl hatanın ortalaması			2,74	Bağıl hatanın ortalaması	2,17

Çizelge 6.59’da iki farklı regresyon analizi ile hesaplanan η parametresinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. ÇDDRA denklemi kullanılarak elde edilen η değerleri ile deneysel η değerleri arasındaki bağıl hatanın mutlak değerinin ($|\varepsilon_b|$), yüzdesel olarak en çok %7,39 ile en az %0,54 arasında değiştiği belirlenmiştir. Ortalama $|\varepsilon_b|$ ise %2,74 olarak elde edilmiştir. ÇDKF şeklindeki regresyon denklemi ile hesaplanan η değerleri ile deneysel η değerleri arasındaki $|\varepsilon_b|$, yüzdesel olarak en çok %4,12 ile en az %0,44 arasında değişmiştir. Ortalama $|\varepsilon_b|$ ise %2,17 olarak elde edilmiştir. Böylece η sonuç parametresi için elde edilen regresyon denklemlerinden ÇDKF şeklindeki regresyon analizi kullanılarak türetilen denklemin daha başarılı tahmin yapabildiği sonucuna ulaşılmıştır.

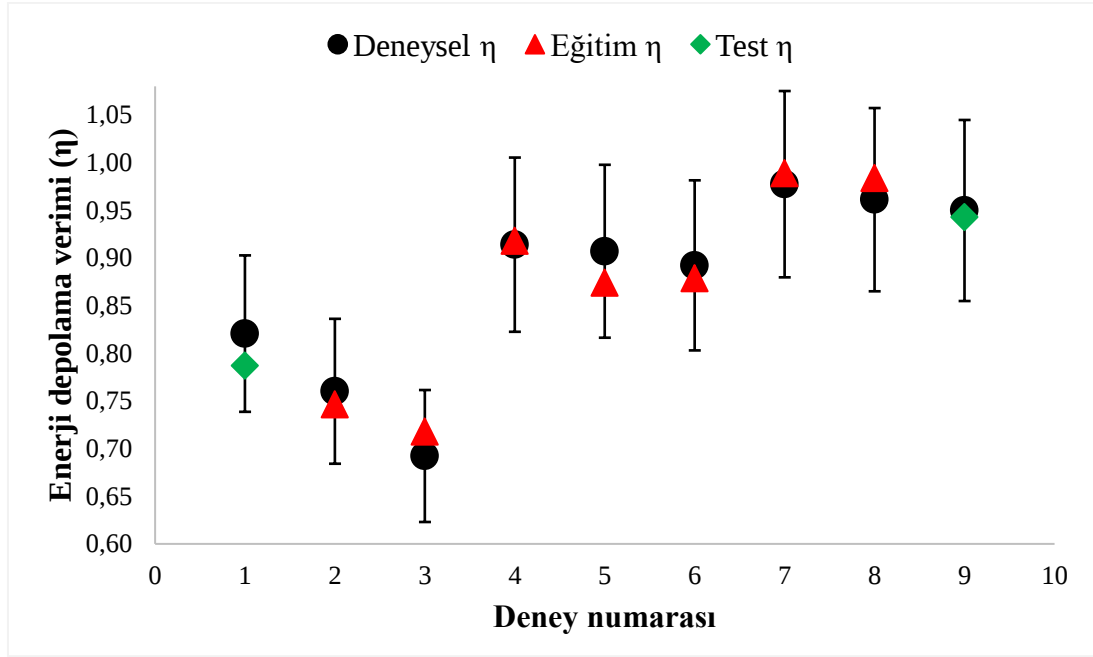
Şekil 6.23’de deneysel η ile ÇDDRA ile türetilmiş regresyon denkleminin kullanılmasıyla elde edilmiş ve Çizelge 6.59’da listelenmiş olan sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur.

Taguchi deney tasarımı yöntemine göre belirlenmiş olan L_9 ortogonal dizi kullanılarak 9 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerden 7 tanesi ÇDDRA’da eğitim verisi olarak kullanılmıştır. 1. ve 9. deneyler ise regresyon denkleminin test edilmesi için ayrılmıştır. Şekil 6.23 incelendiğinde, deneysel η ile eğitim η ve test η değerlerinin $\pm\%10$ bağıl hata içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

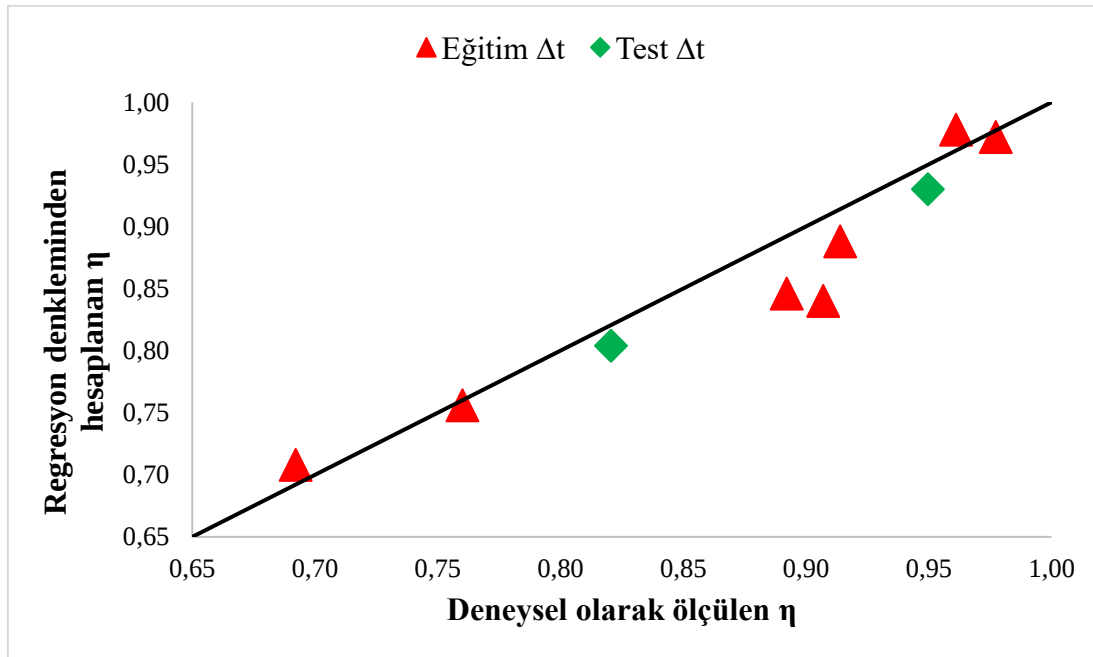


Şekil 6.23. Deneysel η ile çok değişkenli doğrusal regresyon sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.24’de deneysel η ile ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile türetilmiş olan regresyon denkleminin kullanılmasıyla elde edilmiş ve Çizelge 6.59’da listelenmiş olan sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. Taguchi deney tasarımı yöntemine göre belirlenmiş olan L_9 ortogonal dizi kullanılarak 9 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerden 7 tanesi ÇDKF şeklindeki regresyonda eğitim verisi olarak kullanılmıştır. Kalan 1. ve 9. deneyler ise regresyon denkleminin test edilmesi için ayrılmıştır. Şekil 6.24 incelendiğinde, deneysel η ile eğitim η ve test η değerlerinin $\pm\%10$ bağıl hata içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.



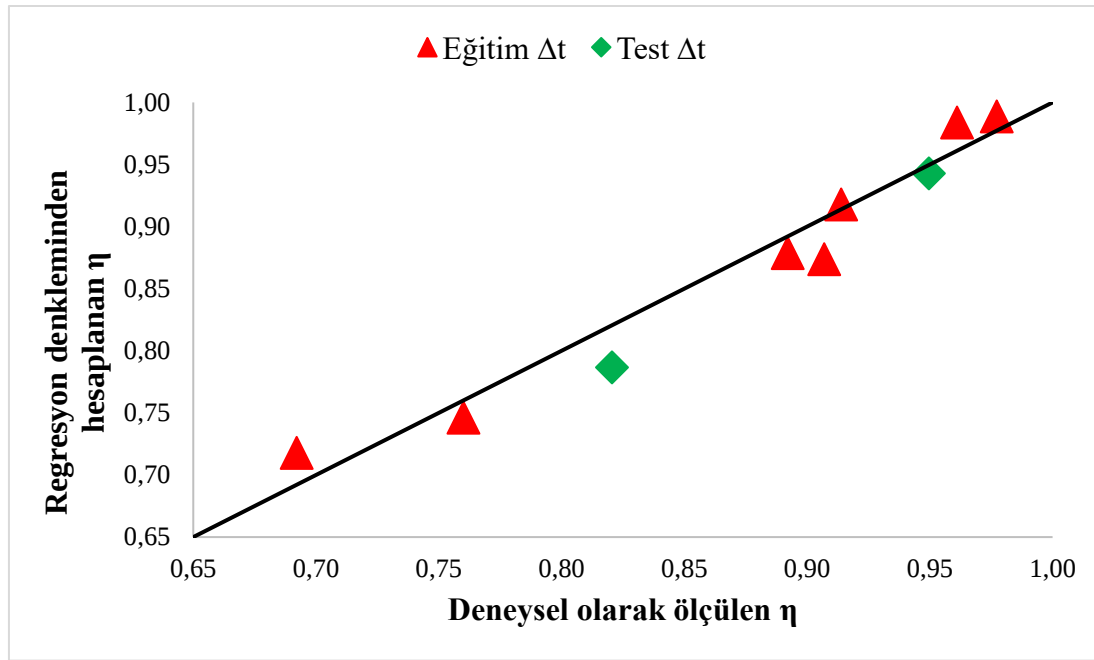
Şekil 6.24. Deneysel η ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.25. Deneysel olarak ölçülen η ile çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminde hesaplanan η 'nın değişimi

Deneysel olarak ölçülen değerler dikkate alınarak hesaplanan η ile ÇDDRA denkleminde hesaplanan η 'nın ve ÇDKF şeklindeki regresyon denkleminde hesaplanan η 'nın değişimi, sırasıyla Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da verilmiştir. Şekil 6.25 ve Şekil 6.26 incelendiğinde,

eğitim η ve test η değerlerinin, şeklin tam ortasından çizilen eğim çizgisine yakın dağılım gösterdiği ve uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Eğitim değerleri kullanılarak oluşturulan regresyon denklemlerinin test edilmesi neticesinde, elde edilen sonuçların eğim çizgisine yakın değerler verdiği açıkça görülmüştür.

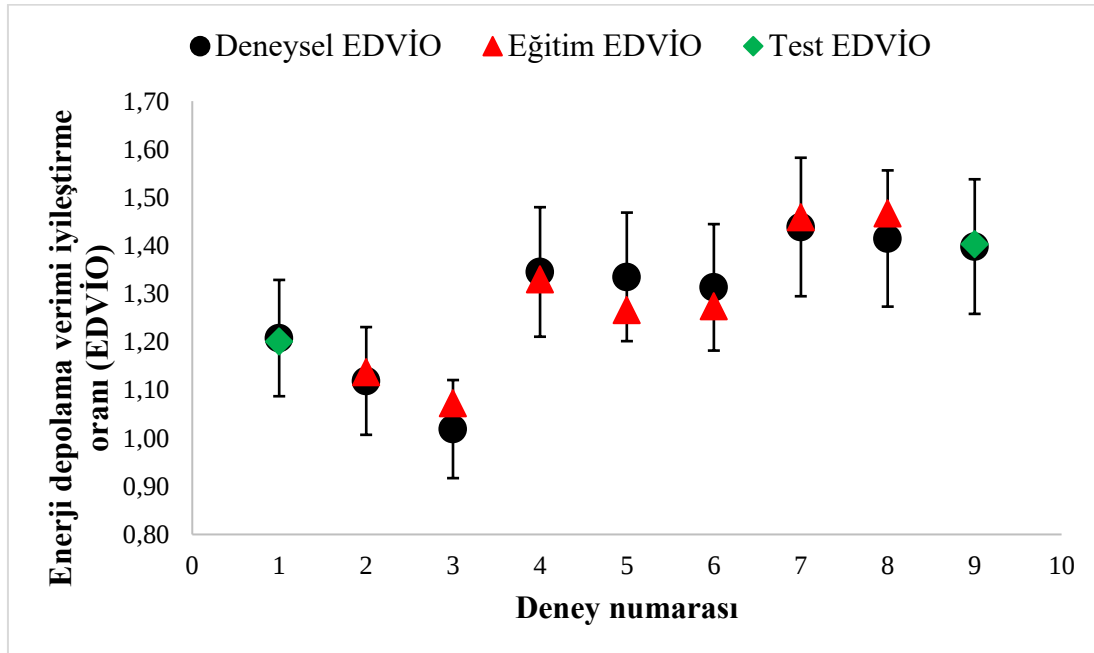


Şekil 6.26. DeneySEL olarak ölçülen η ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemlerinden hesaplanan η 'nın değişimi

Çizelge 6.60'da iki farklı regresyon analizi ile hesaplanan EDVİO parametresinin, deneySEL sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. ÇDDRA denklemi kullanılarak elde edilen EDVİO değerleri ile deneySEL EDVİO değerleri arasındaki bağıl hatanın mutlak değerinin ($|\varepsilon_b|$), yüzdesel olarak en çok %5,32 ile en az %0,36 arasında değiştiği belirlenmiştir. Ortalama $|\varepsilon_b|$ ise %2,48 olarak elde edilmiştir. ÇDKF şeklindeki regresyon denklemi ile hesaplanan EDVİO değerleri ile deneySEL EDVİO değerleri arasındaki $|\varepsilon_b|$, yüzdesel olarak en çok %4,05 ile en az %0,50 arasında değişmiştir. Ortalama $|\varepsilon_b|$ ise %2,16 olarak elde edilmiştir. Böylece EDVİO sonuç parametresi için elde edilen regresyon denklemlerinden ÇDKF şeklindeki regresyon analizi kullanılarak türetilen denklemin daha başarılı tahmin yapabildiği sonucuna ulaşılmıştır.

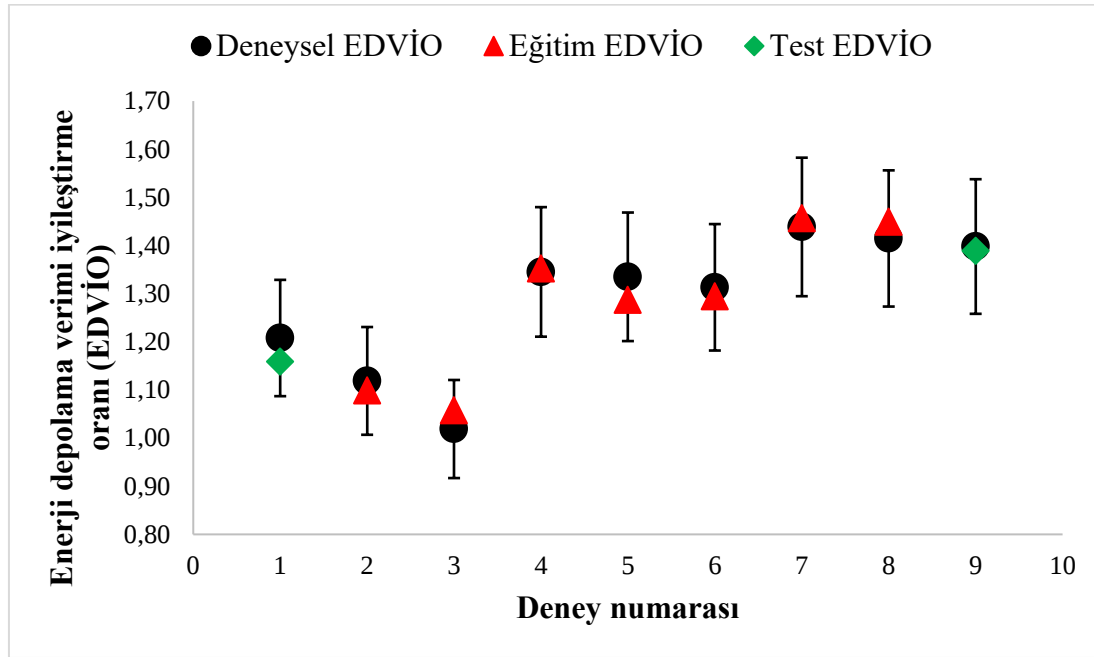
Çizelge 6.60. İki farklı regresyon analizi ile hesaplanan EDVİO parametresinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

Deney dizilimi	Deneysel EDVİO	Doğrusal regresyon denklemi ile hesaplanan EDVİO	Bağıl hatanın mutlak değeri ($ \varepsilon_b $, %)	Kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemi ile hesaplanan EDVİO	Bağıl hatanın mutlak değeri ($ \varepsilon_b $, %)
A ₁ B ₁ C ₁	1,20786	1,201	0,57	1,159	4,05
A ₁ B ₂ C ₂	1,11881	1,137	1,63	1,099	1,76
A ₁ B ₃ C ₃	1,01884	1,073	5,32	1,057	3,79
A ₂ B ₁ C ₂	1,34518	1,330	1,13	1,352	0,50
A ₂ B ₂ C ₃	1,33502	1,266	5,17	1,287	3,58
A ₂ B ₃ C ₁	1,31322	1,274	2,99	1,294	1,46
A ₃ B ₁ C ₃	1,43858	1,459	1,42	1,457	1,25
A ₃ B ₂ C ₁	1,41467	1,467	3,70	1,449	2,44
A ₃ B ₃ C ₂	1,39792	1,403	0,36	1,389	0,65
Bağıl hatanın ortalaması			2,48	Bağıl hatanın ortalaması	2,16



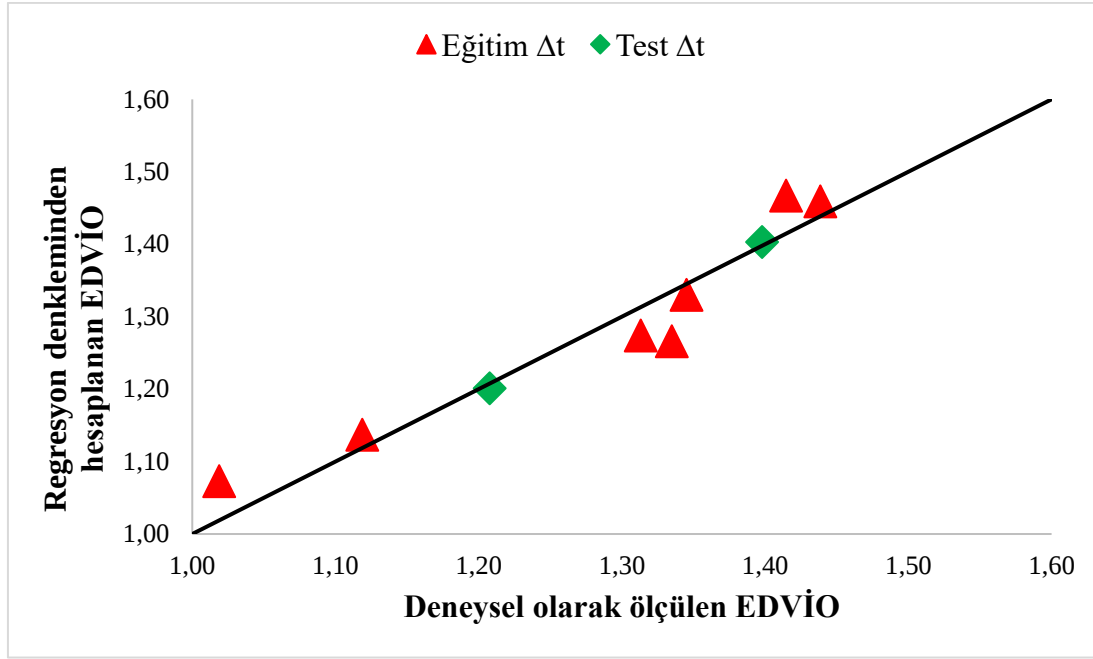
Şekil 6.27. Deneysel EDVİO ile çok değişkenli doğrusal regresyon sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.27’de deneysel EDVİO ile ÇDDRA ile türetilmiş olan regresyon denkleminin kullanılmasıyla elde edilmiş ve Çizelge 6.60’da listelenmiş olan sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. Taguchi deney tasarımı yöntemine göre belirlenmiş olan L_9 ortogonal dizi kullanılarak 9 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerden 7 tanesi ÇDDRA’nde eğitim verisi olarak kullanılmıştır. Kalan 1. ve 9. deneyler ise regresyon denkleminin test edilmesi için ayrılmıştır. Şekil 6.27 incelendiğinde, deneysel EDVİO ile eğitim EDVİO ve test EDVİO değerlerinin $\pm\%10$ bağıl hata içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

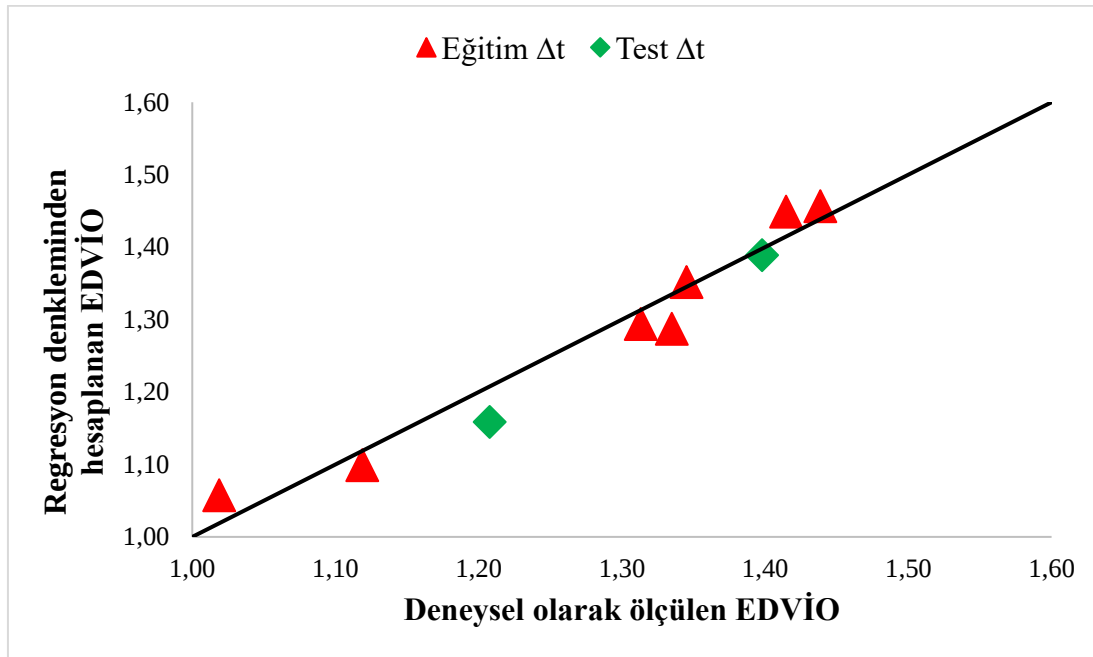


Şeki 6.28. Deneysel EDVİO ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.28’da deneysel EDVİO ile ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile türetilmiş olan regresyon denkleminin kullanılmasıyla elde edilmiş ve Çizelge 6.60’da listelenmiş olan sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. Taguchi deney tasarımı yöntemine göre belirlenmiş olan L_9 ortogonal dizi kullanılarak 9 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerden 7 tanesi ÇDKF şeklindeki regresyonda eğitim verisi olarak kullanılmıştır. Kalan 1. ve 9. deneyler ise regresyon denkleminin test edilmesi için ayrılmıştır. Şekil 6.28 incelendiğinde, deneysel EDVİO ile eğitim EDVİO ve test EDVİO değerlerinin $\pm\%10$ bağıl hata içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.29. Deneyisel olarak ölçülen EDVİO ile çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminde hesaplanan EDVİO'nun değişimi



Şekil 6.30. Deneyisel olarak ölçülen EDVİO ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denkleminde hesaplanan EDVİO'nun değişimi

Deneyisel olarak ölçülen değerler dikkate alınarak hesaplanan EDVİO ile ÇDDRA denkleminde hesaplanan EDVİO'nun ve ÇDKF şeklindeki regresyon denkleminde hesaplanan EDVİO'nun değişimi, sırasıyla Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'da verilmiştir. Şekil 6.29

ve Şekil 6.30 incelendiğinde, eğitim EDVİO ve test EDVİO değerlerinin, şeklin tam ortasından çizilen eğim çizgisine yakın dağılım gösterdiği ve uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Eğitim değerleri kullanılarak oluşturulan regresyon denklemlerinin test edilmesi neticesinde, elde edilen sonuçların eğim çizgisine yakın değerler verdiği açıkça görülmüştür.

ÇDDRA ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizinde, her bir sonuç parametresi için 7 adet deney verisi kullanılmıştır. Bu 7 adet deney verisi ile oluşturulan regresyon denklemlerinin ve bu regresyon denklemleri ile hesaplanan sonuçların istatistiki olarak değerlendirilmesi R^2 , R^2_{adj} , MAPE ve RMSE değerlerinin hesaplanması ile gerçekleştirilmiştir. Eğitim verileri için yapılmış olan değerlendirme sonuçları Çizelge 6.61’de sunulmuştur. Çizelge 6.61’deki sonuçların bir kısmı direkt olarak IBM SPSS yazılımında yapılan regresyon analizlerinden ve bir kısmı da hesaplanarak elde edilmiştir. Tabachnick ve Fidell [172], türetilen regresyon analizinde R^2 ve R^2_{adj} değerlerinin 0,80’den büyük olması durumunda, regresyon denkleminin başarılı bir şekilde tahmin gerçekleştirebildiğini ifade etmişlerdir. Çizelge 6.61 incelendiğinde her iki regresyon analizinin sonucunda elde edilen R^2 ve R^2_{adj} değerleri 0,80’den yüksek bulunmuştur. Eğitim verileri kullanılarak Δt sonuç parametresi için türetilen regresyon denklemlerinden ÇDDRA denklemi, ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile üretilen regresyon denklemine göre daha iyi tahmin yapabilmıştır. Çünkü ÇDDRA’nın R^2_{adj} değeri 0,962 iken ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin R^2_{adj} değeri 0,959 olarak bulunmuştur. Ayrıca MAPE değerleri sırasıyla ÇDDRA için %1,703 ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için %1,846 olarak bulunmuştur. RMSE değerleri ise ÇDDRA ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için birbirine yakın olmakla birlikte sırasıyla 3,825 ve 3,853 olarak elde edilmiştir.

Eğitim verileri kullanılarak ZBİO sonuç parametresi için türetilen regresyon denklemlerinden ÇDDRA denklemi, ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile üretilen regresyon denklemine göre daha iyi tahmin yapabilmıştır. Çünkü ÇDDRA’nın R^2_{adj} değeri 0,991 iken ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin R^2_{adj} değeri 0,959 olarak bulunmuştur. Ayrıca MAPE değerleri sırasıyla ÇDDRA için %0,974 ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için %1,838 olarak bulunmuştur. RMSE değerleri ise ÇDDRA ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için birbirine yakın olmakla birlikte sırasıyla 0,015 ve 0,029 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 6.61. Eğitim verilerine göre regresyon analizlerinin istatistiki değerlendirmesi

	ÇDDRA, IBM SPSS, 7 veri			
	Δt	ZBİO	η	EDVİO
R^2	0,981	0,996	0,912	0,912
R^2_{adj}	0,962	0,991	0,824	0,824
MAPE (%)	1,703	0,974	2,933	3,049
RMSE	3,825	0,015	0,034	0,043
	ÇDKF şeklindeki regresyon analizi, IBM SPSS, 7 veri			
	Δt	ZBİO	η	EDVİO
R^2	0,979	0,979	0,960	0,960
R^2_{adj}	0,959	0,959	0,919	0,919
MAPE (%)	1,846	1,838	2,099	2,111
RMSE	3,853	0,029	0,020	0,029

Eğitim verileri kullanılarak η sonuç parametresi için türetilen regresyon denklemlerinden ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile üretilen regresyon denklemi, ÇDDRA denklemine göre daha iyi tahmin yapabilmektedir. Çünkü ÇDDRA'nın R^2_{adj} değeri 0,824 iken ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin R^2_{adj} değeri 0,919 olarak bulunmuştur. Ayrıca MAPE değerleri sırasıyla ÇDDRA için %2,933 ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için %2,099 olarak bulunmuştur. RMSE değerleri ise ÇDDRA ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için birbirine yakın olmakla birlikte sırasıyla 0,034 ve 0,020 olarak elde edilmiştir. R^2_{adj} , MAPE ve RMSE değerlerinin karşılaştırılmasıyla da ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

Eğitim verileri kullanılarak EDVİO sonuç parametresi için türetilen regresyon denklemlerinden ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile üretilen regresyon denklemi, ÇDDRA denklemine göre daha iyi tahmin yapabilmektedir. Çünkü ÇDDRA'nın R^2_{adj} değeri 0,824 iken ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin R^2_{adj} değeri 0,912 olarak bulunmuştur. Ayrıca MAPE değerleri sırasıyla ÇDDRA için %3,049 ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için %2,111 olarak bulunmuştur. RMSE değerleri ise ÇDDRA ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için birbirine yakın olmakla birlikte sırasıyla 0,043 ve 0,029 olarak elde edilmiştir. R^2_{adj} , MAPE ve RMSE değerlerinin karşılaştırılmasıyla da ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

7 adet deney verisi kullanılarak oluşturulan ÇDDRA ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi denklemlerinin L_9 ortogonal diziye göre yapılmış olan toplam 9 adet deney için istatistiki olarak değerlendirilmesi R^2 , R^2_{adj} , MAPE ve RMSE değerlerinin hesaplanması ile gerçekleştirilmiştir. Tüm deneysel veriler için yapılmış olan değerlendirme sonuçları Çizelge 6.62’de sunulmuştur. Çizelge 6.62’deki sonuçlar Microsoft Excel yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 6.62 incelendiğinde her iki regresyon analizinin sonucunda elde edilen R^2 ve R^2_{adj} değerleri Tabachnick ve Fidell [172] tarafından ifade edilen başarı sınırı olan 0,80’dan yüksek bulunmuştur. Δt sonuç parametresi için türetilen regresyon denklemlerinden ÇDDRA denklemi, ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile üretilen regresyon denklemine göre tüm deneysel dizilimler için daha iyi tahmin yapabilmektedir. Çünkü ÇDDRA’nın R^2_{adj} değeri 0,895 iken ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin R^2_{adj} değeri 0,853 olarak bulunmuştur. Ayrıca MAPE değerleri sırasıyla ÇDDRA için %2,700 ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için %2,945 olarak bulunmuştur. RMSE değerleri ise ÇDDRA ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için birbirine yakın olmakla birlikte sırasıyla 6,471 ve 7,659 olarak elde edilmiştir. R^2_{adj} , MAPE ve RMSE değerlerinin karşılaştırılmasıyla da ÇDDR’nin daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.62. Regresyon denklemlerine göre tüm deneysel verilerin istatistiki değerlendirmesi

Değerlendirme ifadesi	ÇDDRA, Excel, 9 veri			
	Δt	ZBİO	η	EDVİO
R^2	0,934	0,914	0,887	0,921
R^2_{adj}	0,895	0,862	0,820	0,873
MAPE (%)	2,700	2,508	2,737	2,475
RMSE	6,471	0,050	0,031	0,038
Değerlendirme ifadesi	ÇDKF şeklindeki regresyon analizi, Excel, 9 veri			
	Δt	ZBİO	η	EDVİO
R^2	0,908	0,922	0,947	0,948
R^2_{adj}	0,853	0,874	0,916	0,917
MAPE (%)	2,945	2,855	2,171	2,164
RMSE	7,659	0,048	0,021	0,031

ZBİO sonuç parametresi için türetilen regresyon denklemlerinden ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile üretilen regresyon denklemi, ÇDDRA denklemine göre tüm deneysel dizilimler için daha iyi tahmin yapabilmektedir. Çünkü ÇDDRA’nın R^2_{adj} değeri 0,862 iken

ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin R^2_{adj} değeri 0,874 olarak bulunmuştur. Ayrıca MAPE değerleri sırasıyla ÇDDRA için %2,508 ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için %2,855 olarak bulunmuştur. RMSE değerleri ise ÇDDRA ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için birbirine yakın olmakla birlikte sırasıyla 0,050 ve 0,048 olarak elde edilmiştir. R^2_{adj} , MAPE ve RMSE değerlerinin karşılaştırılmasıyla da ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

η sonuç parametresi için türetilen regresyon denklemlerinden ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile üretilen regresyon denklemi, ÇDDRA denklemine göre tüm deneysel dizilimler için daha iyi tahmin yapabilmektedir. Çünkü ÇDDRA'nın R^2_{adj} değeri 0,820 iken ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin R^2_{adj} değeri 0,916 olarak bulunmuştur. Ayrıca MAPE değerleri sırasıyla ÇDDRA için %2,737 ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için %2,171 olarak bulunmuştur. RMSE değerleri ise ÇDDRA ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için birbirine yakın olmakla birlikte sırasıyla 0,031 ve 0,021 olarak elde edilmiştir. R^2_{adj} , MAPE ve RMSE değerlerinin karşılaştırılmasıyla da ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

EDVİO sonuç parametresi için türetilen regresyon denklemlerinden ÇDKF şeklindeki regresyon analizi ile üretilen regresyon denklemi, ÇDDRA denklemine göre tüm deneysel dizilimler için daha iyi tahmin yapabilmektedir. Çünkü ÇDDRA'nın R^2_{adj} değeri 0,873 iken ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin R^2_{adj} değeri 0,917 olarak bulunmuştur. Ayrıca MAPE değerleri sırasıyla ÇDDRA için %2,475 ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için %2,164 olarak bulunmuştur. RMSE değerleri ise ÇDDRA ve ÇDKF şeklindeki regresyon analizi için birbirine yakın olmakla birlikte sırasıyla 0,038 ve 0,031 olarak elde edilmiştir. R^2_{adj} , MAPE ve RMSE değerlerinin karşılaştırılmasıyla da ÇDKF şeklindeki regresyon analizinin daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

6.5. Belirsizlik Analizi Bulguları

FDM tarafından depolanmış olan toplam duyulur ısıнын belirsizliği %1,41 ile %2,14 arasında bulunmuştur. FDM tarafından depolanmış olan gizli ısı tüm deney dizilimleri için aynı olduğundan belirsizliği de benzer şekilde %0,01 olarak tüm dizilimler için benzer şekilde elde edilmiştir. FDM tarafından depolanan duyulur ve gizli ısı formundaki toplam enerjinin belirsizliği ise %0,42 ile %0,50 arasında bulunmuştur. Emici plaka tarafından depolanan

duyulur ısının belirsizliği %2,51 ile %2,62 arasında bulunmuştur. YTITA içeren GIIED ünitesi tarafından depolanan toplam ısı enerjisinin belirsizliği %0,42 ile %0,49 arasında bulunmuştur. Güneş simlatöründen emici plakaya ulaşan yapay güneş enerjisinin belirsizliği ise %0,65 ile %0,83 arasında bulunmuştur. ZBİO'nun belirsizliği %0,60 ile %0,78 arasında değişim göstermiştir. η 'nın belirsizliği ise tüm deneyler için %0,01'e yakın değerler olacak şekilde hesaplanmıştır. Son olarak tüm deneylere ait EDVİO'ların belirsizliği %1,80 ile %2,06 arasında bulunmuştur. Elde edilen belirsizlik analizi sonuçları, [13, 81, 84, 117, 182] literatür çalışmaları ile benzerlik göstermiştir.

6.6. Literatürdeki Çalışmalar ile Karşılaştırmalar

Tez çalışması kapsamında, dikdörtgen bir GIIED ünitesi içerisinde bulunan 52-54°C ergime derecesine sahip bir parafin waxın düşük ısı iletkenliğini iyileştirmek için bünyesine YTITA eklenerek ergime süresi ve enerji depolama performansı, farklı tel çapı (d, mm), yay çapı (D, mm) ve yay adımı (p, mm) değişkenlerine bağlı olarak Taguchi tabanlı GİA yöntemiyle incelenmiş ve optimum deney dizilimi belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde, YTITA içeren deney dizilimleri arasındaki FDM'nin ergime süresi, kanat içermeyen duruma göre en fazla %36,82 oranında kısaltılarak 239 dakikadan 151 dakikaya düşürülmüştür. Bunun yanında enerji depolama verimi de %43,86 oranında yükselterek %67,94'den %97,74'e çıkarılmıştır. Dikdörtgen veya kare bir boşluğa sahip GIIED ünitesi içerisinde YTITA kullanımı ile ilgili bir literatür çalışmasına rastlanılmadığı için mevcut çalışma, GIIED ünitesi içerisinde dikey veya yatay olarak konumlandırılmış düz veya düz kenarlara sahip kanat geometrilerinin kullanılması ile FDM'nin enerji depolama performansında meydana getirilen iyileştirmeler dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Farklı kanatçık tipi ısı transferi artırıcı (ITA) eklenmiş dikdörtgen veya kare bir boşluğa sahip GIIED ünitesi içerisindeki değişik FDM'lerin enerji depolama performanslarının karşılaştırılması Çizelge 6.63'de verilmiştir. Mevcut çalışmada ısı akısı 580 W/m² gibi düşük bir değere sahip olmasına karşın literatürdeki çalışmalar ile kıyaslanabilecek miktarlarda iyileştirme gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.63. GIIED ünitesinde kullanılan FDM'lerin ergime sürelerinin ve enerji depolama davranışlarının literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması

Literatürdeki çalışma	Çalışma detayı	Enerji depolama performansı
Kamkari ve Shokouhmand [23]	Şeffaf dikdörtgen bir muhafazanın sağ yan duvarına alüminyumdan imal edilerek düz ve yatay şekilde monte edilmiş kanatçıkların olması ve olmaması durumlarında, içerisine konulan 48,2°C ergime sıcaklığına sahip laurik asidin ergime davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Muhafazanın sağ yan duvarına sıcak su banyosundan 55, 60 ve 70°C'de su gönderilmiştir.	1 ve 3 kanatlı yapının ergime süresi kanatsız yapıya göre %18 ile %37 oranında kısaltılmıştır.
Xu ve diğerleri [24]	Kare bir muhafazanın sol yan duvarına bakırdan imal edilerek düz ve yatay şekilde monte edilmiş kanatçıkların, kalınlık, sayı ve uzunluklarını değişiminin 47,51-48,51°C ergime derecesine sahip parafinin ergime süresi üzerindeki etkisi sayısal ve genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir.	Toplam kanat uzunluğu 1,3 mm'den küçük ise tek kanat, 1,3-2,6 mm arasında ise iki kanat, 2,6-3,6 mm arasında ise üç kanat ve 3,6 mm'den büyük ise dört kanat en optimal kanat sayısı olarak yapılan çalışma şartları için belirlenmiştir. Tüm kanatçık tasarımları, kanatsız yapıya göre FDM'nin ergime süresini %50 oranında azaltmıştır.
Fekadu ve Assaye [25]	Dikdörtgen bir muhafazanın tabanına alüminyumdan imal edilmiş 4 mm sabit kanat kalınlığına sahip farklı sayı ve açılardaki kanatlar dikey yukarı yönde eklenerek, 48,2°C ergime sıcaklığına sahip laurik asidin ergime davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Muhafazanın tabanı 60°C'de sabit tutulmuştur.	60°C sabit duvar sıcaklığına sahip 2 kanatlı düz yapının ergime süresi kanatsız yapıya göre %43 oranında kısaltılmıştır. Açılı kanatçıklardan 45° açıya sahip olan %31 oranında ve 60° açıya sahip olan %5,17 oranında ergime süresinin kanatsız yapıya göre kısaltmasını sağlamıştır.
Wang ve diğerleri [28]	Dikey bir FDM muhafazası içerisinde bulunan 48,2°C ergime derecesine sahip laurik asidin ergime süresini kısaltmak için L şeklindeki düz kanat, muhafazanın sol duvarına eklenmiş ve ergime davranışındaki gelişmeler sayısal olarak incelenmiştir. Duvar sıcaklığı 343 K'de sabit tutulmuştur.	Dikey dikdörtgen muhafaza içerisinde 2 adet düz yatay kanat kullanmak yerine 1 adet L şeklinde kanat kullanılarak kanatsız duruma göre ergime süresinde %45'lik bir düşüş meydana getirilmiştir.
Tian ve diğerleri [61]	Dikdörtgen bir hacim içerisine sağ yüzeye gelecek şekilde bakır, alüminyum, karbon çeliği ve çelik 302 malzemelerinden oluşan iki adet kanatçık ekleyerek 48,2°C ergime derecesine sahip laurik asidin ergime süresi üzerindeki değişimi sayısal olarak incelenmiştir.	Ergime süresinin bakır, alüminyum, karbon çelik ve çelik 302 kanatçıkların dikdörtgen hacme eklenmesiyle kanatsız yapıya göre sırasıyla %41,6, %41,0, %40,1 ve %37,2 oranında azaldığı bulunmuştur. Kütle başına depolanan enerjide önemli miktarda azalma kanatçıkların eklenmesiyle sağlanmış ve hesaplanan düşüş miktarı sırasıyla bakır kanatçıklar için %27 oranında ve alüminyum kanatçıklar için %9,4 oranında olmuştur. Depolanan enerji başına maliyet oranı kanatsız duruma göre %5,6 kadar bakır kanatçıklar için daha yüksek bulunmuştur.
Kamkari ve Groulx [74]	Şeffaf dikdörtgen bir muhafazanın sağ yan duvarına alüminyumdan imal edilerek düz ve yatay şekilde monte edilmiş 1 ve 3 adet kanatçıkların olması ve olmaması durumlarında, içerisine konulan 48,2°C ergime sıcaklığına sahip laurik asidin ergime davranışı deneysel ve sayısal olarak	Hem kanatlı hem de kanatsız muhafazalar için, eğim açısının azaltılması ergime hızının artırmıştır. Kanatsız dikey muhafazaya kıyasla, kanatsız yatay ve 3 kanatlı dikey muhafazalar tarafından elde edilen ısı transferi iyileştirmeleri sırasıyla %115 ve %56 olarak hesaplanmıştır:

Çizelge 6.63. (devam) GIIED ünitesinde kullanılan FDM'lerin ergime sürelerinin ve enerji depolama davranışlarının literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması

	incelenmiştir. Şeffaf dikdörtgen muhafaza 90° (dikey), 45° ve 0° (yatay) eğim açılarında döndürülmüştür. Muhafazanın sağ yan duvarına sıcak su banyosundan 55, 60 ve 70°C'de su gönderilmiştir.	
Bouhal ve diğerleri [76]	Pasif güneş binalarına 29,78°C ergime sıcaklığına sahip galyumun eklenebilmesi üzerine deneysel ve sayısal bir çalışma yapılmıştır. Dikdörtgen bir muhafazanın sağ yüzeyi 38,3°C de sıcak ve sol yüzeyi 28,3°C soğuk olarak tutulmuştur. Diğer duvarlar ise yalıtılmıştır. Galyumun ergime hızını arttırmak için dikdörtgen ve üçgen yapıdaki kanatlar muhafazanın sağ duvarına monte edilmiştir.	Dikdörtgen şekilli kanat kullanımı ile galyumun ergime süresinde %8,57 oranında bir iyileşme sağlanarak 35 dakikadan 32 dakikaya düşürülmüştür. Üçgen şekilli kanat kullanımı dikdörtgen muhafaza içerisinde daha homojen bir ergime sürecinin meydana gelmesini sağlamıştır.
Karami ve Kamkari [79]	1 ve 3 kanatlı dikdörtgen bir hacmin yatay eksenle yapmış oldukları eğim açısı 0°, 45°, 90°, 135° ve 180° değerlerinde değiştirilerek hacmin içerisinde bulunan 48,2°C ergime derecesine sahip laurik asidin kaldırma kuvveti kaynaklı taşınım hareketlerinin gelişimi sayısal olarak incelenmiştir. Kanatçıklar alüminyum olarak seçilmiştir.	Doğal konveksiyon akışlarının yoğunlaşması ve sıvı FDM'deki girdap sayısının artması nedeniyle dikdörtgen hacmin eğim açısının azalmasıyla ergime süresinin azaldığı bulunmuştur. Kanatsız dikey depoya kıyasla en yüksek ergime süresinin düşüşü %72 oranla 0° eğim açısına sahip 3 kanatlı depoyla elde edilmiştir. Dikdörtgen deponun eğim açısının artırılması depolanan toplam enerji miktarını yükseltmiş fakat kanat sayısının artırılması ise düşürmüştür. Çünkü kanat sayısının artması depo hacmi içerisinde bulunan FDM miktarını azaltmıştır.
Abdi ve diğerleri [80]	Alt yüzeyi 55°C, 60°C ve 70°C sabit sıcaklıkta tutulan iki boyutlu şeffaf dikdörtgen bir muhafaza içerisindeki 48,2°C ergime derecesine sahip laurik asidin ergime hızını yükseltmek için alüminyumdan yapılmış 1, 3 ve 5 kanat kullanılması durumundaki ısı transferi hızı ve enerji yoğunluğu sayısal olarak incelenmiştir. Enerji depolama çalışmasında kanatların boyu ve sayısı ile ilgili detaylı parametrik çalışma yapılmıştır.	Isı transferi yüzey alanını arttırmaya ek olarak dikey olarak yönlendirilmiş kanat kullanımının literatürdeki önceki çalışmalarda doğal taşınımın etkisini azaltma eğilimi gösteren yatay kanatların aksine, doğal taşınım mekanizmasını baskılamadığı ifade edilmiştir. Kanat sayısının çoğaltılmadan sadece uzun kanat kullanarak daha yüksek ısı transferi oranı ve toplam ısı transferi katsayısının elde edilebileceği yapılan çalışma ile kanıtlanmıştır. Kanat eklenmesi toplam depolanan gizli ısı miktarını azaltmasına karşın, uygun kanat uzunluğunun ve sayısının belirlenmesi ile kabul edilebilir seviyelerde duyulur ısı da IED sistemi tarafından depolanabilmektedir.
Masoumpour-Samakoush ve diğerleri [92]	Dikdörtgen ve üçgen kanatların birleşiminden oluşan yeni bir alüminyum kanatçık kullanarak dikdörtgen bir depodaki doğal wax 811, RT42 ve n-eicosane gibi farklı FDM'lerin ergime süreci sayısal olarak incelenmiştir. Deponun sol duvarının, FDM'nin ergime sıcaklığından daha yüksek bir sabit sıcaklıkta olduğu varsayılmıştır	İncelenen çeşitli kanat geometrileri arasında, iki yatay dikdörtgen kanadın alt ve üst yüzeylerinde üçer toplamda 6 kanat olacak şekilde kullanılmasıyla ergime miktarı yaklaşık %57,56 oranında artmıştır. Kanat sayısı arttıkça ergime süresi azalmakta ve böylece daha yüksek enerji depolama hızına ulaşılmıştır. Farklı yüksekliklerde (artan veya azalan) üçgen kanatçıkların düzenlenmesiyle ergime süresi daha da kısaltılabilmektedir. Karşılaştırılan FDM'lerden doğal wax 811, daha düşük ergime.

Çizelge 6.63. (devam) GIIED ünitesinde kullanılan FDM'lerin ergime sürelerinin ve enerji depolama davranışlarının literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması

		süresi ve belirli bir süre içinde daha yüksek depolanan enerji ile daha iyi ısı performans göstermiştir.
Mevcut çalışma	Bakırdan imal edilmiş YTITA içeren dikdörtgen bir GIIED ünitesinde bulunan 52-54°C ergime derecesine sahip parafinin ergime ve enerji depolama davranışı yapay güneş ışınımı altında deneysel olarak incelenmiş ve ÇKKV yöntemlerinden olan GİA yöntemiyle optimize edilmiştir.	YTITA içeren deney dizilimleri arasındaki FDM'nin ergime süresi, kanat içermeyen duruma göre en fazla %36,82 oranında kısaltılarak 239 dakikadan 151 dakikaya düşürülmüştür. Bunun yanında enerji depolama verimi de %43,86 oranında yükseltilerek %67,94'den %97,74'e çıkarılmıştır.

İlgili literatürde enerji depolama için kanatçık kullanılmış olan çalışmalar incelendiğinde, dikey ve yatay yönlü düz kanatçık kullanımının yaygın olduğu ve kullanılan kanatçıkların GIIED ünitesi içerisindeki ısı transferi oranını artırdığı, dolayısıyla enerji depolama ve enerji geri kazanım sürelerinin kısaldığı görülmüştür [23-25, 28, 61, 74, 76, 79, 80, 92]. Yapılan bu çalışmada yay tipi kanatçık türü kullanılmış ve yine enerji depolama konusunda olumlu bir etki gözlenmiştir.

Mevcut literatür çalışmalarında en iyilenen deney diziliminin belirlenmesinde daha çok tam faktöriyel deneysel ve sayısal çalışmalar olduğu görülmüştür [95-97, 104, 108]. Bu çalışmada zamandan ve maliyetten tasarruf edebilmek amacıyla Taguchi deney tasarımı yöntemi olan L₉ ortogonal deney dizilimi kullanılmıştır. Elde edilen en iyilenen deney diziliminin doğrulanması ile yapılan çalışmanın uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tel çapının artması ile FDM ile temas eden kanatçığın yüzeyi ve ısı transferi yüzey alanı artmıştır. Buna bağlı olarak Δt azalmıştır. Yay çapının artması ile kanatçık olarak kullanılan yayın uzunluğu artmıştır. Yay çapının artması ile yayın ortasında bulunan FDM'nin kanatçık ile temas eden bölgesinde genişleme meydana gelmiştir. Böylece katı haldeki FDM'nin ergimesi için gereken süre uzamıştır. Benzer bir durum Abdi ve diğerleri [80] tarafından düz dikey yönlü kanatlar için yapılan çalışmada da gözlemlenmiştir. Yay adımı ile Δt arasında pozitif yönlü bir korelasyon bulunmuştur. Yay adımının artması GIIED ünitesi içerisindeki kanatçığın uzunluğunun kısılmasına neden olmuştur. YTITA uzunluğunun düşmesi ısı transferi yüzey alanını düşürmüş ve Δt 'nin uzamasına neden olmuştur. Fakat yapılan çalışmada yay adımının büyük olması sonucunda daha iyi ergime süresi elde edilmiştir. Çünkü varyans analizlerinden de açıkça görüldüğü gibi tel çapının en yüksek

seviyede ve yay çapının en düşük seviyede olmasından kaynaklı olarak yay adımının ergime süresi üzerindeki etkisi çok düşük bulunmuştur. Bu nedenle yay adımının büyük veya küçük olarak bulunmasının ergime süresi üzerindeki etkisi oldukça az olduğu gözlemlenmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada yay tipi kanat yapısının kare bir enerji depolama ünitesindeki FDM'nin ergime ve enerji depolama performansına olan etkisi deneysel olarak incelenmiş ve bu deneysel çalışmadaki iş yükünü azaltmak için Taguchi tabanlı gri ilişkisel optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Yapılan tez çalışmasında farklı boyutlardaki yaylar, tel çapı (d , mm), yay çapı (D , mm) ve yay adımı (p , mm) dikkate alınarak Taguchi deney tasarımı yönteminin belirttiği L_9 ortogonal deney dizilimi ile oluşturulmuş ve elde edilen deneysel sonuçlar gri ilişkisel analiz yöntemi ile optimize edilerek en iyilenen deney dizilimi elde edilmiştir. Deneysel çalışmada her bir deney dizilimindeki FDM'nin ergime süresi (Δt), zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİÖ), enerji depolama verimi (η) ve enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİÖ) tanımlanmış ve hesaplanmıştır. Bulunan deney diziliminin doğrulaması için örnek bir deney dizilimi ile karşılaştırması yapılmıştır. Optimum deney dizilimine etki eden 3 farklı parametrenin (tel çapı, yay çapı ve yay adımı) etki oranları ANOVA (Analysis of Variance) analiz yöntemi ile belirlenmiştir. Regresyon analizi yöntemi ile tel çapı, yay çapı ve yay adımı (d , D ve p) parametrelerinin etki ettiği ergime süresi (Δt), zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİÖ), enerji depolama verimi (η) ve enerji depolama verimi iyileştirme oranı (EDVİÖ) terimlerini ifade eden regresyon bağıntıları geliştirilmiştir. Regresyon ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar istatistiksel hata analizi yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların özeti aşağıdaki gibidir.

- Tel çapı ile Δt arasında negatif yönlü bir korelasyon bulunmuştur. Tel çapının artması ile FDM ile temas eden kanatçı yüzeyi ve ısı transferi yüzey alanı artmıştır. Buna bağlı olarak Δt azalmıştır. Yay çapı ile Δt arasında pozitif yönlü bir korelasyon bulunmuştur. Yay çapının artması ile kanatçık olarak kullanılan yayın uzunluğu artmasına karşın yayın orta bölgesinde bulunan FDM'ye ile teması genişlemektedir. Bu nedenle Δt artmıştır. Yay adımı ile Δt arasında pozitif yönlü bir korelasyon bulunmuştur. Yay adımının artması GIİED ünitesi içerisindeki kanatçığın miktarının azalmasına neden olmuştur. YTITA miktarının düşmesi ısı transferi yüzey alanını düşürmüş ve Δt 'nin uzamasına neden olmuştur.

- Tel çapı ile ZBİO, η ve EDVİO arasında pozitif yönlü bir korelasyon bulunmuştur. Tel çapının artmasına bağlı olarak ısı transferi yüzey alanının da artışıyla ZBİO, η ve EDVİO değerlerinde de artış meydana gelmiştir. FDM'nin Δt 'sinin düşmesi birim zamanda kaynaktan gelen enerjinin çevreye olan ısı kaybının azalmasına ve daha hızlı bir şekilde GIIED ünitesi tarafından depolanmasına imkân tanımıştır. Yay çapı ve yay adımı ile ZBİO, η ve EDVİO arasında negatif yönlü bir korelasyon bulunmuştur. Δt 'nin yay çapının ve yay adımının artışıyla bağlı olarak yükselmesi ZBİO, η ve EDVİO değerlerinin de azalmasına neden olmuştur.
- L₉ ortogonal dizilime göre yapılan tüm deneylerin Δt 'si, YTITA içermeyen boş GIIED ünitesinin Δt 'si ile karşılaştırıldığında, %36,82 ile %2,09 arasında değişen oranlarda yaylı tasarımların Δt 'sinde kısalma sağlanmıştır. YTITA içeren tasarımlarda bulunan FDM en kısa 151 dakikada tamamen ergimekte iken en uzun 234 dakikada tamamen ergimiştir.
- Benzer şekilde L₉ ortogonal dizilime göre yapılan tüm deneylerin η 'sı, YTITA içermeyen boş GIIED ünitesinin η 'sı ile karşılaştırıldığında, %43,86 ile %1,88 arasında değişen oranlarda yaylı tasarımların η 'sında artış sağlanmıştır. YTITA eklenmiş GIIED ünitesi tarafından en fazla %97,74 oranında bir η elde edilmiş iken en az %69,22 oranında bir η elde edilmiştir.
- Tüm YTITA içeren tasarımlardaki ZBİO ve EDVİO değerleri sırasıyla 1,08145-1,58278 ve 1,01884-1,43858 arasında değişim göstermiştir.
- Tüm deneysel sonuçların doğruluğu Chauvenet kriterine göre değerlendirilmiştir. Belirtilen kritere göre tüm ölçülen ve hesaplanan sonuç parametrelerinin doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Deneysel çalışmaya göre belirlenmiş olan sonuç parametrelerinin normallik testleri çarpıklık, basıklık, Anderson-Darling ve Shapiro-Wilk testleri ile test edilmiştir. Çarpıklık ve basıklık değerleri sırasıyla Δt için 0,48824 ve -0,29935, ZBİO için 0,05923 ve -0,43289, η için -0,96396 ve -0,11457 ve son olarak EDVİO için -0,96397 ve -0,11454 olarak bulunmuştur. Elde edilen tüm çarpıklık ve basıklık değerleri [172-174, 179, 180] çalışmalarında belirtilen -1,5 ile +1,5 aralığında olduğu için elde edilen tüm sonuçların normal dağıldığı ifade edilmiştir. Ayrıca Anderson-Darling testine göre p değerleri Δt , ZBİO, η ve EDVİO için sırasıyla 0,825, 0,952, 0,229 ve 0,229 olarak bulunmuştur. Ayrıca Shapiro-Wilk testlerine göre p değerleri de Δt , ZBİO, η ve EDVİO için sırasıyla 0,832, 0,962, 0,228 ve 0,228 olarak elde edilmiştir. Tabachnick ve Fidell [172] tarafından

tanımlanmış olan p değeri $>0,05$ şartının tüm deney sonuçları için sağlanmakta olduğu belirlenmiştir.

- GİA yönteminde, en iyi deney diziliminin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda Δt , ZBİO, η ve EDVİO yanıt değişkenleri, sonuç parametreleri olarak belirlenmiştir.
- GİA yöntemindeki GİD'nin hesaplanmasında her bir sonuç parametresinin GİD üzerindeki ağırlığı Entropi ağırlıklandırma yöntemiyle belirlenmiştir. Yapılan tez çalışmasında Shannon entropi ve Gri entropi olmak üzere 2 farklı kriter ağırlıklandırma yöntemi kullanılmıştır.
- Shannon Entropi yöntemine göre kriter ağırlıkları Δt , ZBİO, η ve EDVİO için sırasıyla 0,30820, 0,29856, 0,19662 ve 0,19662 olarak belirlenmiştir. Bunun yanında Gri Entropi yöntemine göre kriter ağırlıkları Δt , ZBİO, η ve EDVİO için sırasıyla 0,25009, 0,25007, 0,24992 ve 0,24992 olarak bulunmuştur.
- Kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'lerin tepki dağılımları incelendiğinde tel çapı için 0,84392 ile 3. seviyede, yay çapı için 0,68984 ile 1. seviye ve yay adımı için 0,63892 ile 3. seviye değerleri maksimum bulunmuştur. Böylece en iyi dizilim A3B1C3 olarak belirlenmiştir. Aynı tepki dağılımı çizelgesine göre her bir girdi değişkenin seviyeleri arasındaki fark tel çapı için 0,45374, yay çapı için 0,16464 ve yay adımı için 0,07676 olarak belirlenmiştir. Böylece en etkin girdi değişkeninin tel çapı olduğu belirlenmiştir.
- Kriter ağırlıklandırmada Gri entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'lerin tepki dağılımları incelendiğinde tel çapı için 0,85568 ile 3. seviyede, yay çapı için 0,69549 ile 1. seviye ve yay adımı için 0,64389 ile 3. seviye değerleri maksimum bulunmuştur. Böylece en iyi dizilim A3B1C3 olarak belirlenmiştir. Aynı tepki dağılımı çizelgesine göre her bir girdi değişkenin seviyeleri arasındaki fark tel çapı için 0,46349, yay çapı için 0,15748 ve yay adımı için 0,06789 olarak belirlenmiştir. Böylece en etkin girdi değişkeninin tel çapı olduğu belirlenmiştir.
- 2 farklı kriter ağırlıklandırma yönteminin kullanılmasıyla hesaplanan GİD'lerin her ikisi de en iyilenen deney diziliminin A3B1C3 olduğunu belirtmiştir. Belirlenen en iyilenen deney diziliminin, A2B2C2 başlangıç dizilimi ile karşılaştırması her iki kriter ağırlıklandırma yöntemine göre belirlenen GİD'ler kullanılarak ayrı ayrı yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar neticesinde belirlenmiş olan en iyilenen dizilimin doğrulanması yapılmıştır.

- A2B2C2 başlangıç diziliminin Δt , ZBİO, η ve EDVİO yanıt değişkenleri için doğrulama işlemleri de yapılmıştır.
- Girdi değişkenlerinin yanıt değişkenleri üzerindeki etki miktarları varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. Kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'nin S/N oranına göre yapılan ANOVA çalışması neticesinde, tel çapının %87,20 PCR ile en yüksek etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Tel çapını %9,81 PCR ile yay çapı ve %0,55 ile yay adımı takip etmiştir. Böylece YTITA içeren bir GIIED ünitesinin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken en önemli değişkenin tel çapı olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuç kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'lerin tepki dağılımındaki her bir girdi değişkeninin farklı seviyeleri arasındaki maksimum-minimum değerinin belirlenmesi ile de elde edilmiştir.
- Kriter ağırlıklandırmada Gri entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'nin S/N oranına göre yapılan ANOVA çalışması neticesinde, tel çapının %88,38 PCR ile en yüksek etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Tel çapını %8,85 PCR ile yay çapı ve %0,31 ile yay adımı takip etmiştir. Böylece YTITA içeren bir GIIED ünitesinin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken en önemli değişkenin tel çapı olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuç kriter ağırlıklandırmada Shannon entropi yönteminin kullanılmasıyla elde edilen GİD'lerin tepki dağılımındaki her bir girdi değişkeninin farklı seviyeleri arasındaki maksimum-minimum değerinin belirlenmesi ile de elde edilmiştir.
- Güven aralığı değerleri kullanılarak deneysel olarak bulunan Δt 'nin $150,6524 < 151 < 152,6816$ arasında, ZBİO'nun $0,55470 < 1,58278 < 2,58380$ arasında, η 'nın $\%95,3967 < \%97,7360 < \%99,7473$ arasında olduğu ve EDVİO'nun $0,73914 < 1,43858 < 3,61148$ arasında olduğu belirlenmiştir. En iyi deney dizilimine ait olan tüm sonuç parametrelerinin ölçülen ya da hesaplanan değerleri güven aralığının sınırları içerisinde bulunmuştur.
- Regresyon analizi yöntemi ile girdi değişkenleri olan tel çapı, yay çapı ve yay adımı (d, D ve p) parametrelerinin etki ettiği Δt , ZBİO, η ve EDVİO yanıt değişkenlerini tahmin etmek için regresyon bağıntıları geliştirilmiştir. Regresyon bağıntıların geliştirilmesinde çok değişkenli doğrusal regresyon analizi sonucunda çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi elde edilmiştir. Bunun yanında lineerleştirilmiş çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon analizi ile çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemi türetilmiştir. Regresyon analizinde 1. ve 9. deneyler türetilen

regresyon denklemini test etmek amacıyla ayrılmış ve regresyon analizinin geliştirilmesinde kullanılmamıştır.

- Δt , ZBİÖ, η ve EDVİÖ yanıt değişkenlerini tahmin etmek türetilen çok değişkenli doğrusal regresyon denklemlerinin p değerleri sırasıyla 0,004, 0,001, 0,043 ve 0,043 olarak bulunmuştur. Tüm regresyon denklemlerinin p değeri, anlamlılık düzeyi olan 0,05 değerinden küçük olduğu için türetilen regresyon denklemi sonuç değişkenlerini anlamlı bir şekilde yordayabilme yeteneğine sahip olduğu çıkarımında bulunulmuştur.
- Δt , ZBİÖ, η ve EDVİÖ yanıt değişkenlerini tahmin etmek türetilen lineerleştirilmiş çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemlerinin p değerleri sırasıyla 0,005, 0,005, 0,014 ve 0,014 olarak bulunmuştur. Tüm regresyon denklemlerinin p değeri, anlamlılık düzeyi olan 0,05 değerinden küçük olduğu için türetilen regresyon denklemi sonuç değişkenlerini anlamlı bir şekilde yordayabilme yeteneğine sahip olduğu çıkarımında bulunulmuştur.
- Çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi kullanılarak tahmin edilen Δt , ZBİÖ, η ve EDVİÖ yanıt değişkenlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma neticesinde Δt , ZBİÖ, η ve EDVİÖ yanıt değişkenleri için ortalama mutlak bağlı hatalar sırasıyla %2,70, %2,51, %2,74 ve %2,48 olarak belirlenmiştir.
- Çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemi kullanılarak tahmin edilen Δt , ZBİÖ, η ve EDVİÖ yanıt değişkenlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma neticesinde Δt , ZBİÖ, η ve EDVİÖ yanıt değişkenleri için ortalama mutlak bağlı hatalar sırasıyla %2,95, %2,85, %2,17 ve %2,16 olarak belirlenmiştir.
- Bağlı hataların mutlak değerleri dikkate alındığında Δt ve ZBİÖ için geliştirilen çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi, çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemine göre daha iyi tahmin yapabilmıştır. η ve EDVİÖ için geliştirilen çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemi ise çok değişkenli doğrusal regresyon denklemine göre daha iyi tahmin yapabilmıştır.
- Çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi ile tüm deney dizilimleri için yapılan tahmin değerleri üzerinden hesaplanan R^2_{adj} , MAPE ve RMSE değerleri Δt için sırasıyla 0,895, %2,700 ve 6,471; ZBİÖ için sırasıyla 0,862, %2,508 ve 0,050; η için sırasıyla 0,820, %2,737 ve 0,031 ve EDVİÖ için sırasıyla 0,873, %2,475 ve 0,038 olarak bulunmuştur.

- Çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemi ile tüm deney dizilimleri için yapılan tahmin değerleri üzerinden hesaplanan R^2_{adj} , MAPE ve RMSE değerleri Δt için sırasıyla 0,853, %2,945 ve 7,659; ZBİO için sırasıyla 0,874, %2,855 ve 0,048; η için sırasıyla 0,916, %2,171 ve 0,021 ve EDVİO için sırasıyla 0,917, %2,164 ve 0,031 olarak bulunmuştur.
- Bağıl hataların karşılaştırılmasında olduğu gibi R^2_{adj} , MAPE ve RMSE değerleri dikkate alındığında da Δt ve ZBİO için geliştirilen çok değişkenli doğrusal regresyon denklemi, çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemine göre daha iyi tahmin yapabilmıştır. η ve EDVİO için geliştirilen çok değişkenli kuvvet fonksiyonu şeklindeki regresyon denklemi ise çok değişkenli doğrusal regresyon denklemine göre daha iyi tahmin yapabilmıştır.

Yapılan bu tez çalışması ile GIİED ünitesi içerisinde YTITA kullanımının enerji depolama performansı üzerindeki olumlu etkisinin olacağı belirlenmiştir. Deneysel çalışma sayısını en aza indirmek ve tel çapı, yay çapı ve yay adımı temel girdi parametrelerinin enerji depolama performansı üzerindeki etkisini tek değişkenli sonuç parametresine indirgenmesini sağlayan Taguchi tabanlı GİA yöntemi ile optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen en iyilenen deney diziliminin başlangıç olarak seçilen farklı bir dizilim ile de doğrulandığı gözlemlenmiştir.

7.2. Öneriler

- Yapılan tez çalışmasında 580 W/m^2 değerinde tek tip yapay güneş ışıını altında deneyler yapılmıştır. Laboratuvar şartlarında farklı güneş ışıını değerleri altında çalışmalar yapılarak deneysel çalışma geliştirilebilir.
- GIİED ünitesi içerisinde 3 adet YTITA kanatçık eklenerek çalışma yapılmıştır. YTITA sayısı değiştirilerek, enerji depolama performansına olan etkisi incelenebilir.
- YTITA malzemesi değiştirilerek, kanatçık malzemesinin enerji depolama performansı üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Zamana bağlı ergime davranışının daha detaylı incelenmesi için şeffaf duvarlara sahip GIİED ünitesi tasarımı yapılabilir.
- Depolanan güneş enerjisinin geri kazanım aşamasının incelenmesi sonraki çalışmalarda ele alınabilir.

KAYNAKLAR

1. International Energy Agency, (2019). *Renewables 2019: Analysis and forecast to 2024*, IEA, Paris, 20-45.
2. Dinçer, İ. and Dost, S. (1996). A perspective on thermal energy storage systems for solar energy applications. *International Journal of Energy Research*, 20(6), 547-557.
3. Singh, P., Sharma, R. K., Ansu, A. K. and Goyal, R. (2020). Study on thermal properties of organic phase change materials for energy storage. *Materials Today: Proceedings*, 28, 2353-2357.
4. Banaszek, J., Domanski, R., Rebow, M. and El-Sagier, F. (1999). Experimental study of solid-liquid phase change in a spiral thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*, 19, 1253-1277.
5. Acır, A. and Canlı, M. E. (2018). Investigation of fin application effects on melting time in a latent thermal energy storage system with phase change material (PCM). *Applied Thermal Engineering*, 144, 1071-1080.
6. Canlı, M. E. (2017). *Güneş ışınlımı altında faz değıştiren malzemenin ısı depolama davranışının deneysel incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-13.
7. Mehta, D. S., Vaghela, B., Rathod, M. K. and Banerjee, J. (2020). Thermal performance augmentation in latent heat storage unit using spiral fin: An experimental analysis. *Journal of Energy Storage*, 31, 101776.
8. Acır, A., Canlı, M. E., Ata, İ., Uzun, S. and Tanürün, H. E. (2021). Experimental investigation of thermal energy storage efficiency using fin application with phase change material (PCM) under solar radiation. *Heat Transfer Research*, 52, 21-39.
9. Ren, Q., Meng, F. and Guo, P. (2018). A comparative study of PCM melting process in a heat pipe assisted LHTES unit enhanced with nanoparticles and metal foams by immersed boundary-Lattice Boltzmann method at pore-scale. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 1214-1228.
10. Martinelli, M., Bentivoglio, F., Soupart, A. C., Couturier, R., Fourmigue, J. F. and Marty, P. (2016). Experimental study of a phase change thermal energy storage with copper foam, *Applied Thermal Engineering*, 101, 247-261.
11. Xu, H., Wang, Y. and Han, X. (2020). Analytical considerations of thermal storage and interface evolution of a PCM with/without porous media. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 30(1), 373-400.
12. Sebti, S. S., Mastiani, M., Mirzaei, H., Dadvand, A., Kashani, S. and Hosseini, S. A. (2013). Numerical study of the melting of nano-enhanced phase change material in a square cavity. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 14(5), 307-316.

13. Motahar, S., Alemrajabi, A. A. and Khodabandeh, R. (2017). Experimental investigation on heat transfer characteristics during melting of a phase change material with dispersed TiO₂ nanoparticles in a rectangular enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 134-146.
14. Beemkumar, N., Karthikeyan, A. and Ramachandran, S. (2017). Heat transfer enhancement of the latent heat storage system using different encapsulating materials with and without fins. *International Journal of Ambient Energy*, 38(1), 77-84.
15. Amin, N. A. M., Bruno, F. and Belusko, M. (2014). Effective thermal conductivity for melting in PCM encapsulated in a sphere. *Applied Energy*, 122, 280-287.
16. Li, T., Lee, J. H., Wang, R. and Kang, Y. T. (2013). Enhancement of heat transfer for thermal energy storage application using stearic acid nanocomposite with multi-walled carbon nanotubes. *Energy*, 55, 752-761.
17. Yan, D., Ming, W., Liu, S., Yin, G., Zhang, Y., Tang, B. and Zhang, S. (2021). Polyethylene glycol (PEG)/silicon dioxide grafted aminopropyl group and carboxylic multi-walled carbon nanotubes (SAM) composite as phase change material for light-to-heat energy conversion and storage. *Journal of Energy Storage*, 36, 102428.
18. Xu, H. J. and Zhao, C. Y. (2016). Thermal efficiency analysis of the cascaded latent/cold storage with multi-stage heat engine model. *Renewable Energy*, 86, 228-237.
19. Xu, H. J. and Zhao, C. Y. (2017). Thermal performance of cascaded thermal storage with phase-change materials (PCMs). Part I: Steady cases. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 932-944.
20. Xu, H. J. and Zhao, C. Y. (2017). Thermal performance of cascaded thermal storage with phase-change materials (PCMs). Part II: Unsteady cases. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 945-957.
21. Xu, H. J. and Zhao, C. Y. (2019). Analytical considerations on optimization of cascaded heat transfer process for thermal storage system with principles of thermodynamics. *Renewable Energy*, 132, 826-845.
22. Li, D. and Yu, Z. (2021). Natural convection melting in a cubic cavity with internal fins: A Lattice Boltzmann study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100919.
23. Kamkari, B. and Shokouhmand, H. (2014). Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 78, 839-851.
24. Xu, Y., Zheng, Z. J., Yang, C. and Cai, X. (2021). Intelligent optimization of horizontal fins to improve the melting performance of phase change materials in a square cavity with isothermal vertical wall. *Journal of Energy Storage*, 44, 103334.

25. Fekadu, B. and Assaye, M. (2021). Enhancement of phase change materials melting performance in a rectangular enclosure under different inclination angle of fins. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100968.
26. Groulx, D., Biwole, P. H. and Bhourri, M. (2020). Phase change heat transfer in a rectangular enclosure as a function of inclination and fin placement. *International Journal of Thermal Sciences*, 151, 106260.
27. Sheikholeslami, M., Lohrasbi, S. and Ganji, D. D. (2016). Numerical analysis of discharging process acceleration in LHTESS by immersing innovative fin configuration using finite element method. *Applied Thermal Engineering*, 107, 154-166.
28. Wang, G., Feng, L., Altanji, M., Sharma, K., Nisar, K. S. and Khorasani, S. (2021). Proposing novel “L” shaped fin to boost the melting performance of a vertical PCM enclosure. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101465.
29. Felix Regin, A., Solanski, S. C. and Saini, J. S. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2438-2458.
30. Dinçer, İ. and Rosen, M. A. (2011). *Thermal Energy Storage Systems and Applications*. (Second edition). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 51-190.
31. Alva, G., Lin, Y. and Fang, G. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, 341-378.
32. Raam Dheep, G. and Sreekumar, A. (2014). Influence of nanomaterials on properties of latent heat solar thermal energy storage materials-A review. *Energy Conversion and Management*, 83, 133-148.
33. Öztürk, H. H. (2008). *Isı Depolama Tekniği* (Birinci baskı). Ankara: Teknik Yayınevi-Mühendislik, Mimarlık Yayınları, 42-81.
34. Alva, G., Liu, L., Huang, X. and Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 693-706.
35. Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. and Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318-345.
36. Nishad, S. and Krupa, I. (2022). Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102241.
37. Karaipekli, A. (2006). *Faz değişimli enerji depolama maddelerinde ısı iletkenliğinin zenginleştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 7-21.

38. Gök, Ö. (2010). *Increasing energy efficiency in dishwashers by using thermal energy storage in phase change materials*. PhD Thesis, Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana, 8-15.
39. Prim, E. O. (2013). *Thermal energy storage (TES) using phase change materials (PCM) for cold applications*. PhD Thesis, Universitat de Lleida Department of Computer Science and Industrial Engineering Escola Politècnica Superior, Lleida, Spain, 21-23.
40. Koşan, M. (2021). *Isıl enerji depolamalı yeni bir güneş enerjisi destekli ısı pompasının sayısal ve deneysel analizi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 26-28.
41. Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C. and Sandaran, S. C. (2015). Developments in organic solid-liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 95, 193-228.
42. Gulfam, R., Zhang, P. and Meng, Z. (2019). Advanced thermal systems driven by paraffin-based phase change materials-A review. *Applied Energy*, 238, 582-611.
43. Kanimozhi, B., Praghu, A., Anish, M. and Harish Kumar, P. K. (2014). Review on heat transfer enhancement techniques in thermal energy storage systems. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(2/1), 144-149.
44. Bose, P. and Amirtham, V. A. (2016). A review on thermal conductivity enhancement of paraffinwax as latent heat energy storage material. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 81-100.
45. Kenisarin, M. and Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1913-1965.
46. Benita, S. (2006). *Microencapsulation: Methods and industrial applications* (Second edition). New York-The USA: Taylor and Francis Group CRC Press, 1-41.
47. Sanchez, P., Sanchez-Fernandez, M. V., Romero, A., Rodriguez, J. F. and Sanchez-Silva, L. (2010). Development of thermo-regulating textiles using paraffin wax microcapsules. *Thermochimica Acta*, 498, 16-21.
48. Jamekhorshid, A., Sadrameli, S. M. and Farid, M. (2014). A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 531-542.
49. Miyazawa, K., Yajima, I., Kaneda, I. and Yanaki, T. (2000). Preparation of a new soft capsule for cosmetics. *Journal of Cosmetic Science*, 51, 239-252.
50. Uddini, M. S., Hawlader, M. N. A. and Zhu, H. J. (2001). Microencapsulation of ascorbic acid: effect of process variables on product characteristics. *Journal of Microencapsulation*, 18(2), 199-209.

51. Dubey, R., Shami, T. C. and Bhasker Rao, K. U. (2009). Microencapsulation technology and applications. *Defence Science Journal*, 59(1), 82-95.
52. Konuklu, Y., Ünal, M. and Paksoy, H. O. (2014). Microencapsulation of caprylic acid with different wall materials as phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 120, 536-542.
53. Yu, S., Wang, X. and Wu, D. (2014). Microencapsulation of n-octadecane phase change material with calcium carbonate Shell for enhancement of thermal conductivity and serving durability: Synthesis, microstructure and performance evaluation. *Applied Energy*, 114, 632-643.
54. Alkan, C., Sarı, A., Karaipekli, A. and Uzun, O. (2009). Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93, 143-147.
55. Cardenas, B. and Leon, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design consideration and performance enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 724-737.
56. Mesalhy, O., Lafdi, K., Elgafy, A. and Bowman, K. (2005). Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix. *Energy Conversion and Management*, 46, 847-867.
57. Pincemin, S., Olives, R., Py, X. and Christ, M. (2008). Highly conductive composites made of phase change materials and graphite for thermal storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(6), 603-613.
58. Almsater, S., Saman, W. and Bruno, F. (2016). Performance enhancement of high temperature latent heat thermal storage systems using heat pipes with and without fins for concentrating solar thermal power plants. *Renewable Energy*, 89, 36-50.
59. Tardy, F. and Sami, S. M. (2009). Thermal analysis of heat pipes during thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 29(2-3), 329-333.
60. Liu, L., Su, D., Tang, Y. and Fang, G. (2016). Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 305-317.
61. Tian, L. L., Liu, X., Chen, S. and Shen, Z. G. (2020). Effect of fin material on PCM melting in a rectangular enclosure. *Applied Thermal Engineering*, 167, 114764.
62. Ali, H. M. (2021). Analysis of heat pipe-aided graphene-oxide based nanoparticle-enhanced phase change material heat sink for passive cooling of electronic components. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 146, 277-286.
63. Aqib, M., Hussain, A., Ali, H. M., Naseer, A. and Jamil, F. (2020). Experimental case studies of the effect of Al₂O₃ and MWCNTs nanoparticles on heating and cooling of PCM. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100753.

64. Gong, Z. X., Devahastin, S. and Mujumdar, A. S. (1999). Enhanced heat transfer in free convection-dominated melting in a rectangular cavity with an isothermal vertical wall. *Applied Thermal Engineering*, 19, 1237-1251.
65. Shatikian, V. (2004). *Melting and solidification of a phase-change material with internal fins*. MSc Thesis, Ben-Gurion University of The Negev Natural and Applied Sciences Institute, Israel, 3-47.
66. Vadwala, P. H. (2011). *Thermal energy storage in copper foams filled with paraffin wax*. MSc Thesis, University of Toronto Mechanical and Industrial Engineering Department, Canada, 9-61.
67. Bouadila, S., Fteiti, M., Oueslati, M. M., Guizani, A. and Farhat, A. (2014). Enhancement of latent heat storage in a rectangular cavity: Solar water heater case study. *Energy Conversion and Management*, 78, 904-912.
68. Kousksou, T., Mahdaoui, M., Ahmed, A. and Ait Msaad, A. (2014). Melting over a wavy surface in a rectangular cavity heated from below. *Energy*, 64, 212-219
69. Ebrahimi, A. and Dadvand, A. (2015). Simulation of melting of a nano-enhanced phase change material (NePCM) in a square cavity with two heat source-sink pairs. *Alexandria Engineering Journal*, 1003-1017.
70. Rabinataj Darzi, A. A., Hassanzadeh Afrouzi, H., Khaki, M. and Abbasi, M. (2015). Unconstrained melting and solidification inside rectangular enclosure. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 7(3), 436-451.
71. Yatağanbaba, A. (2013). *Tuz hidrat ve parafinlerin gözenekli ortamlarda ısı depolama davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, 13-34.
72. Zennouhi, H., Benomar, W., Kousksou, T., Ait Msaad, A., Allouhi, A., Mahdaoui, M. and El Rhafiki, T. (2017). Effect of inclination angle on the melting process of phase change material. *Case Studies in Thermal Engineering*, 9, 47-54.
73. Joneidi, M. H., Hosseini, M. J., Ranjbar, A. A. and Bahrampoury, R. (2017). Experimental investigation of phase change in a cavity for varying heat flux and inclination angles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 594-607.
74. Kamkari, B. and Groulx, D. (2018). Experimental investigation of melting behaviour of phase change material in finned rectangular enclosures under different inclination angles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 97, 94-108.
75. Wang, Y., Dai, J. and An, D. (2018). Numerical investigations on melting behavior of phase change material in a rectangular cavity at different inclination angles. *Applied Sciences*, 8, 1627.

76. Bouhal, T., Meghari, Z., Fertahi, S. D., El Rhafiki, T., Kousksou, T., Jamil, A. and Ben Ghoulam E. (2018). Parametric CFD analysis and impact of PCM intrinsic parameters on melting process inside enclosure integrating fins: Solar building applications. *Journal of Building Engineering*, 20, 634-646.
77. Fadi, M. and Eames, P. C. (2019). An experimental investigation of the melting of RT44HC inside a horizontal rectangular test cell subject to uniform wall heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 731-742.
78. Yadav, A. and Samir, S. (2019). Experimental and numerical investigation of spatiotemporal characteristics of thermal energy storage system in a rectangular enclosure. *Journal of Energy Storage*, 21, 405-417.
79. Karami, R. and Kamkari, B. (2019). Investigation of the effect of inclination angle on the melting enhancement of phase change material in finned latent heat thermal storage units. *Applied Thermal Engineering*, 146, 45-60.
80. Abdi, A., Martin, V. and Chiu, J. N. W. (2019). Numerical investigation of melting in a cavity with vertically oriented fins. *Applied Energy*, 235, 1027-1040.
81. Sathe, T. and Dhoble, A. S. (2020). Experimental investigations of phase change material filled rectangular enclosure with inclined top and side heating mode. *Journal of Energy Storage*, 32, 101799.
82. Chen, S. B., Saleem, S., Alghamdi, M. N., Nisar, K. S., Arsalanloo, A., Issakhov, A. and Xia, W. F. (2021). Combined effect of using porous media and nano-particle on melting performance of PCM filled enclosure with triangular double fins. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100939.
83. Oliveski, R. D. C., Becker, F., Rocha, L. A. O., Biserni, C. and Eberhardt, G. E. S. (2021). Design of fin structures for phase change material (PCM) melting process in rectangular cavities. *Journal of Energy Storage*, 35, 102337.
84. Abdi, A., Shahrooz, M., Chiu, J. N. W. and Martin, V. (2021). Experimental investigation of solidification and melting in a vertically finned cavity. *Applied Thermal Engineering*, 198, 117459.
85. Sinaga, N., Moria, H., Nisar, K. S., Vu, C. M., Heidarshenas, B., Arsalanloo, A. and Youshanlouei, M. M. (2021). Melting performance enhancement of thermal storage system by utilizing shape and position of double fin. *Case Studies in Thermal Engineering*, 23, 100813.
86. Huang, B., Tina, L. L., Yu, Q. H., Liu, X. and Shen, Z. G. (2021). Numerical analysis of melting process in a rectangular enclosure with different fin locations. *Energies*, 14, 4091.
87. Shafiq, M. S., Khan, M. M. and Irfan, M. (2021). Performance enhancement of double-wall-heated rectangular latent thermal energy storage unit through effective design of fins. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101339.

88. Kim, S. H., Pandey, S., Park, S. H. and Ha, M. Y. (2022). A numerical investigation of the effect of fin inclination angle on the thermal energy storage performance of a phase change material in a rectangular latent heat thermal energy storage unit. *Journal of Energy Storage*, 47, 103957.
89. Qin, Z., Low, Z. H., Ji, C. and Duan, F. (2022). Efficacy of angled metallic fins for enhancing phase change material melting. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 132, 105921.
90. Zhao, C., Wang, J., Sun, Y., He, S. and Hooman, K. (2022). Fin design optimization to enhance PCM melting rate inside a rectangular enclosure. *Applied Energy*, 321, 119368.
91. Javidan, M., Asgari, M., Gholinia, M., Nozari, M., Asgari, A. and Ganji, D. D. (2022). Investigation of convection and radiation heat transfer of paraffinic materials and storage of thermal energy in melting process of PCMs in the cavity with transparent inner walls. *Energy Reports*, 8, 5522-5532.
92. Masoumpour-Samakoush, M., Miansari, M., Ajarostaghi, S. S. M. and Arıcı, M. (2022). Impact of innovative fin combination of triangular and rectangular fins on melting process of phase change material in a cavity. *Journal of Energy Storage*, 45, 103545.
93. Oliveski, R. D. C., Filho, A. Q. T. and Schröer, I. A. (2022). Melting and solidification in a thermal storage: Influence of fin aspect ration and positioning in a full charging and discharging cycle. *Journal of Energy Storage*, 50, 104303.
94. Laouer, A., Teggat, M., Tunçbilek, E., Arıcı, M., Hachani, L. And Ismail, K. A. R. (2022). Melting of hybrid nano-enhanced phase change material in an inclined finned rectangular cavity for cold energy storage. *Journal of Energy Storage*, 50, 104185.
95. Sharifi, N., Berman, T. L. and Faghri, A. (2011). Enhancement of PCM melting in enclosures with horizontally-finned internal surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4182-4192.
96. Biwole, P. H., Groulx, D., Souayfane, F. and Chiu, T. (2018). Influence of fin size and distribution on solid-liquid phase change in a rectangular enclosure. *International Journal of Thermal Sciences*, 124, 433-446.
97. Moran, J., Granada, E., Miguez, J. L. and Porteiro, J. (2006). Use of grey relational analysis to assess and optimize small biomass boilers. *Fuel Processing Technology*, 87(2), 123-127.
98. Manivannan, S., Devi, S. P., Arumugam, R. and Sudharsan, N. M. (2011). Multi-objective optimization of flat plate heat sink using Taguchi-based Grey relational analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52, 739-749.
99. Sreenivasulu, R. and SrinivasaRao, Ch. (2012). Application of gray relational analysis for surface roughness and roundness error in drilling of Al 6061 alloy. *International Journal of Lean Thinking*, 3(2), 67-78.

100. Kumbhar, D. G. and Sane, N. K. (2015). Numerical analysis and optimization of heat transfer and friction factor in dimpled tube assisted with regularly spaced twisted tapes using Taguchi and grey relational analysis. *Procedia Engineering*, 127, 652-659.
101. Acir, A., Canlı, M. E., Ata, İ. and Çakıroğlu, R. (2017). Parametric optimization of energy and exergy analyses of a novel solar air heater with grey relational analysis. *Applied Thermal Engineering*, 122, 330-338.
102. Seo, J. H., Garud, K. S. and Lee, M. Y. (2021). Grey relational based Taguchi analysis on thermal and electrical performances of thermoelectric generator system with inclined fins hot heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 184, 116279.
103. Wu, C. B., Yang, Y. F., Zhu, S. X., Ren, X. L. and Zhao, F. T. (2010). Grey relational analysis between particle size distribution of power storage porous ceramsite and thermal conductivity of PCM gypsum board. *In Advanced Materials Research*, 158, 130-139.
104. Hu, X., Banks, J., Guo, Y., Huang, G. and Liu, W. V. (2021). Effects of temperature-dependent property variations on the output capacity prediction of a deep coaxial borehole heat exchanger. *Renewable Energy*, 165, 334-349.
105. Kazemian, A., Parcheforosh, A., Salari, A. and Ma, T. (2021). Optimization of a novel photovoltaic thermal module in series with a solar collector using Taguchi based grey relational analysis. *Solar Energy*, 215, 492-507.
106. Wang, Z., Chen, X. and Liu, Z. (2022). Comparative study on heat transfer characteristics of molten PCM in PV/PCM air-based system on grey relation analyses. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, (In Press).
107. Tiwari, S. and Sharma, P. (2021). Optimization based methodology to design metal hydride reactor for thermal storage application. *Journal of Energy Storage*, 41, 102845.
108. Dwivedi, A., Kumar, A. and Goel, V. (2022). Selection of nanoparticles for battery thermal management system using integrated multiple criteria decision-making approach. *International Journal of Energy Research*, (In Press).
109. Çinici, O. K., Canlı, M. E., Çakıroğlu, R. and Acir, A. (2022). Optimization of melting time of solar thermal energy storage unit containing spring type heat transfer enhancer by Taguchi based grey relational analysis. *Journal of Energy Storage*, 47, 103671.
110. Zhang, W., Li, X., Wu, W. and Huang, J. (2022). Influence of mechanical vibration on composite phase change material based thermal management system for lithium-ion battery. *Journal of Energy Storage*, 54, 105237.
111. Garg, H. P., Shukla, A. R., Madhuri, I., Agnihotri, R. C. and Chakraverty, S. (1985). Development of a simple low-cost solar simulator for indoor collector testing. *Applied Energy*, 21, 43-54.
112. Codd, D. S., Carlson, A., Rees, J. and Slocum, A. H. (2010). A low cost high flux solar simulator. *Solar Energy*, 84, 2202-2212.

113. Akçaoğlu, E., Arıcı, M. ve Ögüt, E. B. (2012). Bölmeli bir kare kapalı ortam içindeki nanoakışkanın doğal konveksiyonla ısı transferinin sayısal olarak incelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(5), 359-366.
114. İnternet: Köpük Strafor. Strafor Teknik Özellikleri. URL: <https://kopukstrafor.com/strafor-teknik-ozellikleri>, Son Erişim Tarihi: 29.12.2022.
115. İnternet: AGS Parafin. P-1/S Teknik Özellikleri. URL: <https://www.ags.com.tr/urunlerimiz/>, Son Erişim Tarihi: 29.12.2022.
116. İnternet: Rubithermal Technologies GmbH, RT-50 Technical Specification Data Sheet. RT Line Product List. URL: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT50_EN_09102020.PDF, Son Erişim Tarihi: 29.12.2022.
117. Shokouhmand, H. and Kamkari, B. (2013). Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 50, 201-212.
118. Rudonja, N. R., Komatina, M. S., Zivkovic, G. S. and Antonijevic, D. L. (2016). Heat transfer enhancement through PCM thermal storage by use of copper fins. *Thermal Science*, 20(1), 251-259.
119. Akhilesh, R., Narasimhan, A. and Balaji, C. (2005). Method to improve geometry for heat transfer enhancement in PCM composite heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 2759-2770.
120. Atkin, P. and Farid, M. M. (2015). Improving the efficiency of photovoltaic celss using PCM infused graphite and aluminium fins. *Solar Energy*, 114, 217-228.
121. Acır, A., Canlı, M. E., Ata, İ., Uzun, S. and Tanürün, H. E. (2021). Experimental investigation of thermal energy storage efficiency using fin application with phase change material (PCM) under solar radiation. *Heat Transfer Research*, 52(6), 21-39.
122. Holman, J.P. (2010). *Heat Transfer* (Tenth edition). New York, The USA: McGraw Hill Higher Education Company Inc., 348–349.
123. Arshad, A., Ali, H. M., Ali, M. and Manzoor, S. (2017). Thermal performance of phase change material (PCM) based pin-finned heat sinks for electronics devices: Effect of pin thickness and PCM volume fraction. *Applied Thermal Engineering*, 112, 143-155.
124. Kline, S. J. and McClintock, F. A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75(1), 3-8.
125. Moffat, R. J. (1988). Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1, 3-17.
126. Holman, J. P. (2012). *Experimental Methods for Engineers* (Eight edition). New York, The USA: McGraw Hill Higher Education Company Inc., 61-65.

127. Genceli, O. F. (2012). *Ölçme Tekniği (Boyut, Basınç, Akış ve Sıcaklık Ölçümleri)* (Beşinci baskı). İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 21-23.
128. EA-4/02. (2022). Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration. European Accreditation, Rev. 03.
129. Ata, İ. (2017). *Güneş enerjisi destekli hava ısıtıcısı performansının deneysel incelenmesi ve gri ilişkisel analiz yöntemi ile optimizasyonu*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 120-123.
130. Dağdeviren, A., Acar, B. and Aydın, M. (2021). Alternative heat insulation method for rigid construction walls. *International Journal of Energy Studies*, 6(1), 19-35.
131. Dadkhahipour, K. (2014). *A study of the material removal process in abrasive waterjet milling of amorphous materials*. PhD Thesis, The University of New South Wales, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, South Wales, The UK, 333-346.
132. Ashby, D. Z. (2019). *Titanium-based microreactors for water purification*. PhD Thesis. University of California Riverside. Mechanical Engineering, 31-39.
133. Gupta, M. K. and Sood, P. K. (2015). Optimization of machining parameters for turning AISI 4340 steel using Taguchi based grey relational analysis. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 22, 679-685.
134. Altaş, E. (2021). *Şekil hafızalı NiTi alaşımın kriyojenik işlem uygulanmış takımlarla işlenebilirliği*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 79- 91.
135. Sarpkaya, Ç. (2014). *Taguchi metoduna dayalı gri ilişkiler analizi ile haşıl prosesinin optimizasyonu*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 46-59.
136. Senthilkumar, N., Tamizharasan, T. and Anandakrishnan, V. (2014). Experimental investigation and performance analysis of cemented carbide inserts of different geometries using Taguchi based grey relational analysis. *Measurement*, 58, 520-536.
137. Kuram, E. and Özçelik, B. (2013). Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill. *Measurement*, 46, 1849-1864.
138. Yavuz, M. (2017). *Delme işlemlerinde takım geometrisinin etkilerinin deneysel ve teorik olarak araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 67-72.
139. Ojo, O. O. (2016). *2219 Alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantılarının özellikleri ve deneysel tasarım ile optimizasyonu*. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 75-93.

140. Kuram, E. (2015). *Yumuşak ve sert malzemelerin mikro frezelenmesinde işleme şartlarının optimizasyonu*. Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 50-201.
141. Montgomery, D. C. (2013). *Design and Analysis of Experiments* (Eighth edition). Denver, The USA: John Wiley & Sons Inc., 40-60.
142. Liu, S., Forrest, J. and Yang, Y. (2012). A brief introduction to grey systems theory. *Grey Systems: Theory and Applications*, 2(2), 89-104.
143. Feng, C. M. and Wang, R. T. (2000). Performance evaluation for airlines including the consideration of financial ratios. *Journal of Air Transport Management*, 6, 133-142.
144. Turgut, E., Çakmak, G. and Yıldız, C. (2012). Optimization of the concentric heat exchanger with injector turbulators by Taguchi method. *Energy Conversion and Management*, 53, 268-275.
145. Baş, M. (2010). *İşletmelerde finansal başarısızlığın öngörülmesinde gri ilişkisel analiz tekniği: Tekstil ve deri sektöründe bir uygulama*. Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kütahya, 58-81.
146. Tzeng, G. H. and Tsauro, S. H. (1994). The multiple criteria evaluation of grey relation model. *The Journal of Grey Systems*, 6(3), 87-108.
147. Ersoy, N. (2021). *Bütünleşik çok kriterli karar verme modeli ile enerji sektöründe kurumsal sürdürülebilirlik performans ölçümü: Karşılaştırmalı bir analiz*. Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Muğla, 113-115.
148. Wang, Y. M. and Luo, Y. (2010). Integration of correlations with standard deviations for determining attribute weights in multiple attribute decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 51, 1-12.
149. Zardari, N. H., Ahmed, K., Shirazi, S. M. and Yusop, Z. B. (2015). Chapter 2 Literature review *Weighting methods and their effects on multi-criteria decision making model outcomes in water resources management* (First Edition), The USA: Springer Press, 23-37.
150. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27, 379-423, 623-656.
151. Zhang, X., Wang, C., Li, E. and Xu, C. (2014). Assessment model of ecoenvironmental vulnerability based on improved entropy weight method. *The Scientific World Journal*, 797814, 1-7.
152. Zhang, H., Gu, C. I., Gu, L. W. and Zhang, Y. (2011). The evaluation of tourism destination competitiveness by TOPSIS & information entropy-A case in the Yangtze River Delta of China. *Tourism Management*, 32, 443-451.
153. Nijkamp, P. (1977). Stochastic quantitative and qualitative multicriteria analysis for environmental design. *Paper of the Regional Science Association*, 39(1), 174-199.

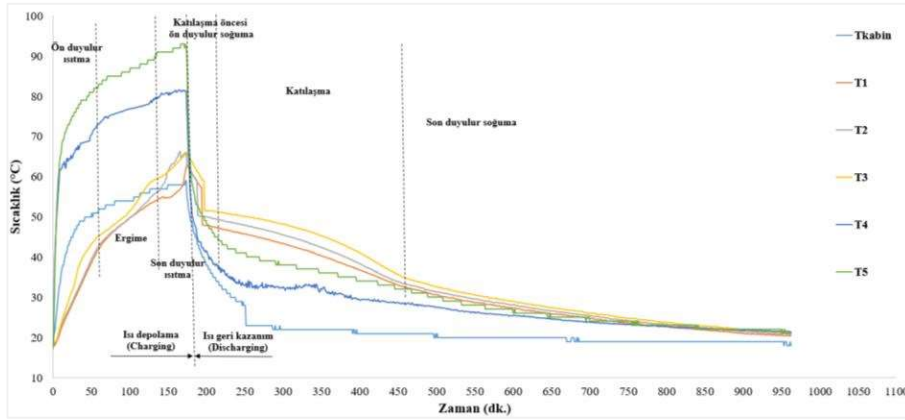
154. Çakır, S. (2015). *Bütünleşik bulanık Shannon entropi-bulanık veri zarflama analizi yöntemiyle teknoloji firmalarında etkinlik ölçümü*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Trabzon, 56-58.
155. Wen, K. L., Chang, T. C. and You, M. L. (1998). The grey entropy and its application in weighting analysis. SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2, 1842-1844.
156. Rao, R. and Yadava, V. (2009). Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of thin superalloy sheet using grey relational analysis with entropy measurement. *Optics and Laser Technology*, 41, 922-930.
157. Kuo, C. F. J., Su, T. L., Jhang, P. R., Huang, C. Y. and Chiu, C. H. (2011). Using the Taguchi method and grey relational analysis to optimize the flat-plate collector process with multiple quality characteristics in solar energy collector manufacturing. *Energy*, 36, 3554-3562.
158. Çelik, M. (2021). *Elektro-erozyon yöntemiyle işlenmiş Ti6Al4V alaşımının yüzey kalitesinin manyetik aşındırıcılarla işleme yöntemiyle iyileştirilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 80-82.
159. Özay, Ç. (2009). *Teğetsel tornalama-frezeleme yönteminde işleme parametrelerinin teorik ve deneysel olarak araştırılması*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 62-66.
160. Ross, P. J. (1988). *Taguchi Techniques for Quality Engineering* (First edition). New York, The USA: McGraw-Hill Book Company, 1-278.
161. Çakıroğlu, R. and Acır, A. (2013). Optimization of cutting parameters on drill bit temperature in drilling by Taguchi method. *Measurement*, 46, 3525-3531.
162. Phadke, M. S. (1989). Quality Engineering using Design of Experiments. In: Dehnad, K. (eds). *Quality Control, Robust Design and The Taguchi Method*. Boston, The USA: Springer, 31-32.
163. Demirutku, K., Okay, N. C., Yaman, A., Kıvanç, F. E., Muratoğlu, B. ve Yeniçeri, Z. (2005). *İstatistiksel Formüller ve Tablolar* (1. baskı). Ankara: Başkent Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimleri Fakültesi, Eleştirel-Yaratıcı Düşünme ve Davranış Araştırmaları Laboratuvarı, 42-43.
164. Kuo, C. F. J. and Su, T. L. (2006). Optimization of multiple quality characteristics for polyether ether ketone injection molding process. *Fibers and Polymers*, 7(4), 404-413.
165. Dvivedi, A. and Kumar, P. (2007). Surface quality evaluation in ultrasonic drilling through the Taguchi technique. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 34, 131-140.
166. Kıvrak, T. (2014). Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 50, 19-28.

167. Akıncıoğlu, S., Gökkaya, H. and Uygur, İ. (2016). The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of Hastelloy C22 based on Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 82, 303-314.
168. Kuş, A ve Motorcu, A. R. (2017). Nikel esaslı waspaloy alaşımasının tel erozyon yöntemiyle işlenmesinde Taguchi metodu ile yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme parametrelerinin tahmini. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1), 195-204.
169. Gamgam, H. ve Altunkaynak, B. (2021). *SPSS Uygulamalı Regresyon Analizi: Lojistik Regresyon-Eğri Uydurma-Tahmin* (3. baskı). Ankara: Seçkin-Fen Bilimleri Yayıncılık, 152-168.
170. Meral, G., Dilipak, H. ve Sarıkaya, M. (2011). AISI 1050 malzemenin delinmesinde delme parametrelerinin delik kalitesi üzerindeki etkisinin çoklu regresyon metoduyla modellenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 37-46.
171. Bae, K. Y., Jang, H. S., Jung, B. C. and Sung, D. K. (2019). Effect of prediction error of machine learning schemes on photovoltaic power trading based on energy storage systems. *Energies*, 12, 1249.
172. Tabachnick, B. G. and Fidell, L. S. (2015). *Çok Değişkenli İstatistiklerin Kullanımı* (Altıncı Baskıdan çeviri). (Çev. Ed. Mustafa Baloğlu). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti. 60-181.
173. Internet: Methods and Formulas for Goodness of Fit Statistics in Analyze Factorial in Minitab 21. URL: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/factorial/analyze-factorial-design/methods-and-formulas/goodness-of-fit-statistics/#r-sq-adj>, Son Erişim Tarihi: 02.11.2022.
174. Montgomery, D. C. and Runger, G. C. (2019). *Mühendisler için Uygulamalı İstatistik ve Olasılık* (Altıncı baskıdan çeviri). (Çev. Mehmet Terziler, Tahsin Öner, Esra Dalan Yıldırım ve Şule Ayara Özbal). Ankara: Palme Yayınevi. (Eserin orijinali 2014’de yayımlandı). 116-121.
175. Baby, R. and Balaji, C. (2012). Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 1642-1649.
176. Zwawi, M. (2022). Incorporation of nanomaterial for the thermal management of the solidification process in mechanical storage. *Journal of Taibah University for Science*, 16(1), 1065-1074.
177. Pekşen, H. (2020). *AISI 430 paslanmaz çeliğinin işlenebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 59-65.

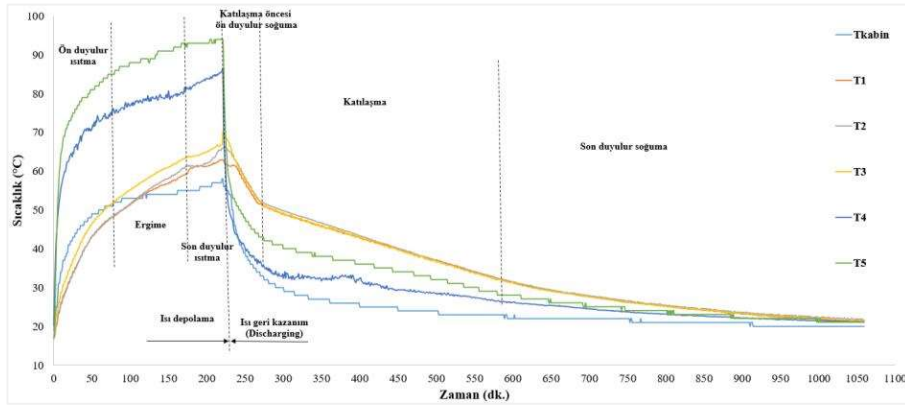
178. Kayı, Y. (2006). *Plastik enjeksiyon prosesindeki parametrelerin çekme problemine etkilerinin Taguchi metodu ile incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 59-60.
179. Kaya, A. (2018). Veri analizinde normal dağılış testlerinin etkinlikleri. *Selçuk Üniversitesi Akşehir Meslek Yüksekokulu Sosyal Bilimler Dergisi*, 2(9), 85-92.
180. Berry, W. D. and Feldman, S. (1985). *Mutliple regression in practice* (First edition). Newburry Park, California, The USA: Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences.
181. Allison, P. D. (1999). *Multiple Regression: A Primer* (First edition). The USA: The Pine Forges Press series in research methods and statistics.
182. Kurnia, J. C., Haryoko, L. A. F., Taufiqurrahman, I., Chen, L., Jinag, L. and Sasmito, A. P. (2022). Optimization of an innovative hybrid thermal energy storage with phase change material (PCM) Wall insulator utilizing Taguchi method. *Journal of Energy Storage*, 49, 104067.

EKLER

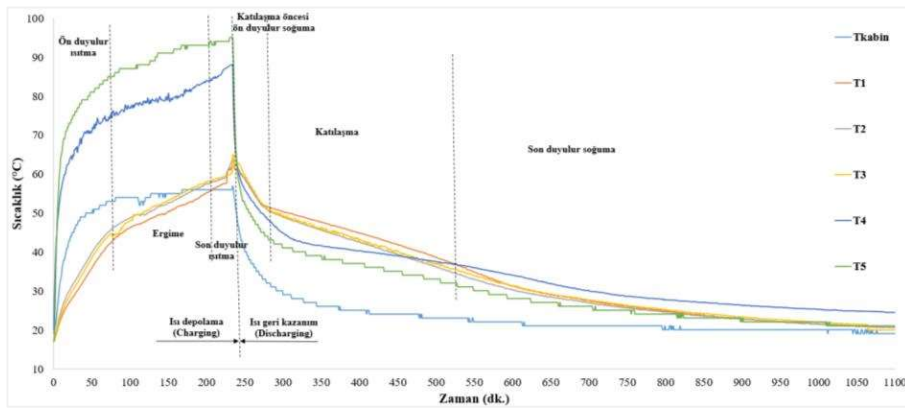
EK-1. Taguchi'ye göre yapılan deneylerin zamana bağlı sıcaklık dağılımları



Şekil 1.1. 1. deney zamana bağlı sıcaklık dağılımı

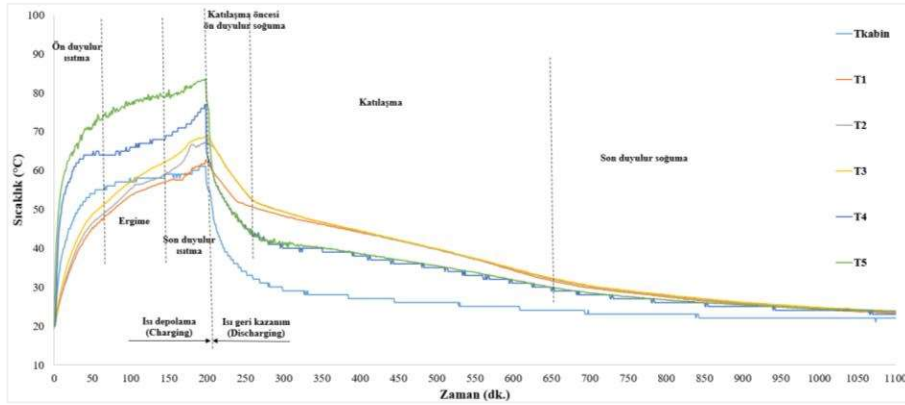


Şekil 1.2. 2. deney zamana bağlı sıcaklık dağılımı

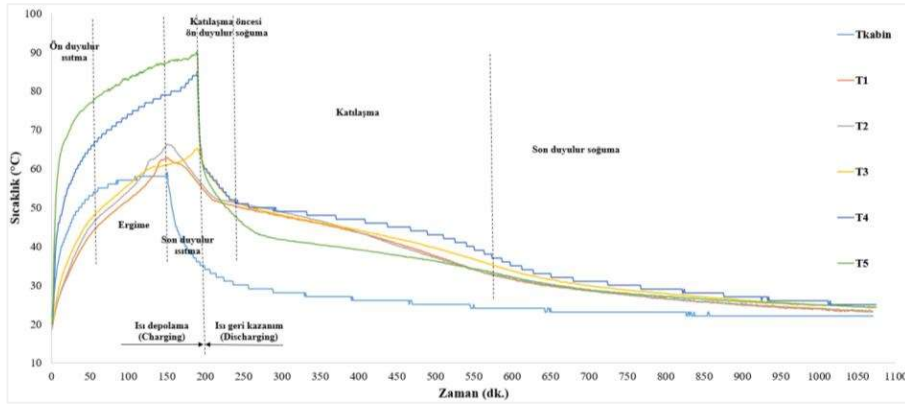


Şekil 1.3. 3. deney zamana bağlı sıcaklık dağılımı

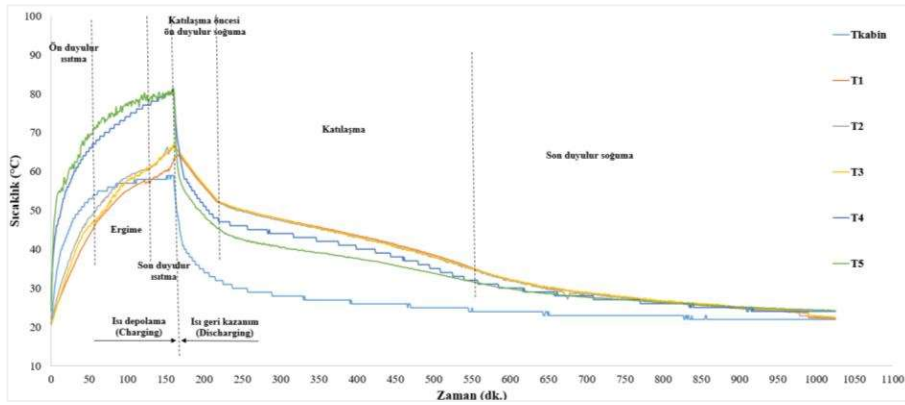
EK-1. (devam) Taguchi'ye göre yapılan deneylerin zamana bağlı sıcaklık dağılımları



Şekil 1.4. 4. deney zamana bağlı sıcaklık dağılımı

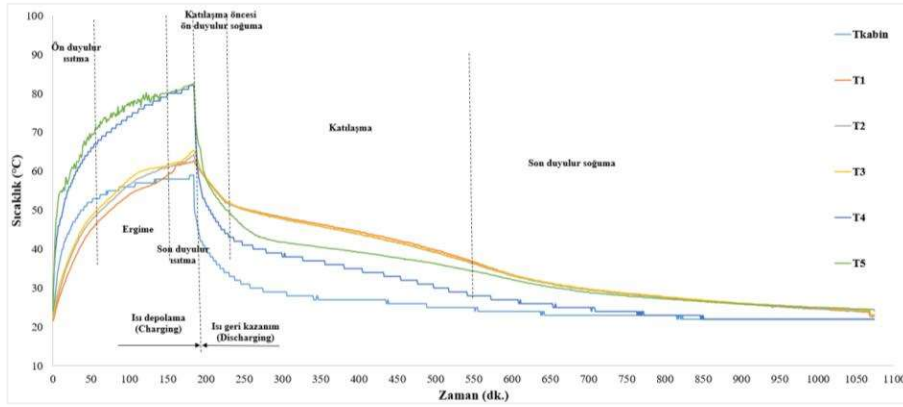


Şekil 1.5. 5. deney zamana bağlı sıcaklık dağılımı

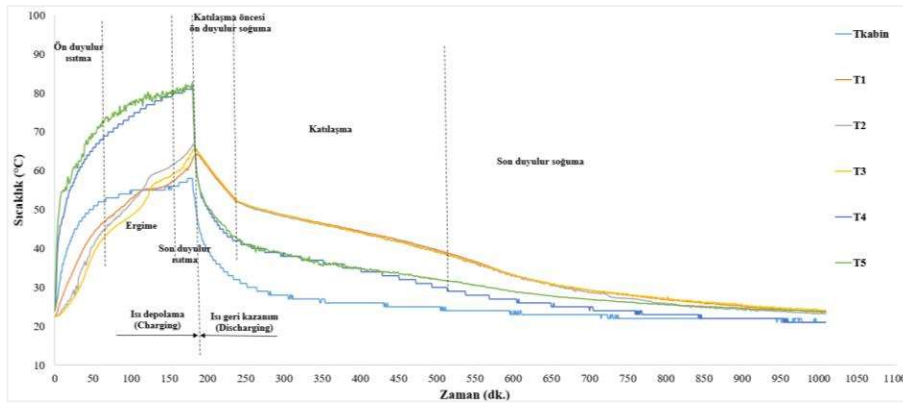


Şekil 1.6. 6. deney zamana bağlı sıcaklık dağılımı

EK-1. (devam) Taguchi'ye göre yapılan deneylerin zamana bağlı sıcaklık dağılımları



Şekil 1.7. 8. deney zamana bağlı sıcaklık dağılımı



Şekil 1.8. 9. deney zamana bağlı sıcaklık dağılımı



Gazili olmak ayrıcalıktır