



**HİBRİD REAKTÖR NÜKLEER YAKIT ÇUBUKLARINDAKİ SICAKLIK
DAĞILIMININ SONLU ELEMANLAR METODU İLE SAYISAL ANALİZİ**

Süleyman TAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2017

Süleyman TAŞ tarafından hazırlanan “HİBRİD REAKTÖR NÜKLEER YAKIT ÇUBUKLARINDAKİ SICAKLIK DAĞILIMININ SONLU ELEMANLAR METODU İLE SAYISAL ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Adem ACIR

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

Makine Mühendisliği, Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Kurtuluş BORAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 14/06/2017

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

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Süleyman TAŞ
14/06/2017

HİBRİD REAKTÖR NÜKLEER YAKIT ÇUBUKLARINDAKİ SICAKLIK DAĞILIMININ SONLU ELEMANLAR METODU İLE SAYISAL ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Süleyman TAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2017

ÖZET

Bu çalışmada, bir füzyon-fisyon hibrid reaktöründe LWR harcanmış nükleer yakıtı içeren nükleer yakıt çubuklarındaki sıcaklık dağılımı sonlu elemanlar metodu yardımıyla farklı soğutucular ve nötron duvar yükleri için analiz edilmiştir. Hesaplamalarda 2 MW/m^2 , 4 MW/m^2 , 6 MW/m^2 , 8 MW/m^2 , 10 MW/m^2 nötron duvar yükleri ve Doğal Lityum, Flinabe, $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucuları kullanılmıştır. İlk olarak SCALE5 kodu ile nötronik hesaplamalar yapılmış ve elde edilen fisyon değerlerine bağlı olarak ısı üretim oranları hesaplanmıştır. Daha sonra yakıt bölgesinde dizili olan 1. sıra, 5. sıra ve 10. sırada yer alan yakıt çubuklarının sonlu elemanlar metodu yardımıyla sıcaklık dağılımları ANSYS paket programında analiz edilmiştir. Farklı nötron duvar yükleri ve soğutucularda elde edilen sıcaklık değeri nükleer yakıt ergime sıcaklığı referans sınırlarına göre zamana bağlı olarak karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 92805

Anahtar Kelimeler : LWR harcanmış yakıtı, füzyon, fisyon, ANSYS, lityum, uranyum, SCALE5

Sayfa Adedi : 80

Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

NUMERICAL ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN HYBRID REACTOR NUCLEAR FUEL RODS BY FINITE ELEMENTS METHOD

(M. Sc. Thesis)

Süleyman TAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2017

ABSTRACT

In this study, temperature distribution of nuclear fuel rods in a fusion fission hybrid reactor containing LWR spent fuel was analyzed by finite elements method for different coolants and first wall neutron loads. In calculations, 2 MW/m², 4 MW/m², 6 MW/m², 8 MW/m², 10 MW/m² first wall neutron loads and Natural Lithium, Flinabe, Li₂₀Sn₈₀ coolants were used. Firstly, neutronic calculations were conducted by SCALE5 and heat generation rates were calculated using obtained fission rates. Afterwards, temperature distribution of fuel rods of 1. row, 5. row, and 10. row in fuel region was analyzed by finite elements method using ANSYS application. Obtained temperature distribution rates for different first wall loads and coolants were compared over time in terms of reference fuel melting point.

Science Code : 92805

Key Words : LWR spent fuel, fusion, fission, ANSYS, lithium, uranium, SCALE5

Page Number : 80

Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım danışmanım Prof. Dr. Adem ACIR' a, manevi destekleriyle beni hiç bir zaman yalnız bırakmayan çok değerli aileme, çalışmalarımın her safhasında katkılarını esirgemediği için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
3. HİBRİD REAKTÖR.....	11
3.1. Tanım.....	11
3.2. Reaktör Geometrisi.....	11
4. TEORİK ANALİZ.....	13
4.1. Nümerik Analiz.....	13
4.2. Isı Üretim Oranının Hesaplanması.....	14
4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Yakıt Sıcaklık Dağılımının Hesaplanması.....	14
4.4. Hesaplamalarda Kullanılan Sınır Şartları.....	17
5. NÖTRONİK-TERMAL SONUÇLAR.....	19
5.1. Nötronik Sonuçlar.....	19
5.1.1. Fisyon değerleri.....	19
5.2. Isı Üretimi.....	29
5.3. Yakıt Çubuklarında Sıcaklık Dağılımlarının Analizi.....	39
5.3.1. Doğal Lityum soğutucu için sıcaklık dağılımı sonuçları.....	40
5.3.2. Flinabe soğutucu için sıcaklık dağılımı sonuçları.....	50
5.3.3. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu için sıcaklık dağılımı sonuçları.....	61
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
6.1. Sonuç.....	71

	Sayfa
6.2. Öneriler.....	74
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Nötronik hesaplamalarda kullanılan atomik yoğunluklar.....	13
Çizelge 4.2. Nötron yüklerine göre nötron akı değerleri	14
Çizelge 6.1. Maksimum sıcaklık değerleri	72

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Hibrid Reaktör yapısının genel görünümü	12
Şekil 4.1. Silindirik yakıt çubuğu koordinatlarının genel gösterimi	16
Şekil 4.2. Uranyum elementinin ısı iletim katsayısı-sıcaklık değişim grafiği	17
Şekil 4.3. Yakıt çubuğunun SOLIDWORKS modeli	18
Şekil 4.4. ANSYS ortamında yakıt çubuğunun hücrelere bölünmüş görünümü	18
Şekil 5.1. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen fisyon değerleri.....	20
Şekil 5.2. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen fisyon değerleri.....	21
Şekil 5.3. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen fisyon değerleri.....	22
Şekil 5.4. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen fisyon değerleri.....	23
Şekil 5.5. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen fisyon değerleri.....	24
Şekil 5.6. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen fisyon değerleri.....	25
Şekil 5.7. $Li_{20}Sn_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen fisyon değerleri.....	26
Şekil 5.8. $Li_{20}Sn_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen fisyon değerleri.....	27
Şekil 5.9. $Li_{20}Sn_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen fisyon değerleri.....	28
Şekil 5.10. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen ısı değerleri.....	30
Şekil 5.11. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen ısı değerleri.....	31
Şekil 5.12. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen ısı değerleri.....	32
Şekil 5.13. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen ısı değerleri.....	33
Şekil 5.14. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen ısı değerleri.....	34

Şekil	Sayfa
Şekil 5.15. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen ısı değerleri.....	35
Şekil 5.16. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen ısı değerleri.....	36
Şekil 5.17. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen ısı değerleri.....	37
Şekil 5.18. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen ısı değerleri.....	38
Şekil 5.19. 1077 W/cm^3 ısı üretimi ve 600°C zırh sıcaklığında Doğal Lityum soğutucu için sıcaklık dağılımı.....	40
Şekil 5.20. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 600°C ' de sıra#1'de sıcaklık dağılımı.....	41
Şekil 5.21. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 400°C ' de sıra#1'de sıcaklık dağılımı.....	42
Şekil 5.22. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 200°C ' de sıra#1'de sıcaklık dağılımı.....	43
Şekil 5.23. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 600°C ' de sıra#5'de sıcaklık dağılımı.....	44
Şekil 5.24. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 400°C ' de sıra#5'de sıcaklık dağılımı.....	45
Şekil 5.25. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 200°C ' de sıra#5'de sıcaklık dağılımı.....	46
Şekil 5.26. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 600°C ' de sıra#10'da sıcaklık dağılımı.....	47
Şekil 5.27. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 400°C ' de sıra#10'da sıcaklık dağılımı.....	48
Şekil 5.28. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 200°C ' de sıra#10'da sıcaklık dağılımı.....	49
Şekil 5.29. 1600 W/cm^3 ısı üretimi ve 600°C zırh sıcaklığında Flinabe soğutucu için sıcaklık dağılımı.....	50
Şekil 5.30. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 600°C ' de sıra#1'de sıcaklık dağılımı.....	52
Şekil 5.31. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 400°C ' de sıra#1'de sıcaklık dağılımı.....	53

Şekil	Sayfa
Şekil 5.32. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C' de sıra#1'de sıcaklık dağılımı.....	54
Şekil 5.33. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C' de sıra#5'de sıcaklık dağılımı.....	55
Şekil 5.34. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C' de sıra#5'de sıcaklık dağılımı.....	56
Şekil 5.35. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C' de sıra#5'de sıcaklık dağılımı.....	57
Şekil 5.36. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C' de sıra#10'da sıcaklık dağılımı.....	58
Şekil 5.37. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C' de sıra#10'da sıcaklık dağılımı.....	59
Şekil 5.38. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C' de sıra#10'da sıcaklık dağılımı.....	60
Şekil 5.39. 1339 W/cm ³ ısı üretimi ve 600 ° C zırh sıcaklığında Li ₂₀ Sn ₈₀ soğutucu için sıcaklık dağılımı.....	61
Şekil 5.40. Li ₂₀ Sn ₈₀ soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C' de sıra#1'de sıcaklık dağılımı.....	62
Şekil 5.41. Li ₂₀ Sn ₈₀ soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C' de sıra#1'de sıcaklık dağılımı.....	63
Şekil 5.42. Li ₂₀ Sn ₈₀ soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C' de sıra#1'de sıcaklık dağılımı.....	64
Şekil 5.43. Li ₂₀ Sn ₈₀ soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C' de sıra#5'de sıcaklık dağılımı.....	65
Şekil 5.44. Li ₂₀ Sn ₈₀ soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C' de sıra#5'de sıcaklık dağılımı.....	66
Şekil 5.45. Li ₂₀ Sn ₈₀ soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C' de sıra#5'de sıcaklık dağılımı.....	67
Şekil 5.46. Li ₂₀ Sn ₈₀ soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C' de sıra#10'da sıcaklık dağılımı.....	68
Şekil 5.47. Li ₂₀ Sn ₈₀ soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C' de sıra#10'da sıcaklık dağılımı.....	69
Şekil 5.48. Li ₂₀ Sn ₈₀ soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C' de sıra#10'da sıcaklık dağılımı.....	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
UO_2	Uranyum dioksit
ThO_2	Toryum dioksit
SS-304	Paslanmaz Çelik
q'''	Isı Üretim Miktarı
z	Yakıt çubuğunun uzunluğu
V_{fuel}	Yakıt çubuğunun hacmi
Li_2O	Lityum Oksit
C	Enerji dönüşüm faktörü
V_{fuel}	Yakıt çubuğu hacmi
Σf	Fisyon değeri
A_w	İlk duvarın yüzey alanı
ϕ_w	Nötron akısı
c_p	Özgül ısı
ρ	Yoğunluk
k	UO_2 ısı iletim katsayısı
r	Silindirik koordinatlarda yarıçap
θ	Silindirik koordinatlarda merkez açısı
T_f	Nükleer yakıtın ilk sıcaklığı
T_c	Zırhın ilk sıcaklığı

Kısaltmalar	Açıklamalar
CANDU	Ağır su reaktörü
LWR	Hafif su reaktörü

1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacı insanlığın ortaya çıkması kadar eskidir. İnsanlar ilk çağlardan beri ısınmak, beslenme ihtiyaçlarını gidermek, temizlik ihtiyaçlarını gidermek için çeşitli enerji kaynakları kullanmışlardır. Bu kaynaklar genellikle ateş elde edilmesi için kullanılmıştır. Zaman geçtikçe bilimde ilerlemeler kaydedilmiş ve insanların ihtiyaçları farklılaşmıştır. Özellikle buharlı makinelerin icadından sonra sanayi devrimi gerçekleşmiş ve enerji hammaddesi ihtiyacı artmış ve ülkeler enerji hammaddelerinin bulunduğu toprakları ele geçirme yarışına girmiştir. Daha sonra elektriğin icadı ve endüstriyel üründe kullanılması, motorlu taşıtların geliştirilmesi ve bu taşıtların enerji hammaddesi olarak fosil yakıtları kullanması enerji hammaddesi ihtiyacını iyice arttırmıştır. Bu durumun sonucu olarak enerji meselesi dünya siyasetinin belirlenmesinde önemli rol oynamış ve ülkelerin kaderini belirlemiştir. Motorlu taşıtların icadından günümüze kadar fosil yakıtlar en önemli enerji kaynağı kabul edilmiş ve en önemli enerji kaynağı olarak kullanılmıştır.

Günümüzde dünya nüfusu artmakta ve artan nüfus daha çok şehirlerde toplamaktadır. Metropol olarak adlandırılan bu şehirler, ülkelerin nüfus yoğunluğunun büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu şehirlerin insan nüfusunun büyük bölümünü çekmesinin sebebi bu büyük şehirlerin o ülkelerin sanayi şehirleri olmasından dolayıdır. Tarımda makineleşme gıda üretiminde insan payını düşürmüş ve bu nedenle kırsal kesimdeki nüfus iş bulmak umuduyla bu sanayi şehirlerine akın etmiştir. Bu artan şehir nüfusu içinde oluşan şehir yaşam tarzı ve standartları, sanayi üretiminin artması enerji ihtiyacını geçmiş zamanlara göre çok fazla arttırmıştır. Artan enerji ihtiyacı karşısında, kullanılan fosil yakıtlarının üretiminin yetersiz kalması ve bu yakıt kaynaklarının sınırlı olması ülkeleri farklı enerji kaynak arayışlarına itmiştir. Bu farklı enerji kaynağı arayışı ülkeleri yenilebilir enerji kaynaklarının üzerinde ve nükleer enerji üzerinde yoğunlaşmalarını sağlamıştır. Yenilebilir enerji kaynaklarının yapılan yatırımlara oranla yeterli miktarlarda enerji elde edilememesi çalışmaları nükleer enerji üstünde yoğunlaştırmıştır. Ülkemizde de nükleer enerji için çalışmalar yapılmakta ve yakın gelecekte Mersin ve Sinop illerinde nükleer santraller kurulması planlanmış ve çalışmalar devam etmektedir.

Nükleer enerjinin önemli olmasının sebebi yapılan yatırımların uzun vadede karşılığının alınması ve sanılanın aksine gerekli tedbirlerin alındığı takdirde en güvenli ve çevreye en az zararı veren enerji şekli olmasıdır. Ayrıca ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasına rağmen, enerji üretimi için harcanan maliyetler diğer enerji üretim maliyetlerine oranla düşük

seviyededir. Nükleer enerji az bir hammadde ile sürekli yüksek miktarlarda enerji üretim olanağı sağlar. Nükleer santrallerin çevreye etkisi fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında, tipik bir 1000-megawatt kömür yakıtlı termik santralin bir yılda çevreye saldıdığı sülfür dioksit 100 000 ton, nitrojen oksit 75 000 ton, kömür külü ise 5000 ton dur [1]. Bir nükleer santral ise bu gazlardan hiç birini havaya salmaz, sadece çıkardığı radyoaktif gaz miktarları ölçülür [1]. Gerekli önlemler alındığı sürece ve nükleer santralin çıkardığı gaz miktarları sürekli ölçümde tutulduğu sürece nükleer santralin çevreye ve insanlara hiçbir zararı yoktur. Ayrıca günümüzde nükleer santrallerin kullanım alanı genişlemekte ve sanayileşmiş ülkelerde uçak gemilerinde ve denizaltılarda kullanılarak bu araçların uzun süre yakıt ikmali yapmadan deniz üstünde ve altında seyir etmesi sağlanmaktadır. Bu teknolojik açıdan gelişmiş ülkelerde nükleer reaktörler küçültülmeye çalışılmakta ve bu yolla kullanım alanları genişletilmeye çalışılmaktadır. Bu gelişmeler ışığında nükleer enerji gelecekte en yaygın bir şekilde kullanılması beklenen enerji türüdür.

Nükleer enerji basit anlamıyla nükleer yakıtta gönderilen nötron yüklerinin yakıtla reaksiyona girmesi sonucu açığa çıkan ısı enerjisinin kullanılarak buhar üretilmesi sonucunda, üretilen buharın buhar türbinlerine gönderilerek elektrik enerjisi elde edilmesi ile sonuçlanan enerji türüdür.

Nükleer enerji fisyon ve füzyon olmak üzere ikiye ayrılır. Fisyon, nükleer yakıttaki atomların parçalanmasıyla elde edilen reaksiyon tipidir. Füzyon ise atomların birleşmesiyle elde edilen reaksiyon tipidir. Günümüzde nükleer santraller de fisyon tipi reaksiyon modelleri kullanılmaktadır. Füzyon reaktörlerde daha çok enerji açığa çıkmasına rağmen verimli olarak enerji elde edilemediğinden ticari olarak fazla tercih edilmemektedir. Bir de bu iki tipin birleşimi olarak planlanan ve halen tasarım ve deney aşamasında olan hibrid reaktörler vardır. Bu tip reaktörler ticari ve askeri şekilde günümüzde aktif olarak kullanılamamaktadır ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Tahmini olarak birkaç on yıl içerisinde aktif olarak ticari amaçlı ilk hibrid nükleer reaktörün devreye girmesi beklenmektedir. Bu reaktörlerde iki reaksiyon tipi birleştirilerek kullanılır. Hibrid reaktörlerin esas amacı füzyon reaksiyonlarının da ticari olarak kullanılabilir hale getirmek ve fisyon reaktörlerinin uzun süreli enerji üretebilmesine olanak sağlamaktır. Hibrid reaktörlerinin temel çalışma prensibi füzyon reaktörlerinden elde edilen nötronların kullanılarak fisyon reaktörlerindeki aktif olmayan yakıtların aktif hale getirilerek nükleer enerji elde edilebilmesi prensibine dayanır. Hibrid reaktörler iki kısımdan oluşur. Birincisi termonükleer güç üreten füzyon kısmı ikincisi ise nükleer yakıtların bölünebilir hale geldiği

fisyon bölümü. Ayrıca nükleer yakıtların bölünebilir hale gelmesiyle de trityum üretimi gerçekleşir. Hibrid reaktörlerde esas ısı üretimi fisyon ile meydana gelir fakat fisyon reaksiyonu gerçekleştirilebilmesi için kullanılan nötron üretimi füzyon reaksiyonu ile oluşturulur. Hibrid reaktörlerin bir faydası da kullanılmış yakıtların tekrar üretken hale getirilmesidir. Bu yakıtlar füzyondan üretilen nötronlar sayesinde tekrar kullanılabilir hale getirilebilir [2].

Hibrid sistemlerde düşünce olarak farklı reaktör sistemleri kullanılabilir. Günümüzde bu sistemlerin çalışmaları deneysel ve teoriksel olarak devam etmektedir. Örnek olarak, LWR(Hafif Su Reaktörleri) harcanmış yakıtlarını, CANDU(Ağır Su Reaktörleri) harcanmış yakıtlarını ve Zenginleştirme işlemi yapılmadan yakıt olarak doğal uranyum elementinin kullanılmasını sağlamak amacıyla farklı hibrid reaktör sistemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır [3].

Bu çalışmada, bu örneklerden yakıt malzemesi olarak LWR harcanmış yakıtı kullanılmıştır. Adından da anlaşılacağı gibi LWR (Hafif Su Reaktörleri) nükleer reaktörlerde hem moderatör hem de soğutucu olarak normal su kullanılır. Buhar üretimi de bu kullanılan su ile gerçekleşir. Bu yüzden bu tip reaktörlere Hafif Su Reaktörleri denir. LWR nükleer reaktörleri inşa etmesi en kolay ve en basit nükleer reaktörler olduğu için dünya üzerinde ticari ve askeri amaçlı en yaygın olarak kullanılan nükleer reaktör tipidir. Bu yaygın kullanımından dolayı en çok nükleer atık üreten reaktörlerdir. Bu harcanmış yakıtların tekrar enerji elde edilmesi için kullanılması hem çevre açısından hem de ekonomik açıdan çok büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, LWR harcanmış yakıtlarının hibrid reaktörlerde ve yapılan bu çalışmada kullanılmasının diğer bir nedeni ise, bu yakıtların Doğal Uranyumdan daha fazla bölünebilir atoma sahip olmasıdır [4]. Bu sebepten dolayı Doğal Uranyum kullanılan hibrid sistemlerden daha kolay ve daha fazla enerji elde edilebileceği düşünülür. Bu çalışmanın amacı bu harcanmış LWR yakıtlarının hibrid reaktörde kullanılması halinde fisyon, ısı, sıcaklık değerlerinin ne kadar miktara sahip olabileceği hesaplanarak hibrid reaktörün çalışması gereken en uygun koşulların bulunmasıdır.

Bu çalışmada, sonlu elemanlar metodu yardımıyla LWR harcanmış yakıt içeren bir fisyon füzyon hibrid reaktöründe bulunan nükleer yakıt çubuklarının sayısal analizi yapılmıştır. Sıcaklık dağılımı hesaplamalarında sonlu elemanlar metodu ile çözüm yapan ANSYS kodu kullanılmıştır. Nükleer yakıt çubuklarındaki ısı üretim hesaplamalarında kullanılan fisyon değerleri ise SCALE5 [5] nötronik kodu yardımıyla hesaplanmıştır. Fisyon değerleri 4 yıl

zaman aralığı için 6 aylık zaman aralıklarında hesaplanmıştır. Hesaplamalarda yakıt çubuklarındaki sıcaklık dağılımı Doğal Lityum, Flinabe, $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucuları için 2 MW/m^2 , 4 MW/m^2 , 6 MW/m^2 , 8 MW/m^2 , 10 MW/m^2 nötron duvar yükleri için hesaplanmıştır. UO_2 nükleer yakıt ergime sıcaklığı referans alınarak sıcaklık dağılım analizi belirlenen parametrelere bağlı olarak karşılaştırılmış, optimum değerler elde edilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Günümüzde literatürde birçok fisyon füzyon hibrid reaktör nötronik ve termal analizi ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Yapıcı ve diğerleri farklı soğutucu sıcaklıkları için yakıt çubuğundaki sıcaklık dağılımını incelemiş ve farklı yüzey sıcaklıkları, farklı nötron yükleri için yakıt çubuklarındaki sıcaklık değişimlerini grafik olarak göstermişlerdir. Çalışmalarında nötron duvar yükleri olarak 2 MW/m^2 , 5 MW/m^2 , 7 MW/m^2 , 8 MW/m^2 , 9 MW/m^2 , 10 MW/m^2 yüklerini uygulamışlar ve soğutucu sıvı olarak Gaz, Flibe, Doğal Lityum ve Ötektik Lityum kullanmışlardır. Çalışmalarında ilk duvar malzemesi ve yakıt malzemesi olarak SS-304 kullanmışlardır. Bu çalışma farklı hacim oranları için yapılmış sonuçlar grafik olarak verilmiştir. Yakıt malzemesi olarak UO_2 kullanmışlardır. Bu çalışmayı yapanlara göre bütün soğutucu sıvılar için maksimum yakıt çubuğu sıcaklığı, yakıt malzemesinin erime sıcaklığını 7 MW/m^2 nötron yükünden daha yüksek yüklemelerde aşmaktadır. Bu çalışmada 7 MW/m^2 nötron yükü için sırasıyla; Gaz, Flibe, Doğal Lityum, Ötektik Lityum soğutucularında, maksimum yakıt çubuğu sıcaklıkları 2942°C , 2823°C , 2728°C ve 3062°C ’ dir. Bu sonuçlara göre sadece Doğal Lityum malzemesinin soğutucu olarak kullanıldığı yakıt bölgesi tasarımı için yakıt malzemesinin ergime noktası aşılmamaktadır. Bu çalışmada en iyi yenilenme performansının Flibe soğutucusundan elde edildiği ifade edilmiştir. İkinci ve üçüncü sırada Gaz ve Ötektik Lityum, son sırada ise Doğal Lityum olduğu ifade edilmiştir [6].

Baysal tarafından yapılan çalışmada, bir füzyon fisyon hibrid reaktörün yakıt çubuğundaki sıcaklık dağılımı incelenmiş, yakıt olarak UO_2 , soğutucu olarak ise $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ kullanılmıştır. Farklı yakıt yüzey sıcaklıkları için yakıt sıcaklık dağılımını analitik ve nümerik yöntemle bularak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışma iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Zırh malzemesi olarak SS-304 malzemesi kullanılmıştır. Yakıt bölgesindeki ilk sıradaki yakıt çubuğu üzerinde yapılan bu çalışmada sınır koşulları olarak sırasıyla yakıt çubuğu yüzey sıcaklığı 200°C , 400°C , 600°C alınmıştır. İlk duvar nötron yükü olarak 2 MW/m^2 , 5 MW/m^2 , 7 MW/m^2 , 8 MW/m^2 , 10 MW/m^2 değerleri kullanılmıştır. Nümerik hesaplar için sonlu elemanlar yöntemine dayanan HEATING kodları kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre 8 MW/m^2 nötron yükünde 200°C , 400°C , 600°C yakıt çubuğu yüzey sıcaklıkları için sırasıyla, 2000°C , 2542°C , 2969°C maksimum yakıt sıcaklıkları analitik yöntemle elde edilmiştir. Nümerik yöntemle elde edilen maksimum sıcaklıklar, aynı yakıt çubuğu yüzey sıcaklıklar için (200°C , 400°C , 600°C) sırasıyla 1991°C , 2533°C , 2966°C ’ dir [7].

Yapıcı diğerk bir sıcaklık dağılımı çalışmasında UO_2 ve ThO_2 karışımı yakıt çubuğunu füzyon enerji üreticisi içinde incelemiştir. Bu çalışmasında soğutucu olarak Doğal Lityum, Flibe, Ötektik Lityum, Helyum malzemeleri kullanmıştır. Bu çalışmayı 5 MW/m^2 nötron yükü altında yapmıştır. Sınır şartı olarak yüzey sıcaklığının 200°C ' den 500°C ' ye kadar lineer olarak arttığını varsayılmıştır. Çalışmanın nötronik hesapları MCNP4B kodlarıyla, sıcaklık dağılımının hesapları ise HEATING7 kodlarıyla yapılmıştır. Bu çalışma iki boyutlu silindirik koordinatlar kullanılarak zamandan bağımsız olarak yapılmıştır. Bu çalışmaya göre bölünebilir yakıt üretim oranı fisyon üretim oranından daha büyüktür. Bu sonuçlar üzerinde çalışılan yakıt çubuğunun enerji üretiminden çok bölünebilir yakıt üretimi için uygun olduğunu göstermektedir. Yine bu çalışmada Trityum üretim oranı 1,05 sayısını geçmesinden dolayı kendi kendine sürdürülebilir bir sistem oluşturmaktadır. Maksimum trityum üretim oranı 1,45 olarak Doğal Lityum soğutucusunda UO_2 için elde edilmiştir. Bu çalışmaya göre yakıt bölgesinde ilk sıradaki yakıt çubuklarındaki sıcaklık dağılımı, yüzey bölgesinde en üst bölgeden en alt bölgeye doğru artmasına rağmen bütün soğutucular için, sıcaklık profili yakıtın merkezinden en alt bölgeye doğru azalmaktadır. Bu durumun nedeni ısı üretim profilinin tek düze olmamasından kaynaklandığı çalışmada belirtilmiştir [8].

İpek tarafından yapılan çalışmada, füzyon fisyon reaktör sistemindeki yakıt çubuğu sıcaklık dağılımı ve yenilenmesi karışık yakıt malzemesi kullanılarak incelenmiştir. Yakıt malzemesi olarak UO_2 ve ThO_2 malzemelerinin karışımını kullanılmıştır. Bu çalışma 2 MW/m^2 , 5 MW/m^2 , 7 MW/m^2 ilk duvar nötron yükleri için yapılmış ve üç farklı soğutucu tipi kullanılmıştır. Bu soğutucular Gaz, Flibe, Doğal Lityumdur. Bu çalışma 48 ay zaman aralığı için yapılmıştır. Sınır şartı olarak 200°C , 300°C , 400°C , 500°C , 600°C yakıt yüzey sıcaklıkları kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda çalışma süresince farklı soğutucular için en iyi performans, yakıt karışımlarının erime noktasına ulaşmadan, 7 MW/m^2 nötron ilk duvar yükü için sırasıyla; % 70 UO_2 -% 30 ThO_2 Flibe , % 80 UO_2 -% 20 ThO_2 Gaz, % 90 UO_2 -% 10 ThO_2 Doğal Lityum soğutucuları için elde edilmiştir. En iyi zenginleştirme derecesi sırasıyla; Flibe, Gas ve Doğal Lityum için bulunmuştur. En Kötü yenilenme performansı Doğal Lityum soğutucusu kullanıldığı zaman elde edilmiştir. En iyi yenilenme performansının gerçekleştiği sırada maksimum yakıt sıcaklığı Flibe soğutucusu için 2727°C olarak belirlenmiştir. Fakat yakıt olarak sadece UO_2 kullanıldığı zaman maksimum sıcaklık 39 ayda 2811°C olarak elde edilmiştir. Yine yakıt olarak sadece UO_2 ve soğutucu olarak Gaz kullanıldığı zaman 38. ayın sonunda maksimum sıcaklık 2814°C , aynı yakıt ile

Doğal Lityum soğutucusu kullanıldığı zaman maksimum sıcaklık 43.ayın sonunda 2724 ° C elde edilmiştir [9].

Gaspar ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, yakıt çubuğunun sıcaklık dağılımı üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışmalarında ısı transferini ve sıcaklık dağılımını belirlemek için bu tez çalışmasında olduğu gibi sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Fakat bu tez çalışmasından farklı kodlar kullanmışlardır. Bu çalışmayı nükleer santral tasarımında kullanılmak üzere en uygun sıcaklık dağılımını ve yakıt çubuğu yerleştirmesini bulmak amacıyla yaptıklarını belirtmişlerdir. Bu çalışmada yakıt ile manto malzemesi arasında boşluk olduğunu varsaymışlardır. Bu çalışmada yakıt malzemesi eksantrik olarak yerleştiği için maksimum sıcaklık yakıtın pozisyonuna göre değişmiştir. Çalışma sonuçları, yakıttaki mantonun iç ve dış yüzeylerindeki ve soğutma gazındaki maksimum sıcaklığı göstermektedir. Çalışmanın sonuçlarının nükleer yakıt tasarımının güvenlik faktöründe önemli bir katkı sağlayacağı çalışmada belirtilmiştir [10].

Pandey ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, silindirik yakıt çubuğundaki sıcaklık dağılımı matematiksel yöntemle hesaplanmıştır. Bu çalışmalarında ısı transfer hesabının ve sıcaklık dağılımının nasıl yapıldığını göstermektedirler. Bu çalışmada matematiksel çözümleme yapılarak bulunan maksimum sıcaklık yakıt çubuğunun merkezinde oluşmaktadır. Minimum sıcaklık ise yüzey bölgesinde oluşmaktadır. Bu elde edilen sonuçlar yakıttan soğutucuya ısı transferinin termodinamiğin ikinci kanununa göre yapıldığını göstermektedir. Bu çalışmanın sonuçları bu tez konusunu oluşturan çalışmanın sonuçlarını sıcaklık dağılımının yerleşimi bakımından doğrulamaktadır [11].

An ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, bir nükleer yakıt çubuğunun erime sürecinin termal analizini yapılmıştır. Bu çalışmanın amacının bir matematiksel model geliştirmek ve bir yönlü ısı transferi simülasyonu çalışması yapmak olduğunu belirtmişler ve bu çalışmayı yaparak bir nükleer reaktörün güvenlik kriterlerini belirlemek istemişlerdir. Yakıt malzemesi olarak UO_2 , zırh malzemesi olarak da Zirkonyum alaşımı kullanmışlardır. Yakıt ile zırh malzemesi arasında boşluk bırakılmış ve yüksek ısı iletim katsayısına sahip Helyum gazı ile doldurulduğu varsayılmıştır. Bu çalışma zamana bağlı olarak yapılmıştır. Çözüm matematiksel olarak modellenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre normal ısı taşınım katsayısı koşullarında ($h_{\infty}=34 \text{ kW/m}^2\text{K}$) yaklaşık olarak 200 sn' de sıcaklık sabit koşullara ulaşmakta ve yaklaşık olarak maksimum sıcaklık 1200 ° C' de sabit kalmaktadır. Kaza

koşullarında ise ısı taşınım katsayısı $0,2 \text{ kW/m}^2\text{K}$ olarak varsayılmakta ve maksimum sıcaklık 200 sn için 4000°C ’ye kadar çıktığı ve sürekli artış gösterdiği görülmektedir [12].

Eskandari ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, nükleer yakıt çubuğunun termal performansını incelenmiştir. Bu çalışmayı ABAQUS yazılımı kullanarak yapmışlardır. Kullanılan bu yazılım sonlu elemanlar yöntemine dayanır. Bu çalışma tek boyutlu olarak yapılmıştır. Bu çalışmayı yapabilmek için yakıt çubuğu 10 elemente bölünmüş ve her bir element için farklı bir ısı iletim katsayısı uygulanmıştır. Diğer çalışmalarda bulunduğu gibi bu çalışmanın sonucunda da maksimum sıcaklık yakıtın merkezinde oluşurken minimum sıcaklık yakıtın dış çapında oluşmuştur. Bu çalışmada bulunan sonuca göre sıcaklık merkezden dış çapa doğru lineer bir azalış göstermektedir [13].

Jiang ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, nükleer yakıt çubuklarının üç boyutlu olarak termal-mekanik davranışları sonlu elemanlar metoduyla incelenmiştir. Bu çalışmada yakıt malzemesi olarak UO_2 kullanılmıştır. Zırh malzemesi olarak zirkolay kullanılmıştır. Yakıt ile manto arasına boşluk bırakılmıştır. Yakıtın boyu 20 mm, yarıçapı ise 4,3 mm olarak alınmıştır. Manto kalınlığı 0,5 mm ve ara boşluk 0,03 mm olarak alınmıştır. Sınır şartı olarak manto malzemesinin yüzeyi 573 K olarak alınmıştır. Bu çalışmada sonlu elemanlar metodu için ANSYS programı kullanılmıştır. Çalışmada sıcaklık dağılımını belirlemek için ısı üretim oranı sabit olarak $0,3064 \text{ W/mm}^3$ değeri alınmıştır. Çalışmanın sonucunda en yüksek sıcaklık değeri 1027 K olarak bulunmuştur [14].

Newman ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, UO_2 yakıt çubuğunun üç boyutlu olarak termodinamik, ısı ve oksijen difüzyon davranışları birleştirilerek incelenmiştir. Bu çalışma hem zamandan bağımsız hem de zamana bağlı olarak yapılmıştır. Bu çalışmanın analizi INL’s BISON yakıt performans kodlarıyla yapılmıştır. Bu çalışmada silindirik yakıt çubuğu kullanmışlardır ve model olarak yakıt çubuğuyla manto malzemesi arasında boşluk bırakmışlardır. Yapılan simülasyona göre sıcaklık farkı, yakıtın merkezindeki sıcaklık 1150 K iken, yakıt merkezi ile en dış yüzey arasında 350 K’dir. Bu sonuç zamandan bağımsız yapılan çözümlemelere göre elde edilmiştir ve ısı üretim miktarı olarak $2 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ kabul edilmiştir [15].

Şahin ve Yapıcı tarafından yapılan çalışmada, LWR harcanmış yakıtının füzyon reaksiyonu ile yenilenmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmayı 6 ay aralıklarla 48 ay için gerçekleştirmişlerdir. Soğutucu olarak üç farklı malzeme kullanmışlardır. En iyi yenilenme performansı Flibe soğutucusu için elde edilmiştir. İkinci ve üçüncü ise sırasıyla, Helyum ve

Doğal Lityumdur. Bu çalışmada Flibe soğutucusundan D-D Füzyon Reaktör Modu ile 12 ay sonunda 3,5 % derecede zenginleştirilmiş uranyum elde edilmiştir. Aynı oranda zenginleştirilmiş yakıt D-T Füzyon Reaktör Modu için 24 ay süresinde elde edilmiştir. Bu çalışmanın amacı harcanmış nükleer yakıtlarının füzyon reaksiyonları yoluyla tekrar nükleer santrallerinde kullanmak üzere zenginleştirilmesidir [16].

Yapıcı ve diğerleri tarafından yapılan bir diğer çalışmada, Th yakıtı kullanılarak LWR reaktörleri için bölünebilir yakıt elde edilebilmesinin nötronik potansiyeli füzyon hibrid reaktörde incelenmiştir. Bu çalışmada ilk duvar yükü olarak 5 MW/m² ilk duvar yükü kullanılmıştır. Yakıt malzemesi olarak ThC₂ veya ThF₄ kullanılmıştır. Soğutucu olarak Gaz, Flibe, Doğal Lityum kullanılmıştır. Nötronik potansiyeli hibrid reaktörün dört yıl zaman zarfı için incelenmiştir. Yakıtın zenginleşme oranı 3,55 % ile 7 % arasında, soğutucu ve yakıt tipine bağlı olarak elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda en iyi nötronik performans sırasıyla; Flibe, Gaz, Doğal Lityum için elde edilmiştir. Sonuç olarak 48 ay sonunda maksimum zenginleşme performansı Flibe soğutucusu ile ThF₄ yakıtı için 7 %' dir. Minimum Zenginleşme performansı Doğal lityum soğutucusu ile ThC₂ yakıtı için 3,55 % olarak elde edilmiştir [17].

Şahin ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, harcanmış karışık yakıtın füzyon üreticisinde yenilenmesi çalışması yapılmıştır. Füzyon, reaktörü yüksek enerjili dış enerji kaynağı gibi düşünülür. Reaktör yakıt bölgesi 10 sıra yakıt çubuğu dizisinden oluşmaktadır. Bu 10 sıranın ilk 3 sırasını CANDU harcanmış yakıtları, diğer 7 sırası ise LWR harcanmış yakıtlarından oluşmaktadır. Bölünebilir yakıt bölgesi basınçlı Helyum gazı ile soğutulmaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre 2,25 MW/m² ilk duvar nötron yükü ile birlikte CANDU harcanmış yakıtı 7 ay sonunda tamamen nükleer santrallerde kullanılabilecek şekilde zenginleşmiştir. LWR harcanmış yakıtı ise 15 ay sonunda nükleer santrallerde kullanılabilecek hale gelmektedir. Bu çalışmada daha uzun zaman zarfında uygulanan nötron yükü için, daha yüksek zenginleştirme değerleri elde edilmiş, bunun sonucunda da yüksek yanma ve çoklu çevrimler için uygun yakıtlar elde edilmiştir [18].

Übeyli tarafından yapılan çalışmada, Flibe, Flinabe, Li₂₀Sn₈₀ soğutucularının füzyon fisyon hibrid reaktördeki trityum üretim kabiliyetlerini incelenmiştir. Bunun nedeni füzyon reaksiyonun devamlı bir şekilde sürdürülebilmesi için Trityum üretim kabiliyetlerinin devamlı bir şekilde sürdürülebilmesi gerekir. Bu çalışmada ilk duvar ve zırh malzemesi olarak W-5Re, T111, TZM, Nb-1Zr malzemeleri kullanılmıştır. İlk duvar soğutucu

malzemesi olarak Helyum gazı, yakıt malzemesi olarak da Doğal Uranyum kullanılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre en yüksek Trityum üretim kabiliyetine sahip soğutucu Flibe olarak bulunurken, en düşük Trityum üretim kabiliyetine sahip soğutucu Flinabe olarak bulunmuştur. Zırh malzemesi olarak kullanılan malzemelerinin ise Trityum üretim kabiliyetleri T111 hariç birbirine benzer olarak elde edilmiştir. T111 ise en düşük trityum üretim kabiliyeti olan malzeme olarak belirlenmiştir [19].

Kang ve Terai tarafından yapılan çalışmada, $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusunun Trityum iletim davranışını incelenmiştir. Bu çalışmayı yapanlara göre çalışmanın amacı $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ alaşımının Trityum kütle transfer davranışını alaşım ve gaz fazları arasında belirlemek ayrıca Trityumun blanket içerisindeki dağılımını değerlendirmektir. Bu çalışma gerçek ortamda deney olarak yapılmıştır. Nötron kaynağı reaktörü olarak Tokyo Üniversitesinin YAYOI' si kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ ' nin Trityum kütle transfer ve difüzyon katsayısı kısmi basınçlı H_2 tarafından etkilenir [20].

Şahin ve Übeyli tarafından yapılan çalışmada, LWR harcanmış yakıtlarının yüksek güç yoğunluğundaki füzyon reaktörde dönüşümü incelenmiştir. Bu çalışmada nötron yükü olarak 10 MW/m^2 değeri kullanılmış ve bu çalışma 48 ay zaman aralığı için gerçekleştirilmiştir. İlk duvar ve zırh malzemesi olarak W-5Re alaşımı kullanılmış ve soğutucu olarak ise Doğal Lityum malzemesi kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre nükleer atık içindeki bütün izotopların yüksek derecede bölünebilir yapıya sahip olduğu, yüksek enerjili ve yoğun nötron yükü altında belirlenmiştir [21].

3. HİBRİD REAKTÖR

3.1. Tanım

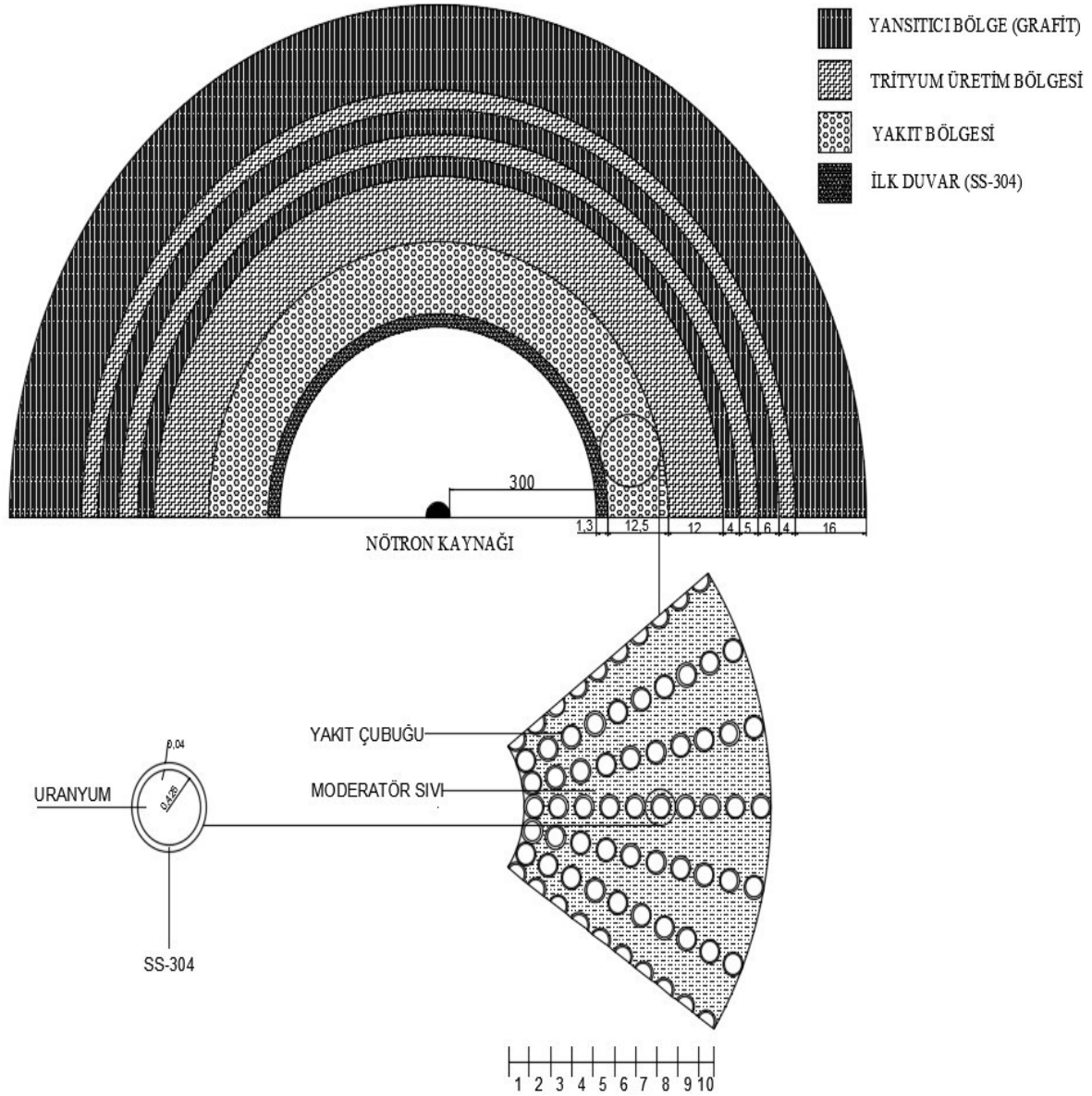
Hibrit kelimesinin esas anlamı melez demektir ve iki var olan olgunun karışımı anlamına gelir. Nükleer reaktörlerde ise bu nitelendirme füzyon ve fisyonun birlikte kullanılması anlamına gelmektedir. Bu tip füzyon ve fisyonu birlikte kullanan reaktörlere hibrid reaktörler denir. Füzyon teknolojisinin henüz etkin bir teknolojiye sahip olmamasından dolayı, füzyon reaktörleri yerine hibrid reaktör teknolojisi yaygınlaşmıştır. İki hafif çekirdeğin daha ağır bir çekirdek oluşturmak amacıyla birleştirilmesine füzyon denir [2]. Oluşan bu daha ağır çekirdeğin, kendisini oluşturan bu iki çekirdeğin kütesinin toplamından daha hafif bir kütleyle sahip olduğu için ara oluşan kütle kaybından dolayı ortaya çıkan enerjiye füzyon enerjisi denir. Füzyon yakıtları 2_1D , 3_1T , 3_2He , 6_3Li , $^{11}_5B$ çekirdeklerinden oluşmaktadır [2]. Füzyon enerji elde etmedeki temel problem Coulomb kuvvetidir. Bu kuvvet protonların birbirini itmesine sebep olur. Protonlar pozitif yüklü oldukları için birbirini itecektir. Fakat bu protonlar birbirine yeterince yaklaşıncaya diğer bir çekim kuvveti olan nükleer çekim kuvveti sayesinde birleşecektir. Protonları gereken mesafeye getirmek için protonların Coulomb kuvvetini aşmasını sağlayacak kinetik enerjiyle yüklenmesini sağlamak gerekir. Protonların kinetik enerjisini arttırmak için atom çekirdeklerini gerekli sıcaklığa kadar ısıtmak gerekir [2].

Fisyon ise atom çekirdeklerinin doğal yolla veya nötron bombardımanıyla alt atomik parçalara ayrılmasıdır. Hibrid reaktörlerde ilk önce füzyon yardımıyla yakıtta nötron yüklemesi yapılır. Esas enerji ise fisyon meydana getirerek elde edilmektedir. Nötron duvar yükleri soğutucu ve yakıtta reaksiyon oluşturmakta, fisyon reaksiyonu sonucunda hibrid reaktör yakıt bölgesinde ısı üretimi oluşmaktadır.

3.2. Reaktör Geometrisi

Füzyon-fisyon reaktörlerden verim elde etmek için malzeme seçimi çok önemlidir. Bu reaktörlerde kullanılan malzemelerin yüksek sıcaklıklara ve nötron yüklerine karşı dayanıklı olması gereklidir [2]. Ayrıca bu malzemeler yüksek radyoaktif ve korozyon sağlayan bir çevrede iyi bir performansla sahip olmalıdır. Reaktör tasarımında yüksek sıcaklık da ki ilk nötron yüküyle karşılaşacak olan ilk duvar malzemesi çok önemlidir ve bu çalışmada uygulaması yapılan reaktörde SS-304 çeliği kullanılmıştır. Bu reaktörün füzyon-fisyon devrini yapabilmesi için en önemli etkenlerden biri trityum üretimidir. Bunun için yakıt

bölgesinin arka taraflarına üç tane trityum üretim bölgesi eklenmiştir. Trityum üretim bölgeleri Li_2O ' den oluşmaktadır. Nötron kaçağını azaltmak için trityum üretim bölgeleri arasına ve en dış kısma üç adet grafit bölgesi eklenmiştir. Şekil 3.1 'de Reaktör geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Hibrid Reaktör yapısının genel görünümü (cm)

Bu çalışmada kullanılan Şekil 3. 1' deki reaktörde orta kısımda bulunan nötron kaynağı ile ilk duvar arası 300 cm' dir. İlk duvar 1,3 cm, Yakıt bölgesi 12,5 cm, sırasıyla ilk trityum üretim bölgesinden başlayarak trityum üretim bölgeleri 12, 5, 4 cm' dir. Karbon bölgelerin kalınlığı ise sırasıyla 4, 6, 16 cm' dir. Yakıt bölgesindeki silindirik yakıt çubukları on sıra halinde dizilmiştir. Bu çalışmada hesaplamalar yakıt çubuklarının dizilişindeki sıra 1, sıra 5, sıra 10 için yapılmıştır.

4. TEORİK ANALİZ

4.1. Nümerik Analiz

Bu çalışmada, ilk olarak SCALE 5 nükleer kodu kullanılarak nötronik analiz yapılmış ve bir hibrid reaktör için fisyon değerleri elde edilmiştir. Elde edilen fisyon değerleri bölüm 4.2 detaylı olarak anlatıldığı şekliyle yakıt çubuklarındaki ısı üretim oranlarının bulunmasında kullanılmıştır. Daha sonra, elde edilen ısı üretim oranları ve belirlenen sınır şartlarına bağlı olarak yakıt çubuklarındaki sıcaklık dağılımı ANSYS paket programı kullanılarak analiz edilmiştir. Nötronik hesaplamalarda kullanılan izotopların atomik yoğunlukları Çizelge 4.1’ de verilmiştir [21].

Çizelge 4.1. Nötronik hesaplamalarda kullanılan atomik yoğunluklar

Malzeme	İzotop	Atomik yoğunluk ($10^{24}/\text{cm}^3$)
SS-304	C	$7,873 \times 10^{-4}$
	Si	$6,734 \times 10^{-4}$
	Cr	$1,728 \times 10^{-2}$
	Fe	$5,926 \times 10^{-2}$
	Ni	$8,055 \times 10^{-3}$
LWR Harcanmış Yakıtı	^{234}U	$2,380 \times 10^{-7}$
	^{235}U	$2,207 \times 10^{-5}$
	^{236}U	$4,848 \times 10^{-6}$
	^{238}U	$6,400 \times 10^{-3}$
	^{237}Np	$1,083 \times 10^{-6}$
	^{238}Pu	$2,193 \times 10^{-6}$
	^{239}Pu	$7,934 \times 10^{-5}$
	^{240}Pu	$6,870 \times 10^{-5}$
	^{241}Pu	$4,331 \times 10^{-5}$
	^{242}Pu	$2,463 \times 10^{-5}$
	^{241}Am	$3,208 \times 10^{-6}$
	^{243}Am	$6,842 \times 10^{-6}$
	^{244}Cm	$3,035 \times 10^{-6}$
Doğal Lityum	^6Li	$2,175 \times 10^{-3}$
	^7Li	$2,682 \times 10^{-2}$
Flinabe	Na	$6,556 \times 10^{-3}$
	Be	$6,556 \times 10^{-3}$
	F	$2,622 \times 10^{-2}$
	^6Li	$4,917 \times 10^{-4}$
	^7Li	$6,064 \times 10^{-3}$
$\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$	S_n	$1,941 \times 10^{-2}$
	^6Li	$3,639 \times 10^{-4}$
	^7Li	$4,488 \times 10^{-3}$
Li_2O	^6Li	$4,638 \times 10^{-3}$
	^7Li	$5,707 \times 10^{-2}$
	Al	$3,014 \times 10^{-3}$
	O	$3,084 \times 10^{-2}$
Karbon	C	$1,128 \times 10^{-1}$

4.2. Isı Üretim Oranının Hesaplanması

Yakıt çubuklarındaki sıcaklık dağılımlarını hesaplamak için ilk önce her bir fisyon değeri için ısı üretim miktarlarının hesaplanması gerekir. Bu çalışmada fisyon değerlerinin hesaplandığı gibi sıra#1, sıra#5, sıra#10 dizilimleri için her bir çubuk bölgesindeki ısı üretim miktarları da hesaplanmıştır.

Isı üretim miktarlarının hesaplanmasında Eş. 4.1' de gösterilen denklem kullanılmıştır.

$$q''' = \frac{\sum f \phi_w A_w C}{V_{fuel}} \quad (4.1)$$

Eş. 4.1' de C ifadesi enerji dönüşüm faktörüdür ve $200 \text{ (MeV)} \times 1,602189 \cdot 10^{-13} \text{ (J)}$ sabit sayısı olarak kabul edilir ve denklemlerde kullanılır. V_{fuel} yakıt çubuğunun hacmini ifade eder ve hesaplanan değeri $285.642448 \times \pi \text{ (cm}^3\text{)}$ dür. $\sum f$ yakıt dizilim bölgelerindeki elde edilen fisyon değerleridir (fisyon/nötron). ϕ_w nötron akısıdır (nötron/cm²s) ve Çizelge 4. 2' de her bir nötron duvar yüküne karşılık gelen nötron akısı verilmiştir. A_w ilk duvarın yüzey alanıdır ve değeri $602,6 \times \pi \text{ (cm}^2\text{)}$ dir. Elde edilen fisyon oranları ve buna bağlı reaktör tasarım parametreleri kullanılarak yakıt dizilim bölgelerindeki ısı üretim oranları hesaplanmıştır. Bulunan bu ısı üretim değerleri ile beraber belirlenen sınır şartlarına bağlı olarak yakıt çubuklarında meydana gelecek sıcaklık dağılımları ve maksimum sıcaklıklar elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Nötron yüklerine göre nötron akı değerleri

Nötron Yük Değerleri	Nötron Akı Değerleri
2 (MW\m ²)	8.85418E+13
4 (MW\m ²)	1.77084E+14
6 (MW\m ²)	2.65625E+14
8 (MW\m ²)	3.54167E+14
10 (MW\m ²)	4.42709E+14

4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Yakıt Sıcaklık Dağılımının Hesaplanması

Sonlu elemanlar yöntemi, yaklaşık olarak sonuçları bulmak için kısmi diferansiyel denklemleri kullanarak çözümleme yapan sayısal bir yöntemidir. Bu yöntemin uygulaması büyük parçalı cisimleri küçük parçalara ayırarak bu küçük parçaları basit denklemlerle çözerek daha sonra bu küçük parçaların birleştirilmesiyle bütün parçada meydana gelen

problemin çözülmesine dayanır. Yöntemin adını da veren bu küçük parçalara hücre adı verilir. Sonlu elemanlar yönteminde yüksek hücre sayıları ile hatalar en aza indirilir. Sonlu elemanlar yönteminin en önemli iki özelliği:

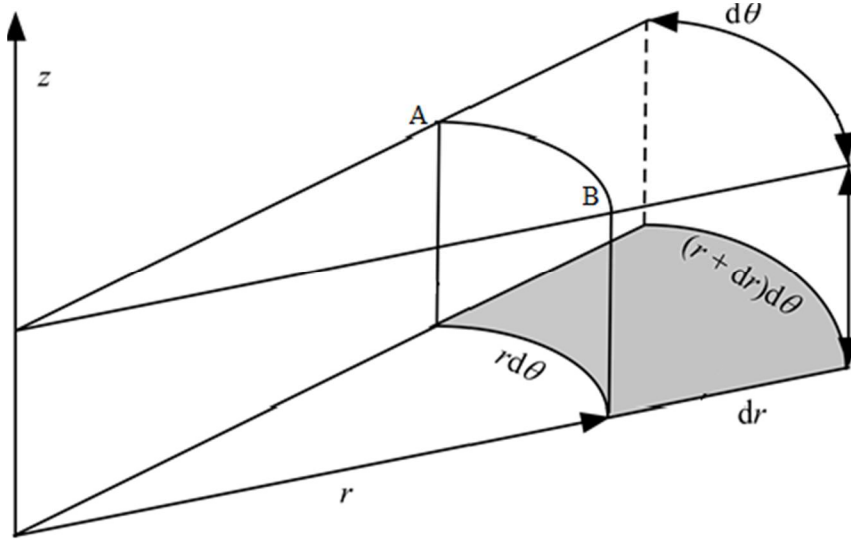
- 1) Karmaşık şekilli parçaların çözümünde büyük kolaylık sağlaması
- 2) Yöntemin kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için çok uygun olmasıdır.

Bu çalışmada yakıt çubukları üzerindeki sıcaklık dağılımı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. ANSYS programı içinde birçok modülü bulunduran ve birçok karmaşık mühendislik probleminin çözümünde kullanılan bir programdır. Yakıt çubuklarındaki sıcaklık dağılımları ANSYS programının Steady-State Termal modülünde hesaplanmıştır. Bu modülün kullanılmasının nedeni sıcaklık değerlerinin zamandan bağımsız olarak hesaplanması ve üzerinde sıcaklık değerlerinin bulunduğu modelin katı cisim olmasıdır. Yakıt çubuklarının sıcaklık dağılımının hesaplanmasında genel ısı iletim denklemleri kullanılmıştır. Yakıt çubuğu iç içe geçmiş iki katmandan oluştuğundan dolayı (Uranyum Dioksit ve paslanmaz çelik) yakıt çubuğunun sıcaklık dağılımının matematiksel hesabına ilk olarak merkez olan UO_2 ' den başlanır ve daha sonra zırh bölümünden devam edilir. Yakıt çubuğunun şekli silindirik olduğu için bu şekle uyarlanmış ısı iletim denklemi kullanılır. Silindirik yakıt çubuklarında kullanılan yakıtların sıcaklık analizinde Eş. 4.2'te verilen genel ısı iletim denklemi kullanılmıştır [22].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(kr \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(kr \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2)$$

Bu çalışmada, hibrid reaktör geometrisindeki zamana bağlı nötronik hesaplamalar için fisyon değerleri elde edilmiştir. ANSYS paket programında zamandan bağımsız ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$) statik sıcaklık dağılım analizi yapılmıştır. Ancak, elde edilen zamana bağlı fisyon değerlerine göre statik hesaplamalar zamana bağlı olarak sonlu elemanlar metodu analizi yapılmıştır. Zaman değişiminin sıfır olarak kabul edilmesiyle zaman ifadesiyle çarpım olan özgül ısı (c_p) ve yoğunluk (ρ) değerleri de sıfıra dönüşür. Bu sınırlandırılmalarla Eş. 4.3 elde edilir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(kr \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(kr \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' = 0 \quad (4.3)$$



Şekil 4.1. Silindirik yakıt çubuğu koordinatlarının genel gösterimi

Şekil 4.1’ de silindirik koordinatların genel gösterimi verilmiştir. Simetrik her noktadaki sıcaklık dereceleri eşit olduğu için (Örnek olarak Şekil 4.1’ deki A ve B noktaları) θ açısının değişmesiyle oluşan sıcaklık değişimi “0” kabul edilir. Bu yüzden $\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$ kabul edilir ve Eş. 4.4’teki denklem elde edilir.

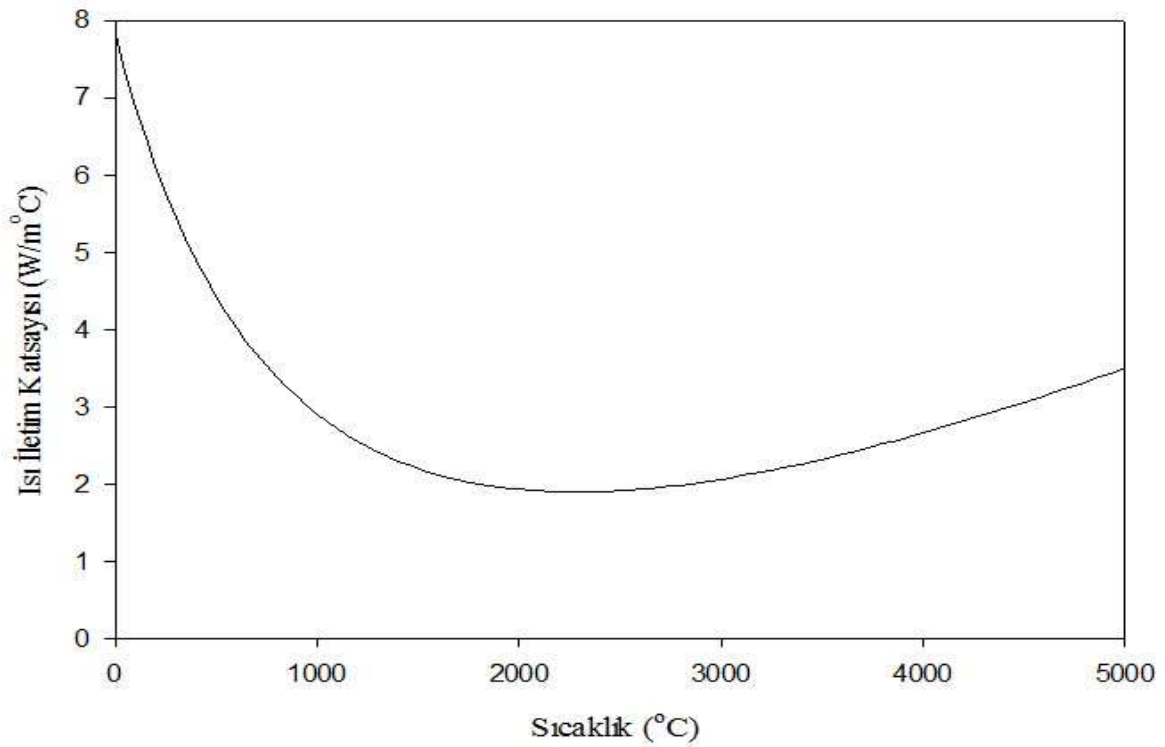
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(kr \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' = 0 \quad (4.4)$$

Eş. 4.4’teki q''' (W/cm³) ifadesi UO₂ bileşiğinin ısı üretim miktarını ifade eder. z ifadesi yakıt çubuğunun uzunluğudur ve değeri 1 cm olarak alınmıştır. Bu denklemde r terimi yakıt çubuğunun yarıçapını belirtmekte olup, 0.425 cm olarak alınmıştır. Bu çalışmada yakıt malzemesinin ısı iletim katsayısı k sıcaklığa bağlı olarak alınmıştır ve Eş. 4.5’ deki denklem ile elde edilmiştir. Bu eşitliğe göre elde edilen ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.2’ de gösterilmiştir ve bulunan bu sonuçlar ANSYS programına girilerek sıcaklık dağılımlarının hesaplanmasında kullanılmıştır [23].

$$k(T) = \frac{a}{T+b} + c(T - d) \quad (4.5)$$

Eş. 4.5’ de a sabit bir değerdir ve 160,36 (W/cm)’ dir. b teriminin değeri 1177.47 (°C), c ve d teriminin değeri ise sırasıyla 1.34×10^{-5} (W/cm°C²), 4330 (°C)’ dir.

Yakıt çubuğu malzemesi olan SS-304 çeliğinin ısı iletim katsayısı 0.175 (W/cm.°C) olarak alınmıştır. Yakıt çubuğu zırh malzemesinin dış yarıçapı 0,465 cm’ dir.



Şekil 4.2. Uranyum elementinin ısı iletim katsayısı-sıcaklık değişim grafiği

4.4. Hesaplamalarda Kullanılan Sınır Şartları

Yakıt çubuklarındaki sıcaklık dağılımının belirlenebilmesi için çubuğun bulunduğu ortamın sınırlarının belirlenmesi ve uygulama yapılan programa girilmesi gerekir. Bu çalışma da sınır şartları için yakıt çubuğu zırh malzemesi yüzey sıcaklığı ve soğutucu sıvı sıcaklığı eşit kabul edilmiş ve programda sınır şartı olarak zırh malzemesi yüzey sıcaklığı sırasıyla 200 °C, 400 °C, 600 °C olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Yakıt çubuğunun sınır şartları sırasıyla Eş. 4.6, 4.7, 4.8, 4.9' da aşağıda verilmiştir [7].

$$\left. \frac{dT_f}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (4.6)$$

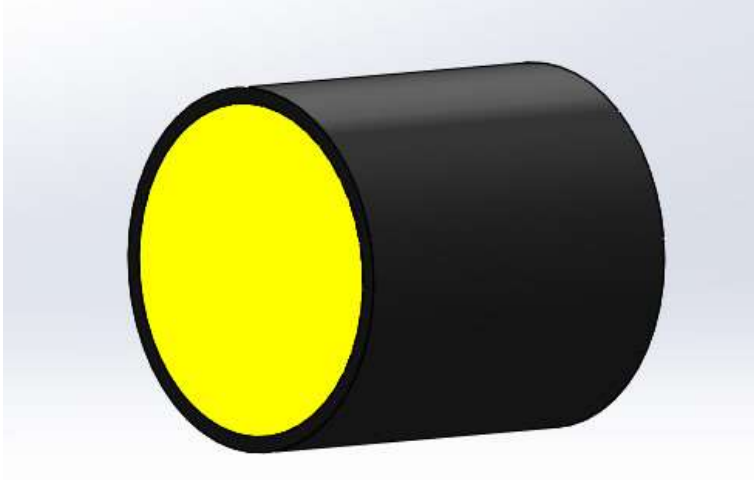
$$k_c \left. \frac{dT_c}{dr} \right|_{r=r_f} = k_f \left. \frac{dT_f}{dr} \right|_{r=r_f} \quad (4.7)$$

$$k_c \left. \frac{dT_c}{dr} \right|_{r=r_c} = T_c|_{r=r_c} \quad T_c = 200 \text{ °C}, 400 \text{ °C}, 600 \text{ °C} \quad (4.8)$$

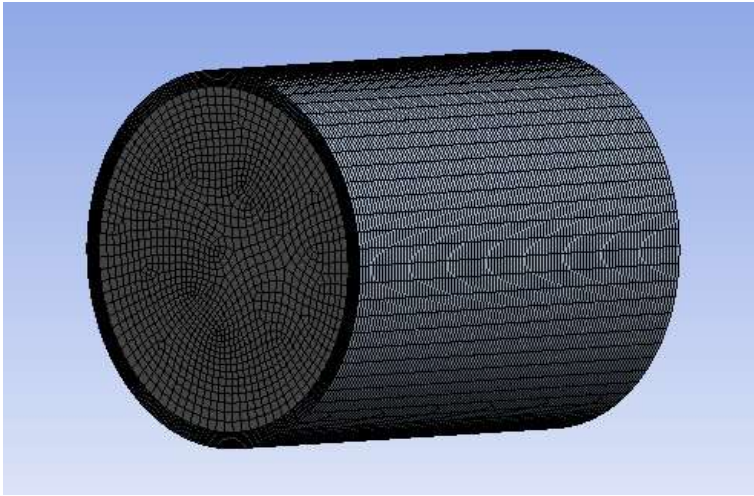
$$\dot{q}_\theta|_{\theta=0} = 0 \quad \dot{q}_\theta|_{\theta=2\pi} = 0 \quad (4.9)$$

Eşitliklerde verilen T_f yakıt malzemesinin sıcaklığını, T_c ise yakıt çubuğu zırh malzemesinin sıcaklığını ifade eder.

Yapılan çalışmada yakıt çubuklarının sıcaklık dağılımlarının sayısal analizi için yakıt çubuğu SOLIDWORKS katı modelleme çizim yöntemi ile oluşturulmuş (Şekil 4.3) ve oluşturulan bu model ANSYS paket programına aktarılarak hesaplamalarının yapılabilmesi için hücrelere bölme işlemi (Şekil 4.4) gerçekleştirilmiş model verilmiştir.



Şekil 4.3. Yakıt çubuğunun SOLIDWORKS modeli



Şekil 4.4. ANSYS ortamında yakıt çubuğunun hücrelere bölünmüş görünümü

5. NÖTRONİK -TERMAL SONUÇLAR

Bu tezde SCALE 5 nükleer kodları yardımıyla farklı nötron duvar yükleri ve farklı soğutucular için nötronik trityum üretimi, enerji çoğaltım faktörü ve fisyon oranları elde edilirken, ANSYS kodu kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile nükleer yakıt çubuklarındaki sıcaklık dağılımlarının sayısal analizi gerçekleştirilmiştir.

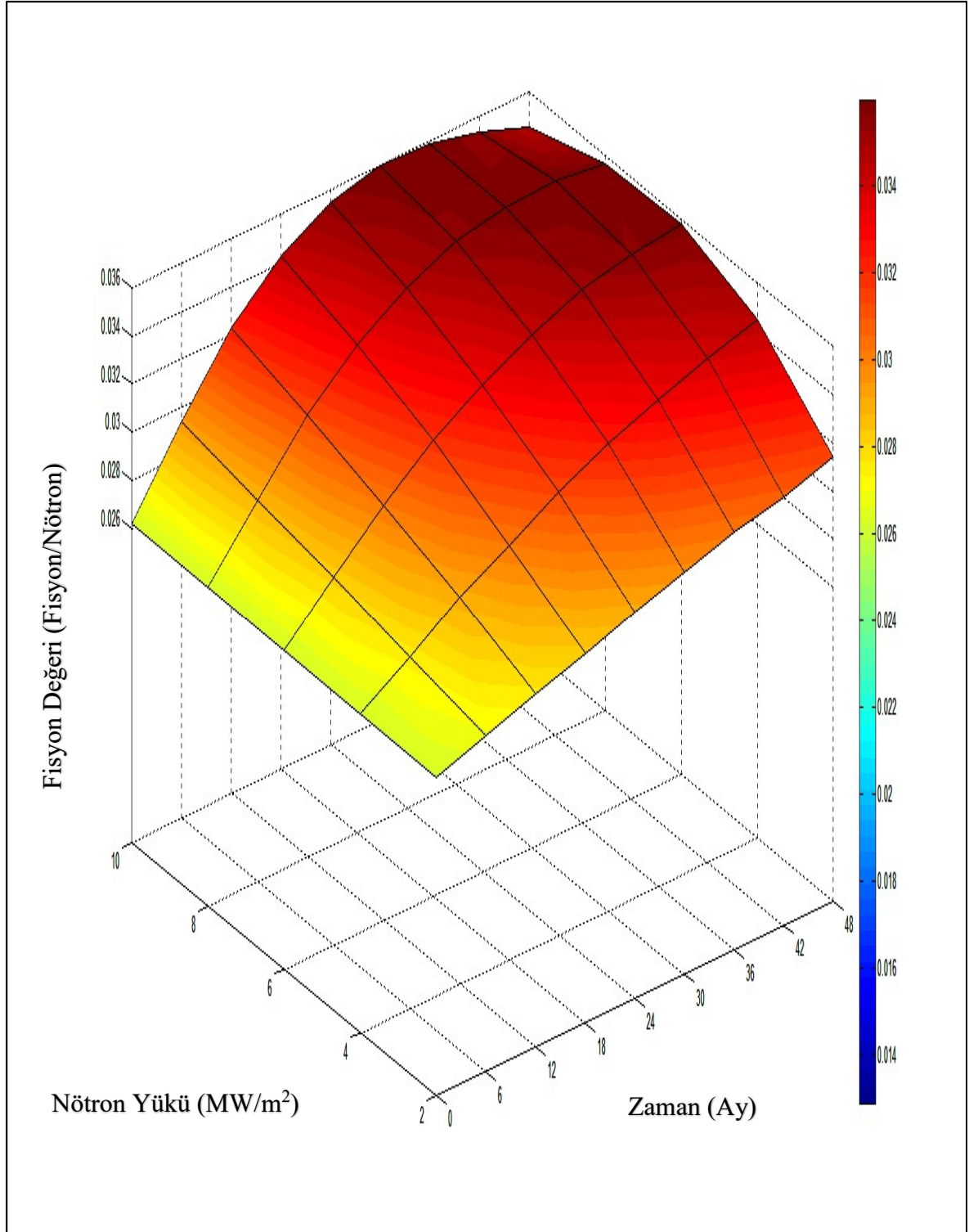
5.1. Nötronik Sonuçlar

Bu çalışmada nötronik analiz fisyon değerlerini bulamak için yapılmıştır. Fisyon üretim değerleri bölüm 5.1.1. fisyon değerlerin' de zamana ve nötron yüklerine bağlı olarak grafik halinde gösterilmiştir.

5.1.1. Fisyon değerleri

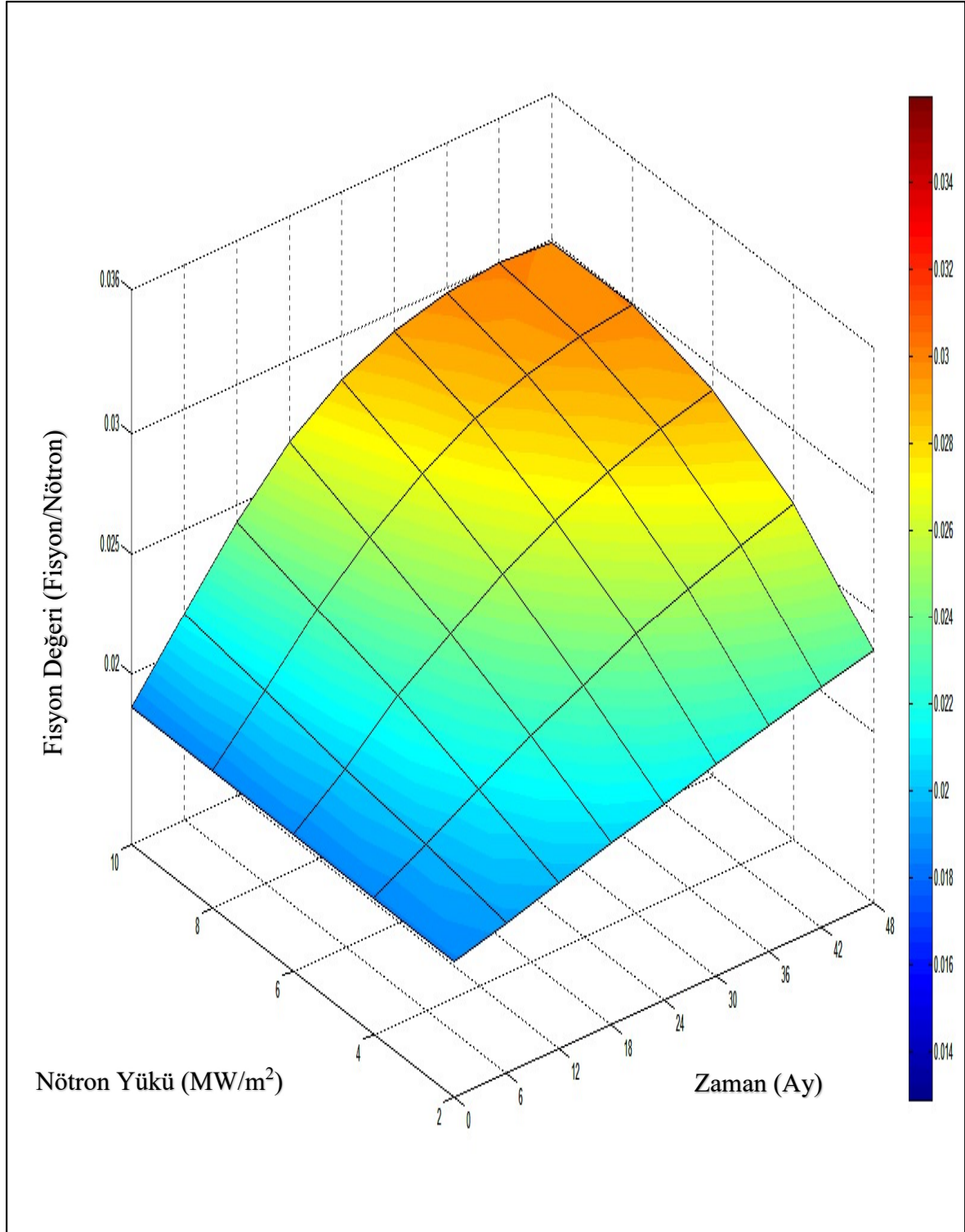
Hibrid reaktör yakıt bölgesinde üretilen enerji fisyon enerjisi olarak açığa çıkmaktadır. Yakıt bölgesinde elde edilen fisyon reaksiyonları kullanılan Doğal Lityum, Flinabe, $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucuları ve 2 MW/m^2 , 4 MW/m^2 , 6 MW/m^2 , 8 MW/m^2 , 10 MW/m^2 nötron duvar yükleri için elde edilen fisyon değerleri zamana bağlı olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada 10 sıra yakıt çubuğundan en baştaki (sıra#1), ortadaki (sıra#5), en sondaki (sıra#10) yakıt çubukları seçilerek incelenmiştir. Böylece reaktördeki yakıt çubuğu bölgesindeki bütün yakıt çubuklarının incelenmesine gerek kalmadan istenilen veriler reaktörün tamamı için elde edilecektir. Ayrıca blanketteki 10 sıra yakıt çubuğu dizilişlerine bağlı olarak elde edilen fisyon oranları ilk yakıt çubuğu bölgesinden son sıradaki yakıt çubuğuna doğru fisyon oranları nötron akılarına bağlı olarak radyal yönde bir azalma gösterecektir. İşlem zamanı boyunca farklı soğutuculara sahip blankette meydana gelen fisyon reaksiyonları ve fisyon reaksiyonlarının önemli bir miktarını oluşturan üretken yakıtlarında (n,f) reaksiyonları sonucu artmasından dolayı fisyon güç yoğunluğunun artışına neden olmaktadır.

Şekil 5.1 ile Şekil 5.9 aralığında Doğal Lityum, Flinabe, $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutuculu hibrid blankette elde edilen fisyon değerlerinin zaman ve nötron duvar yüküne bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Grafikler matematiksel olarak her bir soğutucu için ayrı şekilde, araştırılan sıra dizilerinin içindeki en yüksek ve en düşük fisyon değerlerine göre ölçeklendirilmiştir. Örnek olarak her bir soğutucu için sıra#1' deki en yüksek değer grafiklerdeki en üst nokta, sıra# 10' daki en alt değer ise grafiklerin başlangıç noktası kabul edilmiştir. Bu ölçeklendirme işlemi sayesinde fisyon değerlerinin değişimi daha kolay incelenmiştir.



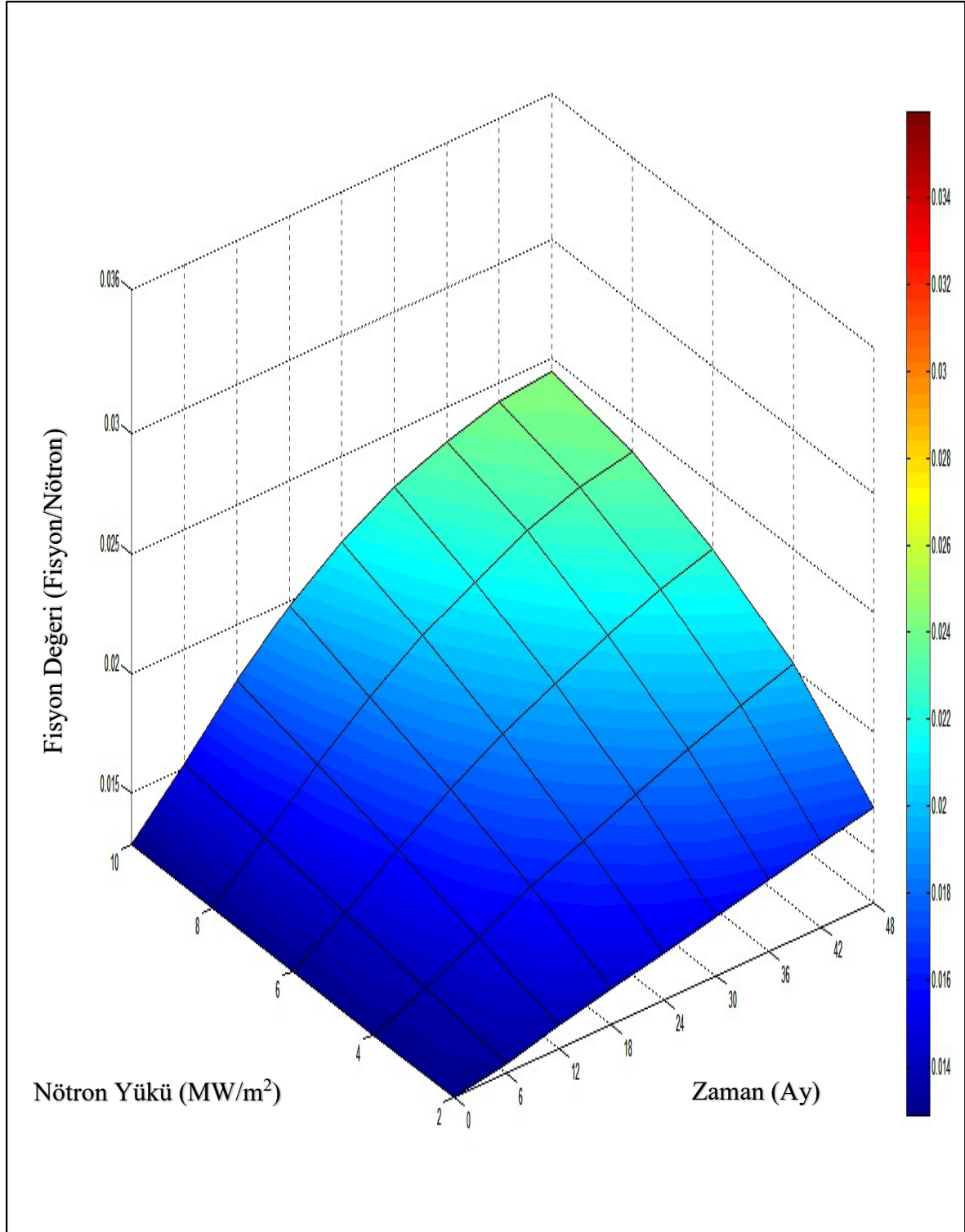
Şekil 5.1. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1’ de üretilen fisyon değerleri

Şekil 5.1’ de Doğal Lityum soğutucusunun kullanılmasıyla oluşan fisyon değerlerinin zamana ve nötron duvar yüküne bağlı değişimi sıra#1 bölgesi için gösterilmiştir. Blankette ilk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda maksimum fisyon değeri 48 aylık işlem zamanı sonunda 0.036 f/nötron değerindedir.



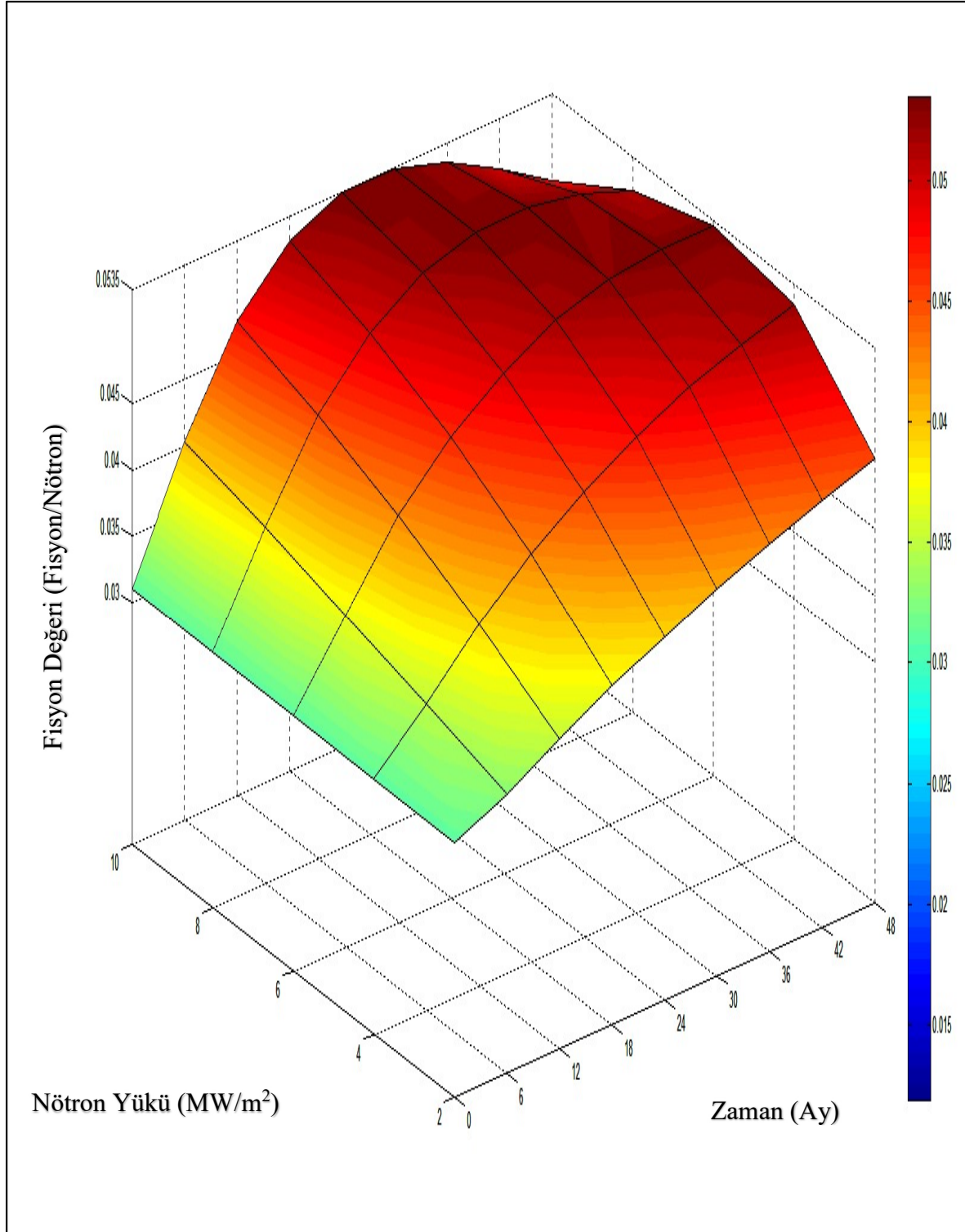
Şekil 5.2. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5’ de üretilen fisyon değerleri

Şekil 5.2’ de Doğal Lityum soğutucusunun kullanılmasıyla oluşan fisyon değerlerinin zamana ve nötron duvar yüküne bağlı değişimi sıra#5 bölgesi için gösterilmiştir. Blankette orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 aylık işlem zamanı sonunda elde edilen maksimum fisyon değeri 0,029 f/nötrondur.



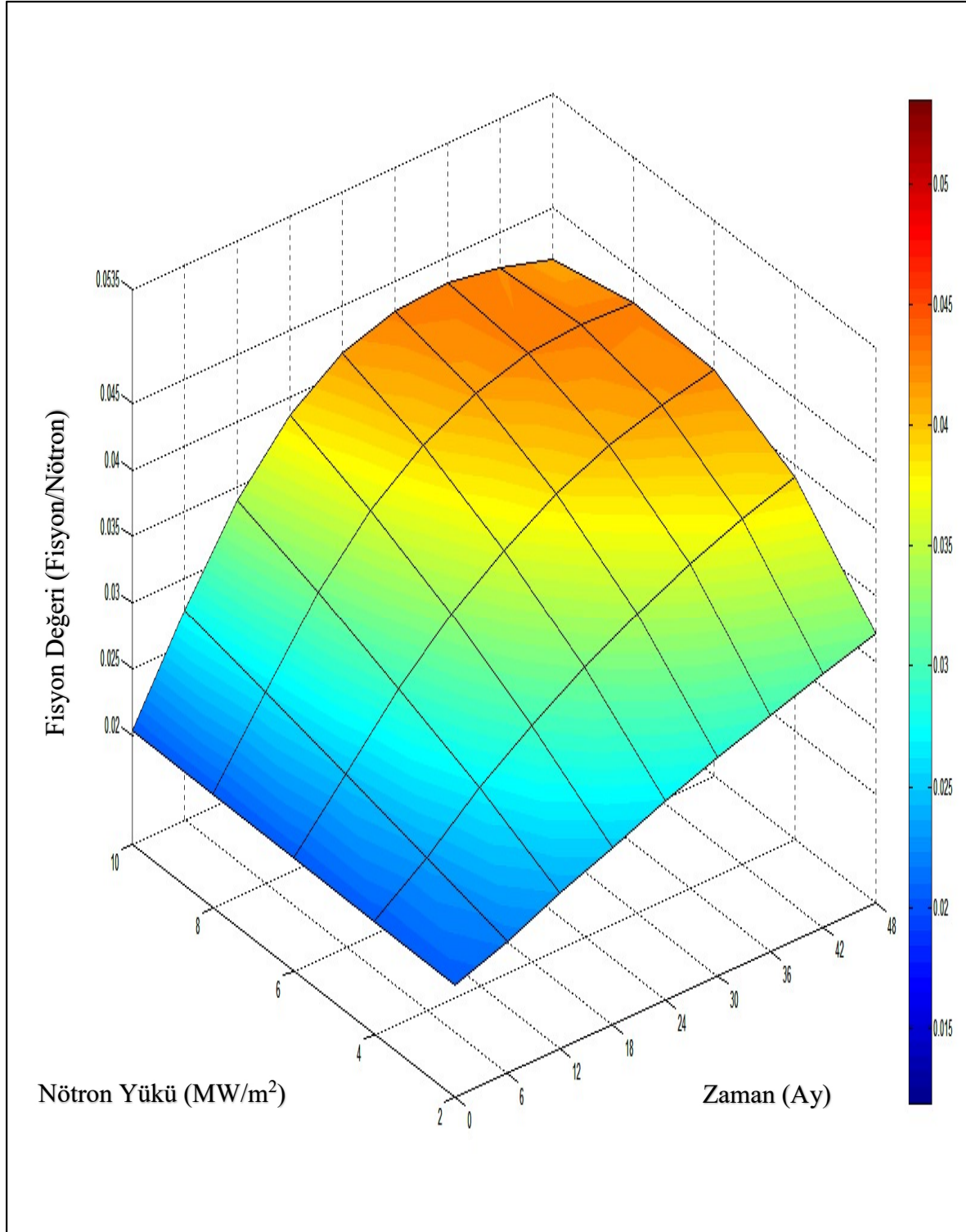
Şekil 5.3. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10'da üretilen fisyon değerleri

Şekil 5.3' de Doğal Lityum soğutucusunun kullanılmasıyla oluşan fisyon değerlerinin zamana ve nötron duvar yüküne bağlı değişimi sıra#10 bölgesi için gösterilmiştir. Blankette son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 aylık işlem zamanı sonunda elde edilen maksimum fisyon değeri 0,024 f/nötrondur.



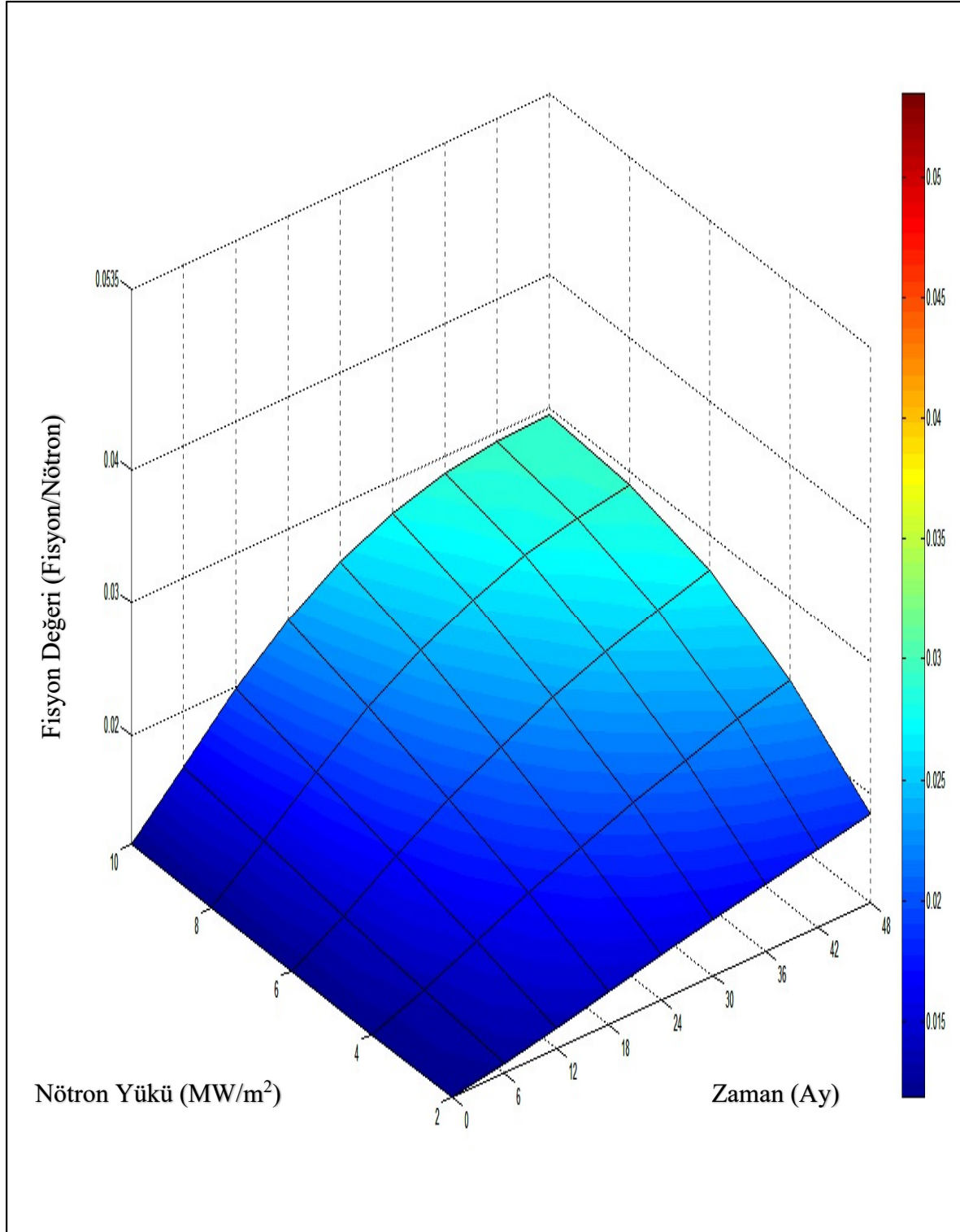
Şekil 5.4. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1’ de üretilen fisyon değerleri

Şekil 5.4’ de Flinabe soğutucusunun kullanılmasıyla oluşan fisyon değerlerinin zamana ve nötron duvar yüküne bağlı değişimi sıra#1 bölgesi için gösterilmiştir. Blankette ilk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 aylık işlem zamanı sonunda elde edilen maksimum fisyon değeri 0,053 f/nötrondur.



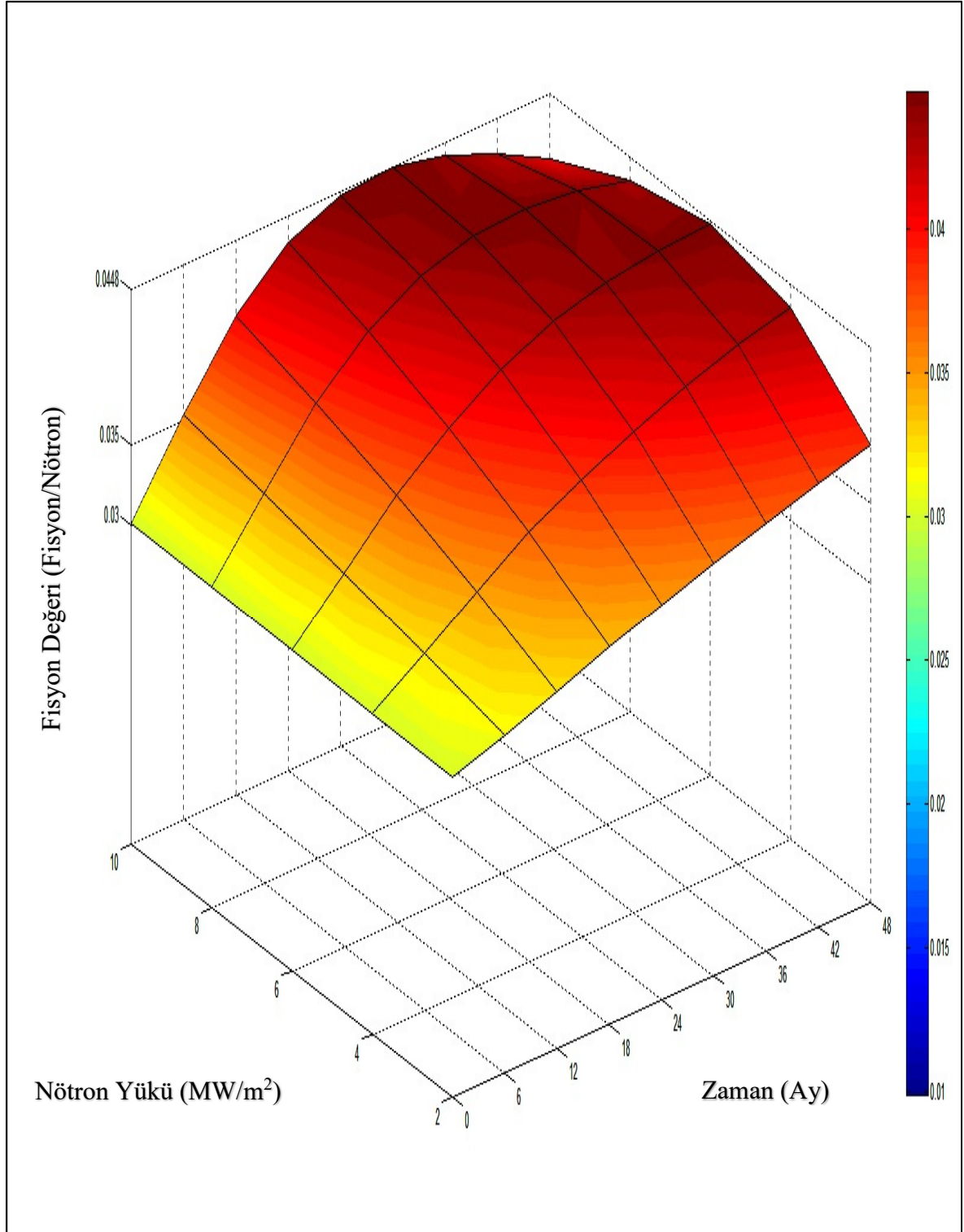
Şekil 5.5. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5’ de üretilen fisyon değerleri

Şekil 5.5’ de Flinabe soğutucusunun kullanılmasıyla oluşan fisyon değerlerinin zamana ve nötron duvar yüküne bağlı değişimi sıra#5 bölgesi için gösterilmiştir. Blankette orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 aylık işlem zamanı sonunda elde edilen maksimum fisyon değeri 0,043 f/nötrondur.



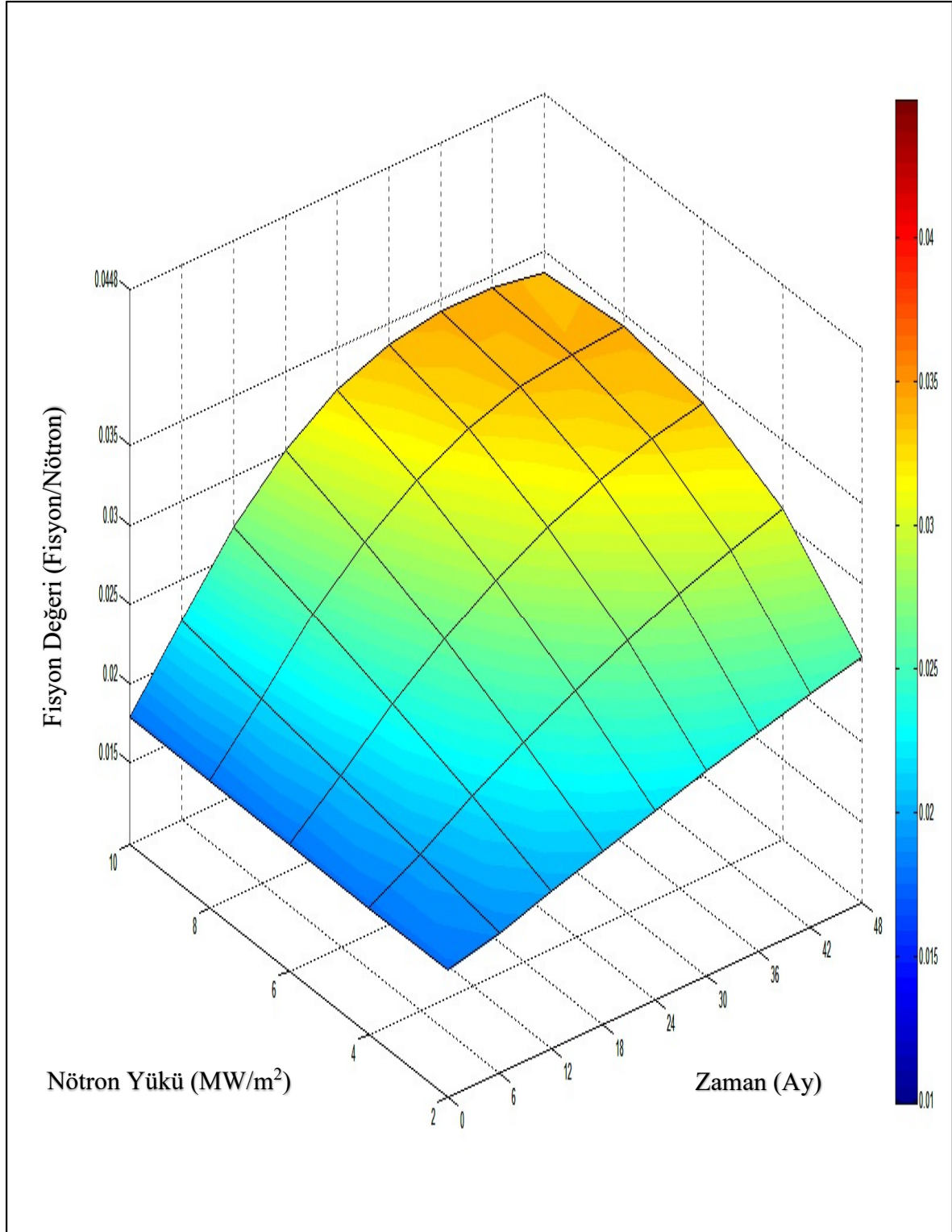
Şekil 5.6. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen fisyon değerleri

Şekil 5.6' da Flinabe soğutucusunun kullanılmasıyla oluşan fisyon değerlerinin zamana ve nötron duvar yüküne bağlı değişimi sıra#10 bölgesi için gösterilmiştir. Blankette son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 aylık işlem zamanı sonunda elde edilen maksimum fisyon değeri 0,029 f/nötrondur.



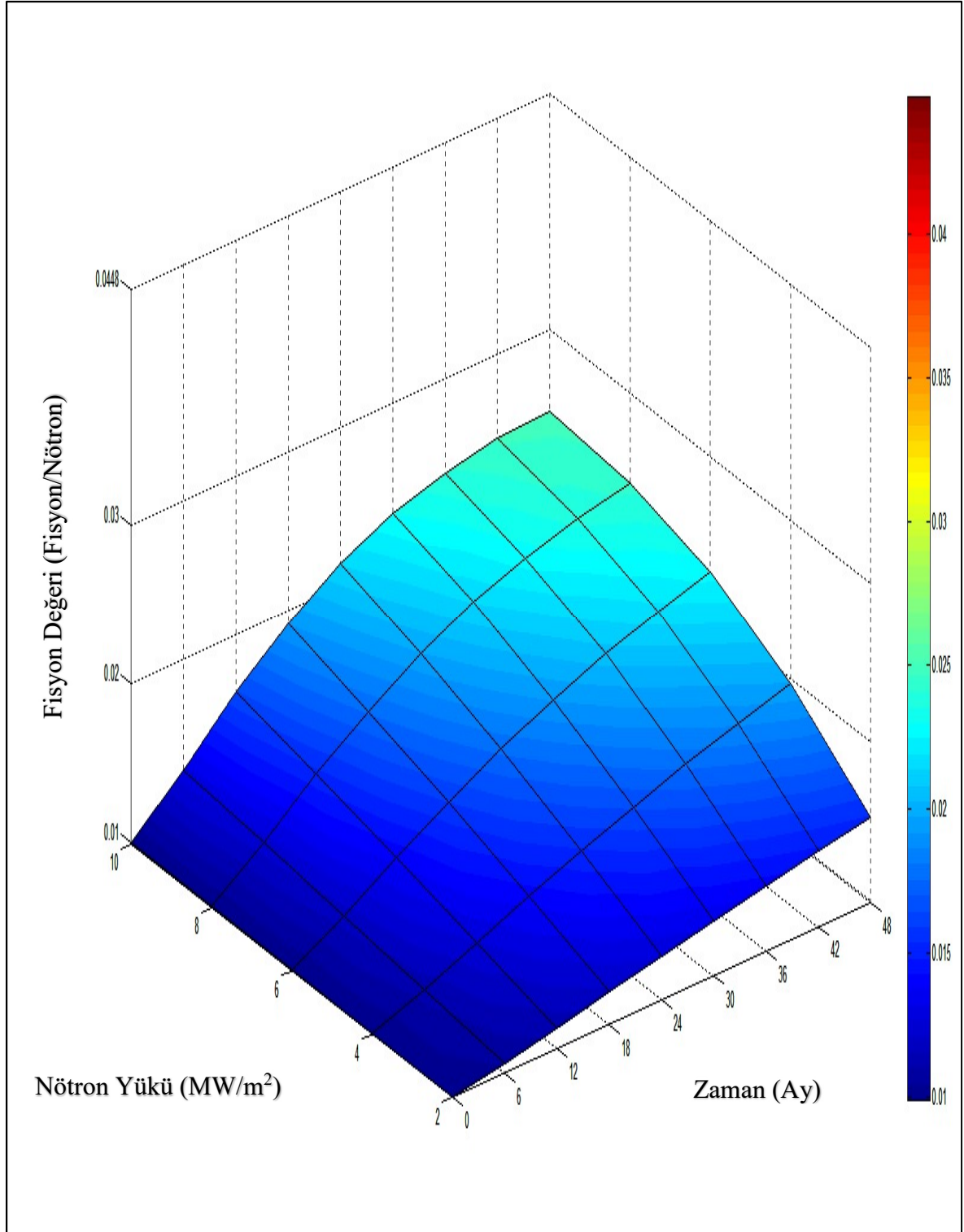
Şekil 5.7. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1’ de üretilen fisyon değerleri

Şekil 5.7’ de $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusunun kullanılmasıyla oluşan fisyon değerlerinin zamana ve nötron duvar yüküne bağlı değişimi sıra#1 bölgesi için gösterilmiştir. Blankette ilk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 aylık işlem zamanı sonunda elde edilen maksimum fisyon değeri 0,045 f/nötrondur.



Şekil 5.8. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5’ de üretilen fisyon değerleri

Şekil 5.8’ de $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusunun kullanılmasıyla oluşan fisyon değerlerinin zamana ve nötron duvar yüküne bağlı değişimi sıra#5 bölgesi için gösterilmiştir. Blankette orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 aylık işlem zamanı sonunda elde edilen maksimum fisyon değeri 0,034 f/nötrondur.



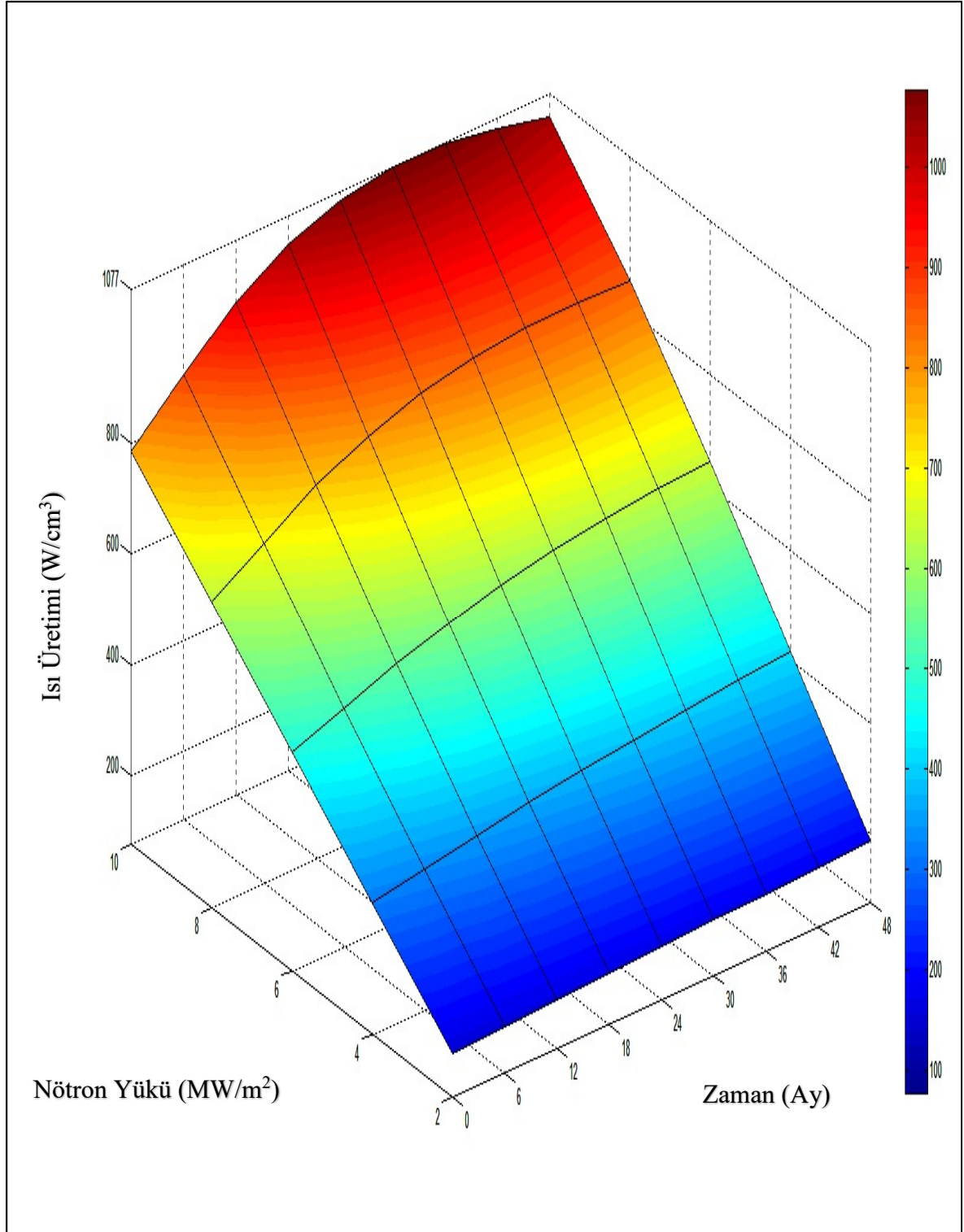
Şekil 5.9. $\text{Li}_2\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen fisyon değerleri

Şekil 5.9' da $\text{Li}_2\text{Sn}_{80}$ soğutucusunun kullanılmasıyla oluşan fisyon değerlerinin zamana ve nötron duvar yüküne bağlı değişimi sıra#10 bölgesi için gösterilmiştir. Blankette son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 aylık işlem zamanı sonunda elde edilen maksimum fisyon değeri 0,025 f/nötrondur.

Grafiklerde en yüksek fisyon değerleri bütün soğutucular için sıra#1 yakıt bölgelerinde elde edilmiştir. Doğal Lityum soğutuculu hibrid blankette fisyon oranları zamana bağlı olarak artış göstermenin yanı sıra, nötron duvar yükleri ile de 8 MW/m^2 ’ye kadar artış göstermektedir. Ancak 10 MW/m^2 nötron duvar yükünde sıra#1 ve sıra#5 için fisyon reaksiyonlarında azalma olmuştur. Flinabe soğutuculu hibrid blanketin grafikleri değerlendirildiğinde ise sıra#1 bölgesi için 36. ay ve sonrasında nötron duvar yüküne bağlı olarak fisyon oranlarında azalma meydana gelmiştir. Sıra#5 bölgesinde ise nötron duvar yüküne bağlı olarak 42. ay ve sonrasında fisyon oranlarında azalma meydana gelmiştir. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutuculu hibrid blanketin fisyon grafikleri değerlendirildiğinde sıra#1 yakıt bölgesinde elde edilen fisyon oranlarında nötron duvar yüklerine bağlı olarak 36.ay ve 42 aylardan sonra azalmalar meydana gelmiştir. Sıra#5 için ise sadece 48. ayda nötron duvar yüküne bağlı olarak azalma meydana gelmiştir. Kullanılan bütün soğutucuların tamamında sıra#10’da elde edilen fisyon oranlarının tamamı zaman ve nötron duvar yüküne bağlı olarak artış göstermektedir. Yakıt bölgesinde elde edilen fisyon reaksiyonları kullanılan Doğal Lityum, Flinabe, $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucuları kendi aralarında değerlendirildiğinde soğutucularda bulunan Li izotopunun fisyon oranlarının üretiminde etkin olduğu görülmektedir. Doğal Lityumda Li izotopu yoğunluğunun yüksek olmasından trityum üretiminin gerçekleşmesinde büyük katkı sağladığından fisyon oranları diğer soğutuculara göre daha düşüktür. En yüksek fisyon oranı Flinabe soğutucusundan elde edilmiştir.

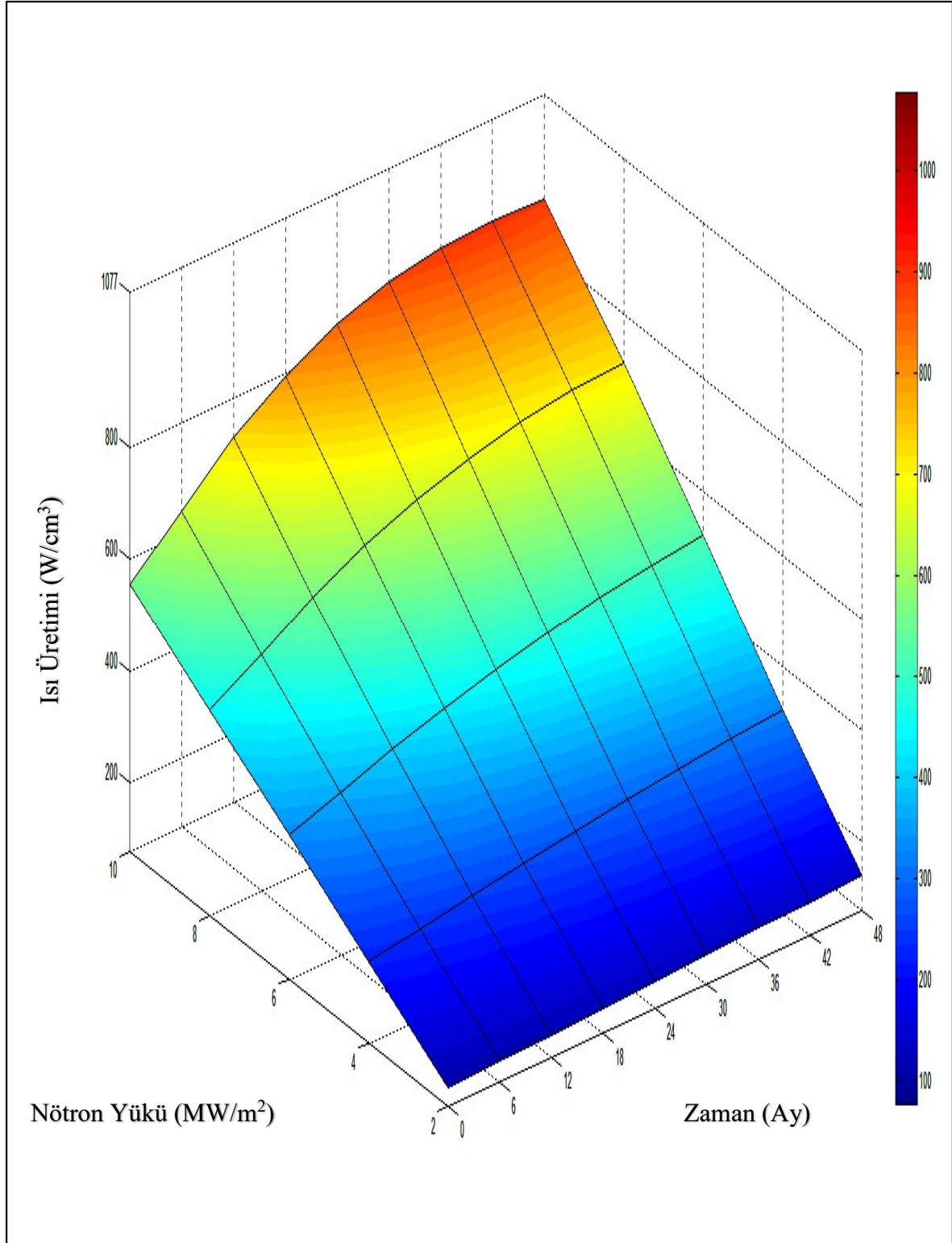
5.2. Isı Üretimi

Hibrid blankette yakıt bölgesinde kullanılan yakıtın, soğutucu ve nötron duvar yüklerine bağlı olarak fisyon üretim değerleri değişmektedir. Elde edilen fisyon ürünleri yakıt bölgesinde ısı üretimini sağlamaktadır. Isı üretimi bir nükleer santral için çok önemlidir, çünkü elde edilen ısı enerjisi ile sıcaklık elde edilir ve bu sıcaklık ile soğutma suyu ısıtılarak elektrik üretimi için buhar elde edilmiş olur. Reaktörde elde edilen ısı üretimi fisyon değerlerine bağlı olarak Eşitlik 4.1’de belirtilen denklemle hesaplanmıştır. Bu çalışmada Doğal Lityum, Flinabe, $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucuları kullanılarak LWR harcanmış yakıtı içeren blanketdeki ısı üretim oranları elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen ısı üretim değerlerinin zaman ve nötron duvar yüklerine bağlı değişimleri Doğal Lityum, Flinabe, $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucuları için Şekil 5.10 ile Şekil 5.18 aralığında gösterilmiştir. Isı üretim değerlerinin grafikleri de fisyon değerlerinin grafiklerinde olduğu gibi matematiksel olarak her bir soğutucu için ayrı şekilde, araştırılan sıra dizilerinin içindeki en yüksek ve en düşük ısı üretim değerlerine göre ölçüleştirilmiştir.



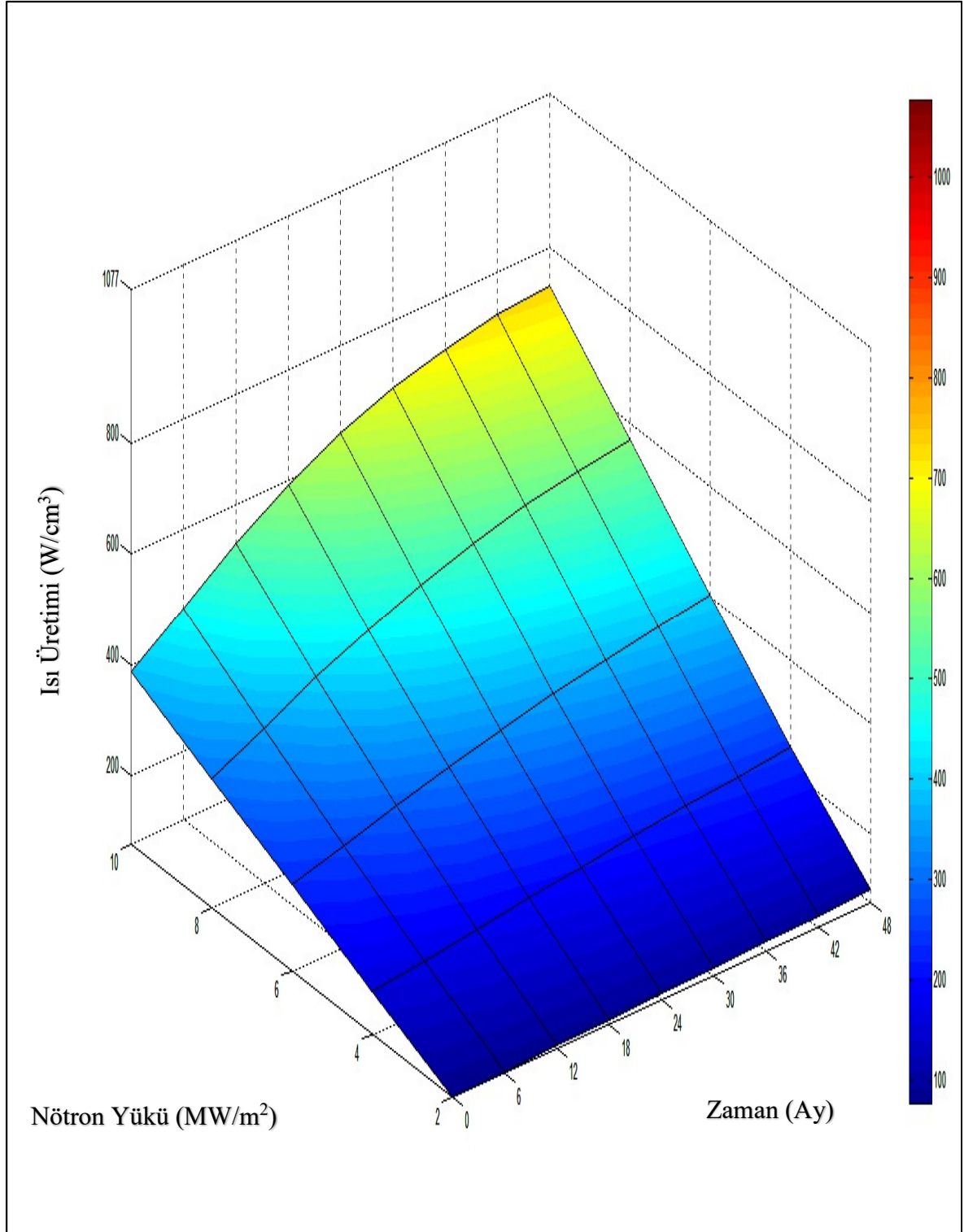
Şekil 5.10. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen ısı değerleri

Şekil 5.10' da Doğal Lityum soğutucusu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen ısı değerlerinin zamana ve nötron yüklerine göre değişim grafiği verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 ay işlem zamanı sonunda elde edilen en yüksek ısı üretim değeri 1077 W/cm^3 'tür.



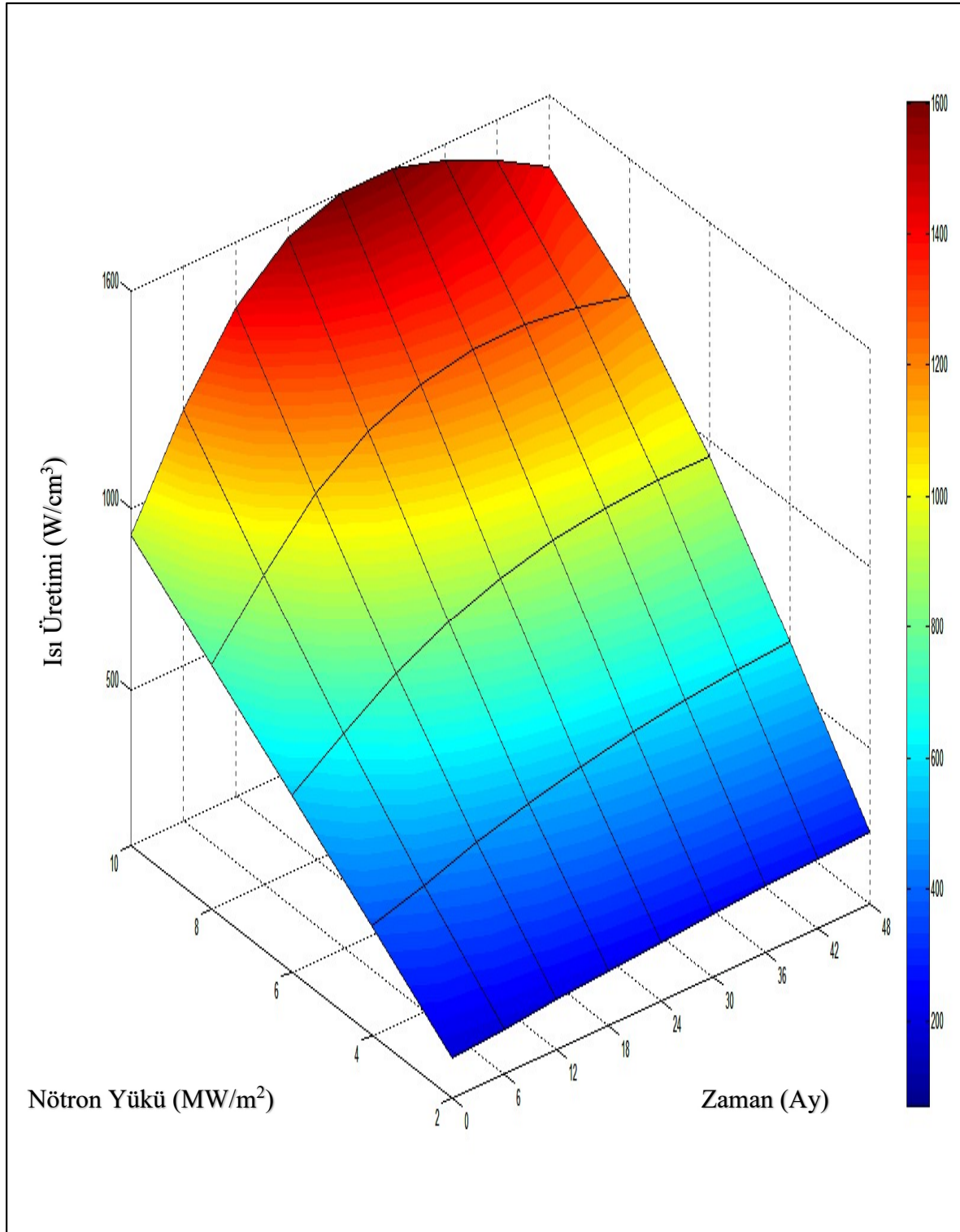
Şekil 5.11. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen ısı değerleri

Şekil 5.11' de Doğal Lityum soğutucusu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen ısı değerlerinin zamana ve nötron yüklerine göre değişim grafiği verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 ay işlem zamanı sonunda elde edilen en yüksek ısı üretim değeri 897 W/cm^3 'tür.



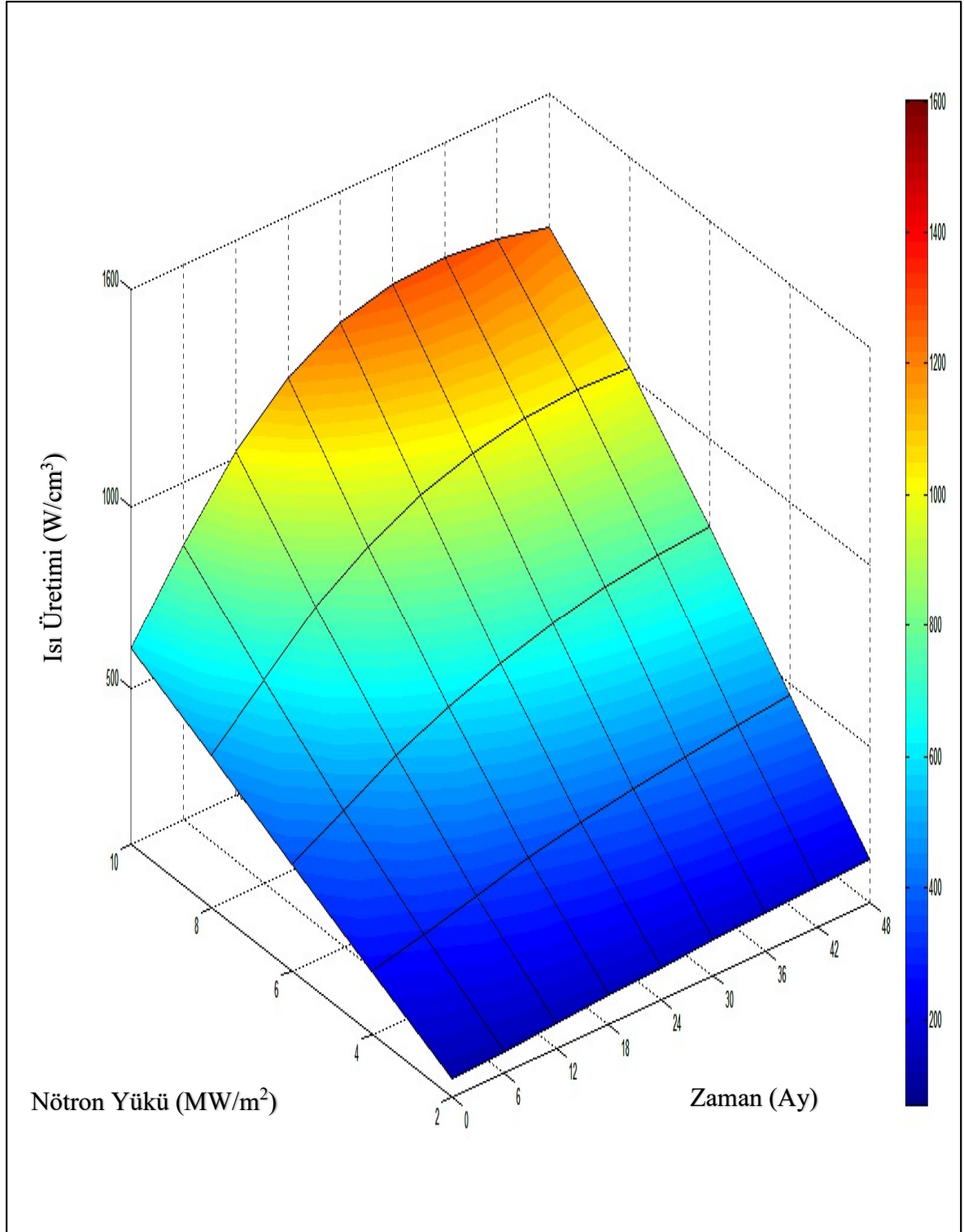
Şekil 5.12. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen ısı değerleri

Şekil 5.12' de Doğal Lityum soğutucusu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen ısı değerlerinin zamana ve nötron yüklerine göre değişim grafiği verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 ay işlem zamanı sonunda elde edilen en yüksek ısı üretim değeri 730 W/cm^3 'tür.



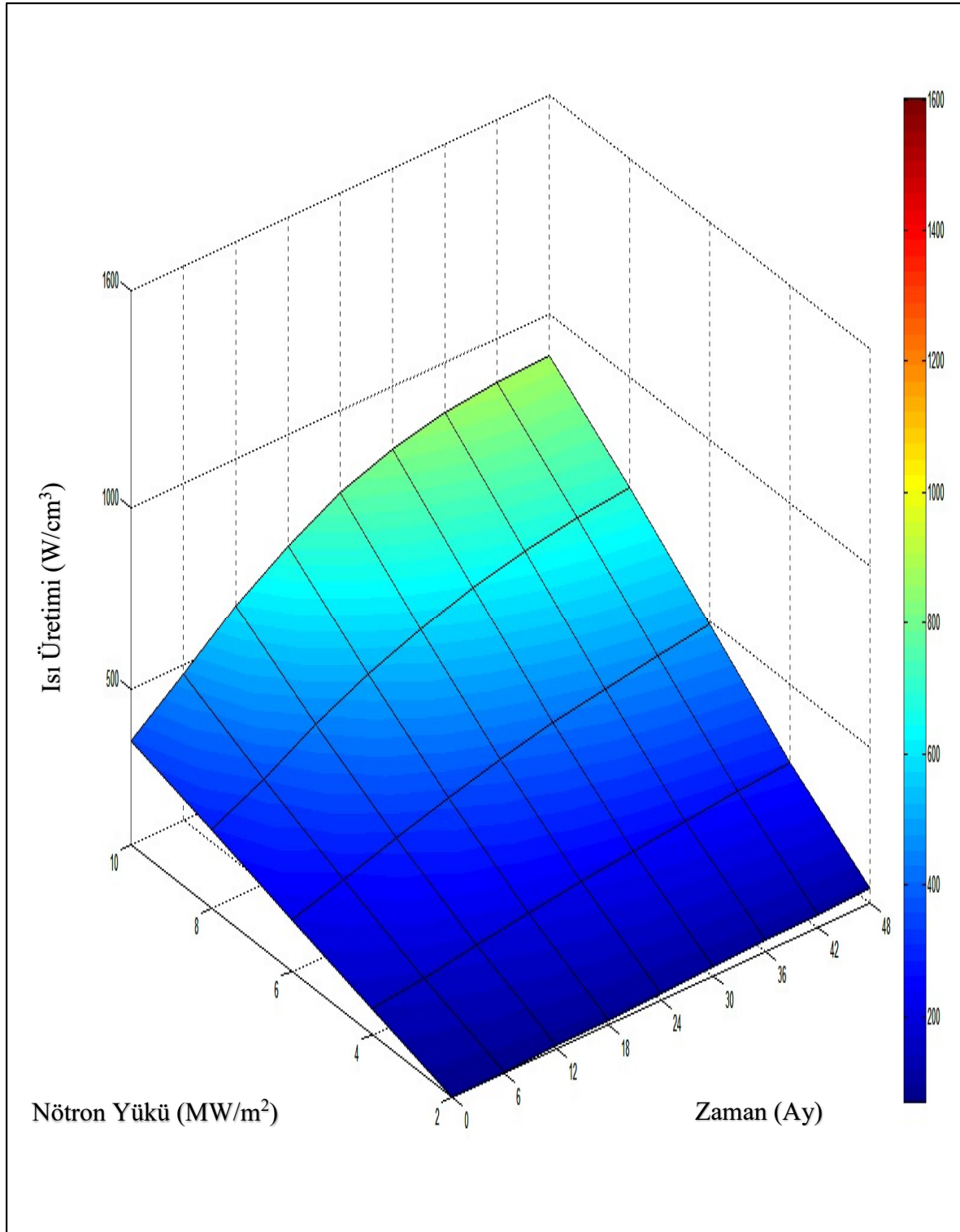
Şekil 5.13. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen ısı değerleri

Şekil 5.13' de Flinabe soğutucusu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen ısı değerlerinin zamana ve nötron yüklerine göre değişim grafiği verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 ay işlem zamanı sonunda elde edilen en yüksek ısı üretim değeri 1600 W/cm^3 'tür.



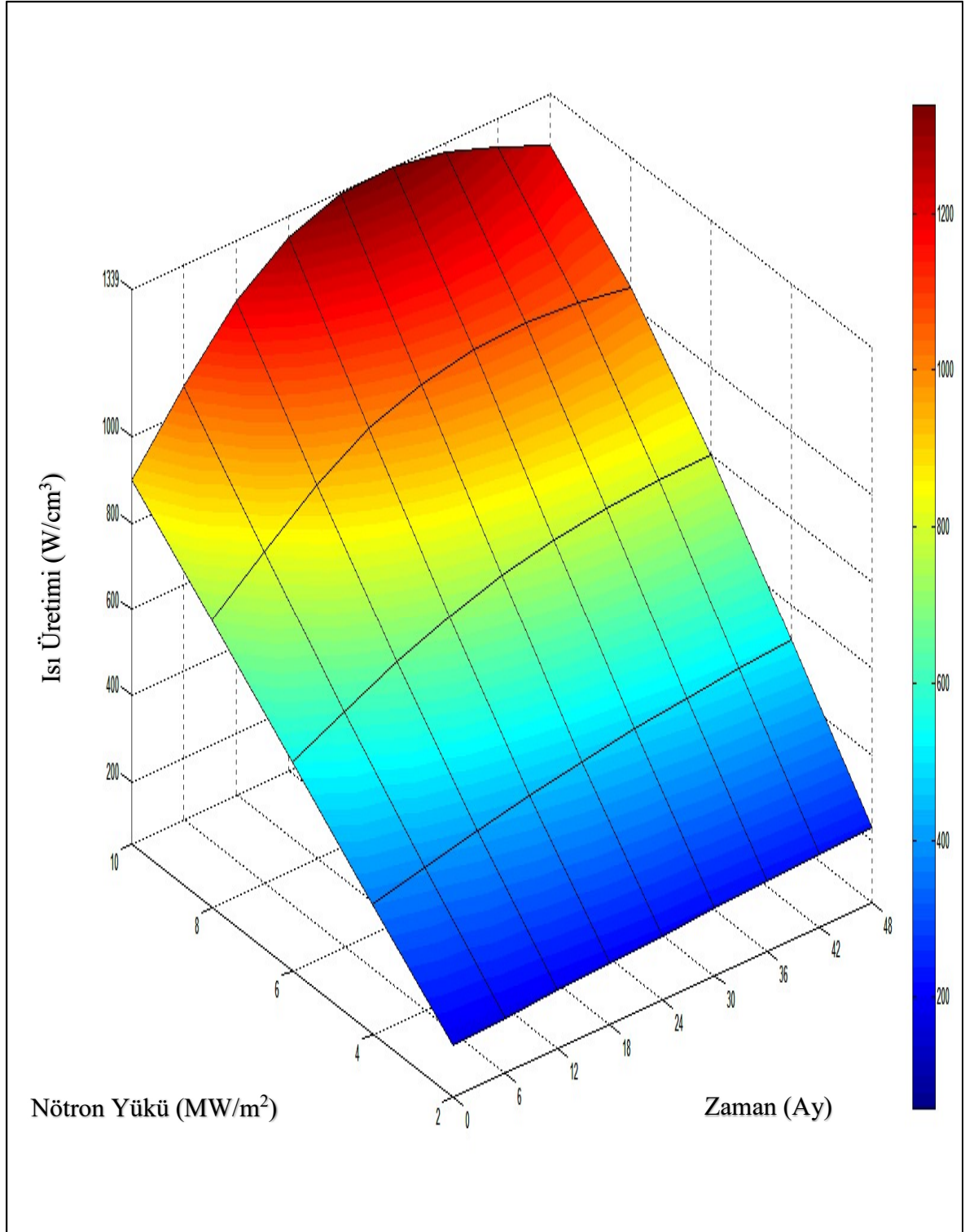
Şekil 5.14. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen ısı değerleri

Şekil 5.14' de Flinabe soğutucusu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen ısı değerlerinin zamana ve nötron yüklerine göre değişim grafiği verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 ay işlem zamanı sonunda elde edilen en yüksek ısı üretim değeri 1286 W/cm^3 'tür.



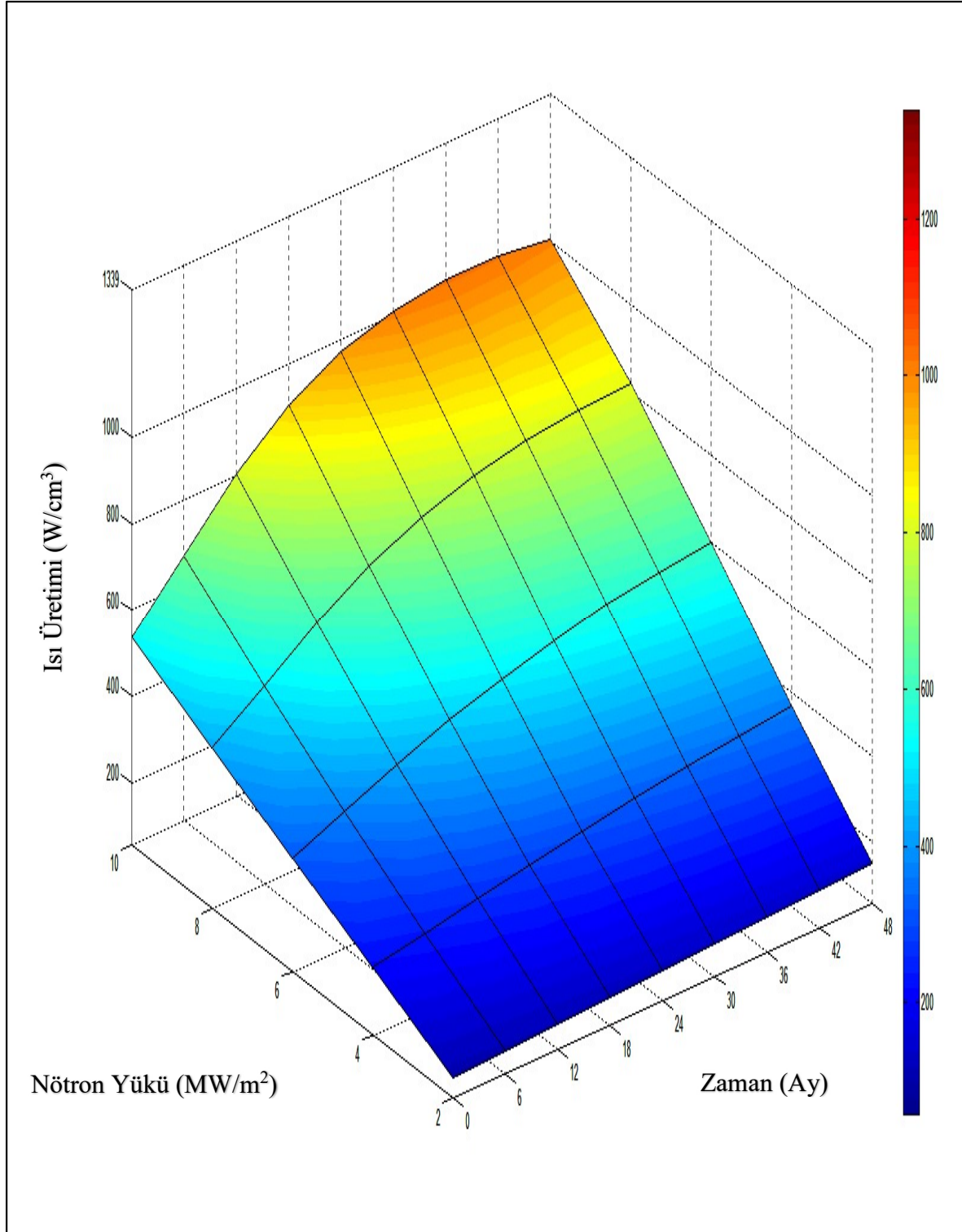
Şekil 5.15. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen ısı değerleri

Şekil 5.15' de Flinabe soğutucusu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen ısı değerlerinin zamana ve nötron yüklerine göre değişim grafiğı verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 ay işlem zamanı sonunda elde edilen en yüksek ısı üretim değeri 881 W/cm^3 'tür.



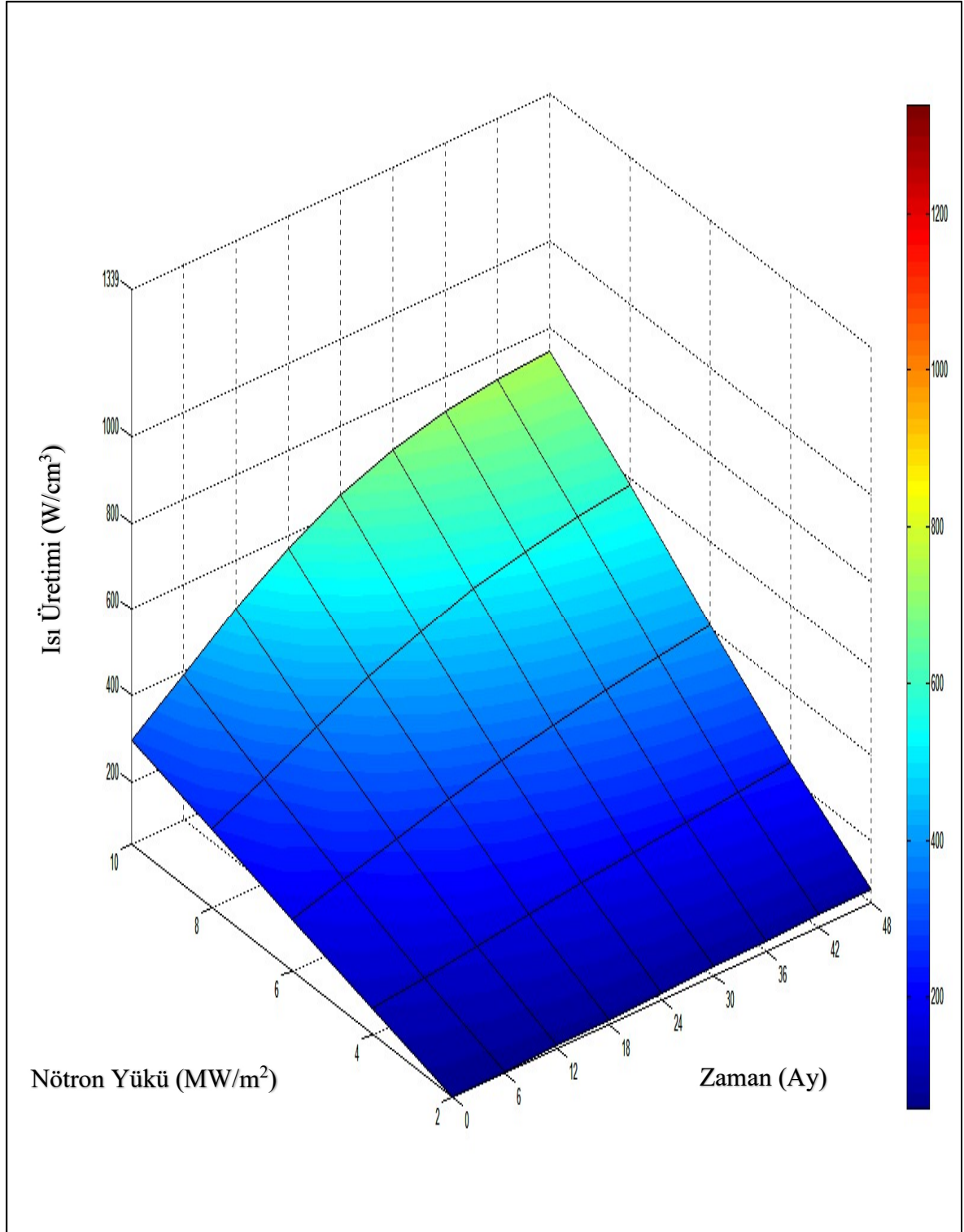
Şekil 5.16. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen ısı değerleri

Şekil 5.16' da $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusu içeren hibrid blankette sıra#1' de üretilen ısı değerlerinin zamana ve nötron yüklerine göre değişim grafiği verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 ay işlem zamanı sonunda elde edilen en yüksek ısı üretim değeri 1339 W/cm^3 'tür.



Şekil 5.17. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen ısı değerleri

Şekil 5.17' de $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusu içeren hibrid blankette sıra#5' de üretilen ısı değerlerinin zamana ve nötron yüklerine göre değişim grafiği verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 ay işlem zamanı sonunda elde edilen en yüksek ısı üretim değeri 1024 W/cm^3 'tür.



Şekil 5.18. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen ısı değerleri

Şekil 5.18' de $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusu içeren hibrid blankette sıra#10' da üretilen ısı değerlerinin zamana ve nötron yüklerine göre değişim grafiği verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 48 ay işlem zamanı sonunda elde edilen en yüksek ısı üretim değeri 746 W/cm^3 'tür.

Grafiklerde ısı üretim oranları arasındaki değişim aylara göre en çok 10 MW/m² nötron duvar yükünde meydana gelmiştir. Isı üretim oranları nötron duvar yüklerine bağlı olarak çalışmanın yapıldığı bütün zamanlar için artmıştır. Isı üretim oranları blankette kullanılan Doğal Lityum, Flinabe, Li₂₀Sn₈₀ soğutucuları için değerlendirildiğinde en yüksek fisyon oranı Flinabe soğutucusunda elde edildiğinden en yüksek ısı üretim oranı da Flinabe soğutucusundan elde edilmiştir. Li₂₀Sn₈₀ soğutucu kullanılan blankette elde edilen ısı üretim oranı Flinabe soğutucu kullanılan blanketi takip etmektedir. Doğal Lityum' da Li izotopu yoğunluğunun yüksek olmasından trityum üretiminin gerçekleşmesinde büyük katkı sağladığından fisyon oranı diğer soğutuculara oranla daha düşük çıkmış, bu da ısı üretiminin diğer soğutuculu blanketlere göre daha az gerçekleşmesine neden olmuştur.

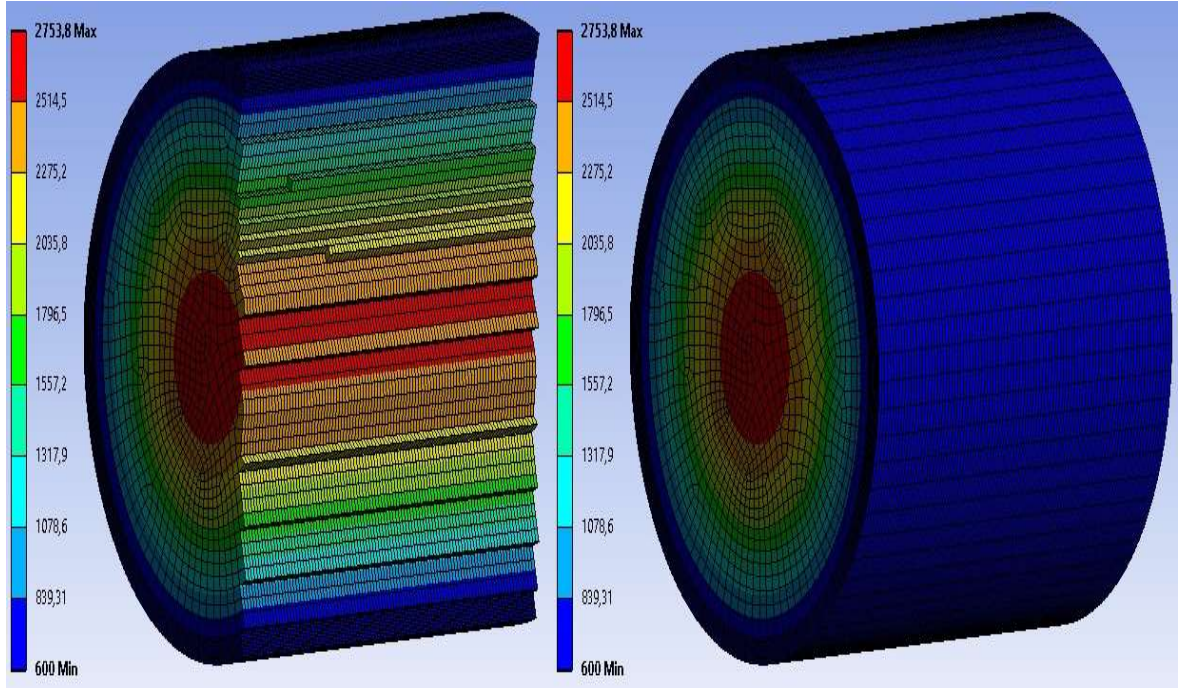
5.3. Yakıt Çubuklarında Sıcaklık Dağılımlarının Analizi

Bu bölümde elde edilen ısı üretim oranlarına bağlı olarak yakıt çubuklarında meydana gelen sıcaklık dağılımları analiz edilmiştir. Bu bölümde elde sonuçlar reaktör tasarımı için önem arz etmektedir. Bu çalışma için bulunan sonuçlar üç bölüm halinde çalışması yapılan üç farklı soğutucu akışkan için verilmiştir. Bu çalışma için bulunan sıcaklık dağılımı modellerinde en yüksek sıcaklık değerleri belirlenerek çalışmada uygulanan her bir soğutucu sıcaklığı için zamana göre ve uygulanan nötron yüklerine göre değişim grafikleri çizilmiştir. Çalışmada, maksimum sıcaklıkların referans olarak alınmasının sebebi yakıt ergime sıcaklığına erişilebilirliktir ve karşılaştırmanın yanı sıra reaktör güvenliğinin oluşan bu sıcaklıklara bağlı olmasıdır. Eğer yakıt çubuğunda oluşan maksimum sıcaklık, yakıt ergime sıcaklığını geçer ise reaktörde kazalara neden olabilir. Bu nedenden dolayı, bu çalışmanın esas amacı bu kullanılan soğutucu sıvılar ile ne kadar enerji üretildiğini tespit etmek, bu üretilen enerjiler ile reaktörün sağlıklı ve güvenli bir şekilde çalışıp çalışmayacağını analiz ederek, üzerinde çalışılan bu hibrid reaktör eğer gerçek alanda uygulama imkanı bulursa çeşitli kazalara ve aşırı maliyet oranlarına izin vermeden reaktörün hayata geçirilmesidir.

Sıcaklık dağılımı grafikleri her bir soğutucu için alt bölüm oluşturularak Şekil 5.19 ile Şekil 5.48 aralığında verilmiştir. Bu alt bölümlerde grafikler her sıra için kendi içinde ölçekli olarak çizilmiştir. Örnek olarak sıra#1' de elde edilen sıcaklık değerleri 200 °C, 400 °C, 600 °C sınır şartlarında elde edildiğinden dolayı bu üç sınır şartı için bulunan sonuçlar bir biriyle ölçekli olarak verilmiştir. Ölçeklendirme, sınır şartlarından elde edilen en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri referans alınarak yapılmıştır.

5.3.1. Doğal Lityum soğutucu için sıcaklık dağılımı sonuçları

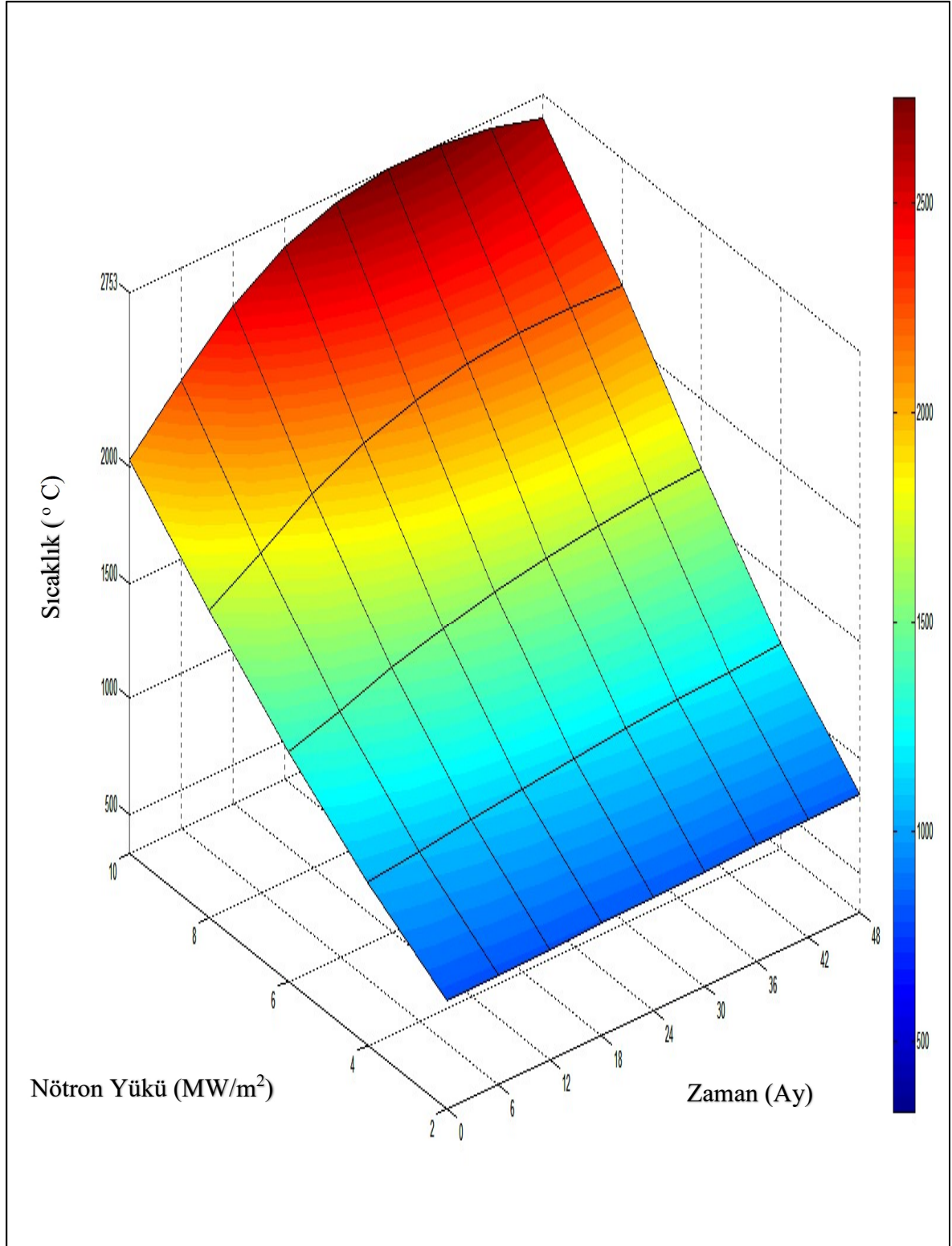
Şekil 5.19’ da bu çalışmada bulunan sıcaklık dağılımlarının sonlu elemanlar metodu yardımıyla ANSYS paket programından elde edilen perspektif görünüşünü veren modellemesi 1077 W/cm^3 ısı üretimi ve 600°C zırh sıcaklığında Doğal Lityum soğutucusu için örnek olarak gösterilmiştir. Şekil 5.19’ de gösterilen bu modeller Doğal Lityum soğutucusunda elde edilen maksimum sıcaklığı vermektedir.



Şekil 5.19. 1077 W/cm^3 ısı üretimi ve 600°C zırh sıcaklığında Doğal Lityum soğutucu için sıcaklık dağılımı

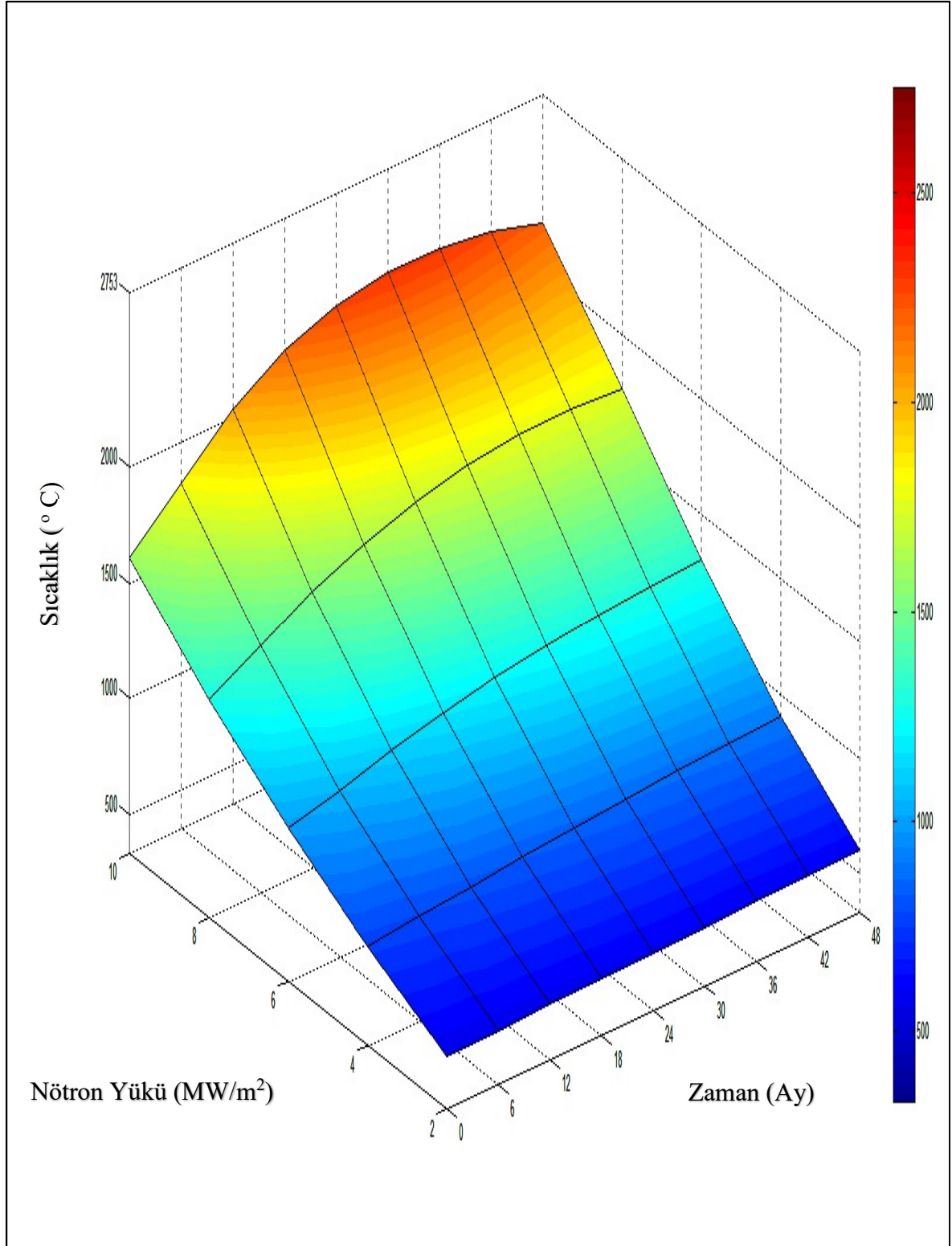
Yakıt çubuklarının hücrelere (mesh) bölünmesi sıcaklık dağılımının en az hatayla hesaplanmasında çok önemlidir. Verilen modelde de görüldüğü gibi bölünen sonlu elaman parçaları birbirine bitişik ve sınır noktaları ve sınır çizgileri birbiriyle düzgün bir şekilde birleşmiştir. Modelde görüldüğü gibi merkez ve kırmızı olan bölgeler maksimum sıcaklığın elde edildiği bölgelerdir ve sıcaklık zırha doğru azalmaktadır. Yakıt çubuğu sıcaklığı, zırh yüzey sıcaklığı 600°C olarak belirlenen sınır şartına kadar değişim göstermektedir.

Bu çalışmada farklı soğutucular ve nötron duvar yükleri için ANSYS paket programı yardımıyla yakıt çubuklarındaki sıcaklık dağılımları sonlu elemanlar metodu yardımıyla belirlenmiştir. Doğal Lityum soğutucu için yakıtlarda oluşan en yüksek sıcaklıkların zamana ve nötron yüklerine göre değişimlerine bakıldığında, en yüksek sıcaklık yakıt çubuğu diziliş sırasına göre sırasıyla, sıra#1’ de, sıra#5’ de ve sıra#10’ da oluşmuştur.



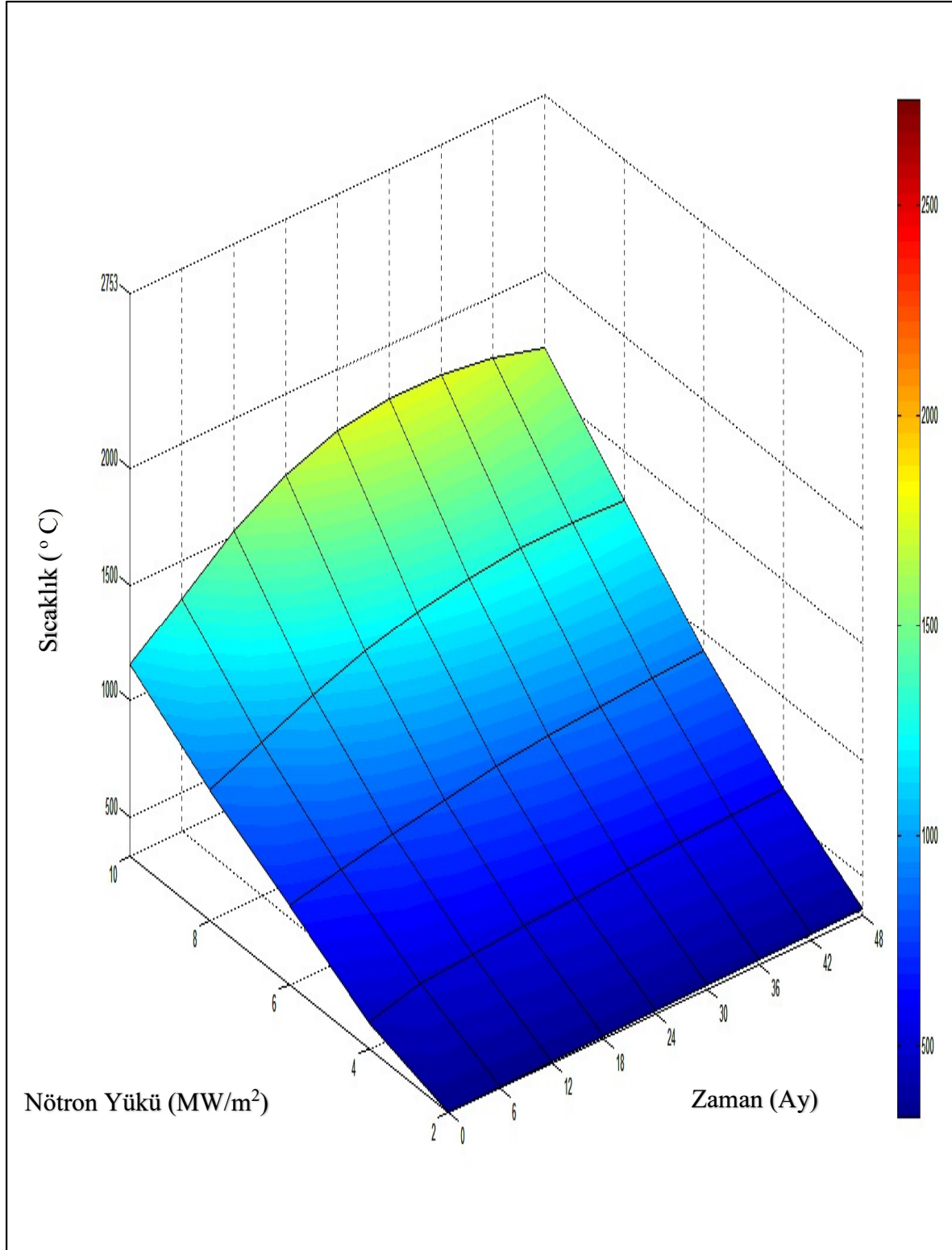
Şekil 5.20. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#1’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.20’ de Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#1’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 600 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 2753 °C’ dir.



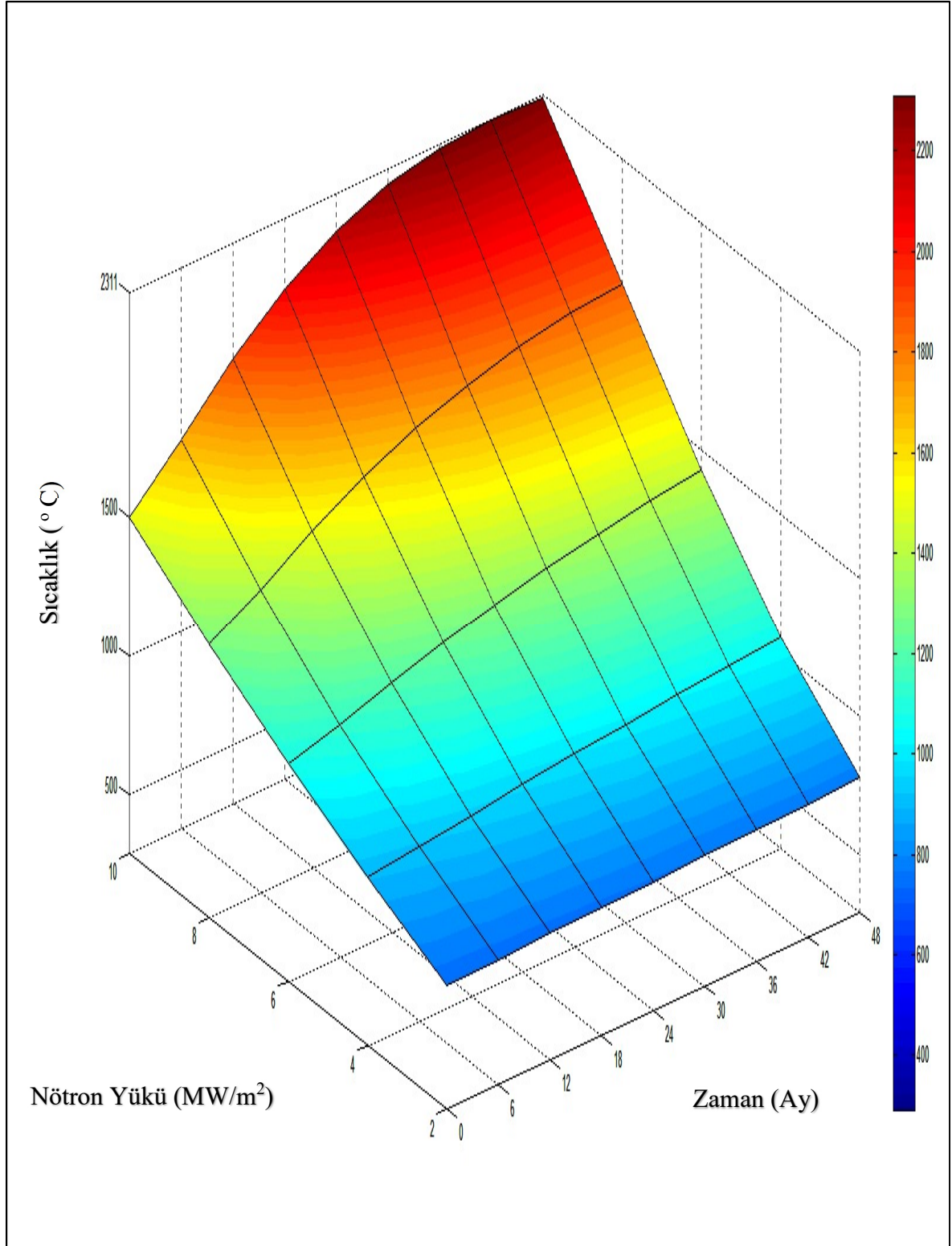
Şekil 5.21. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#1’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.21’ de Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#1’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 400 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 2311 °C’ dir.



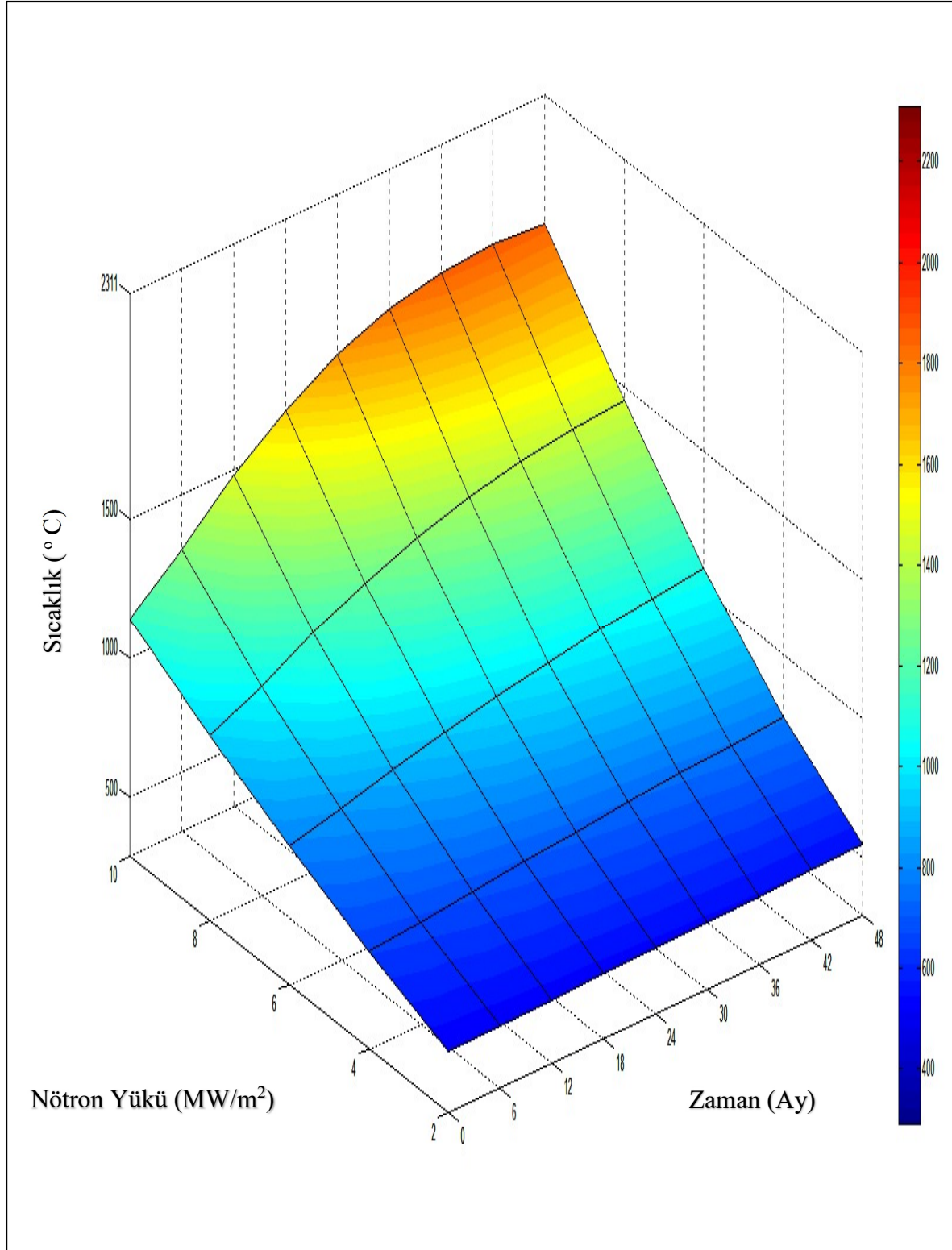
Şekil 5.22. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#1’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.22’ de Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#1’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 200 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 1772 °C’ dir.



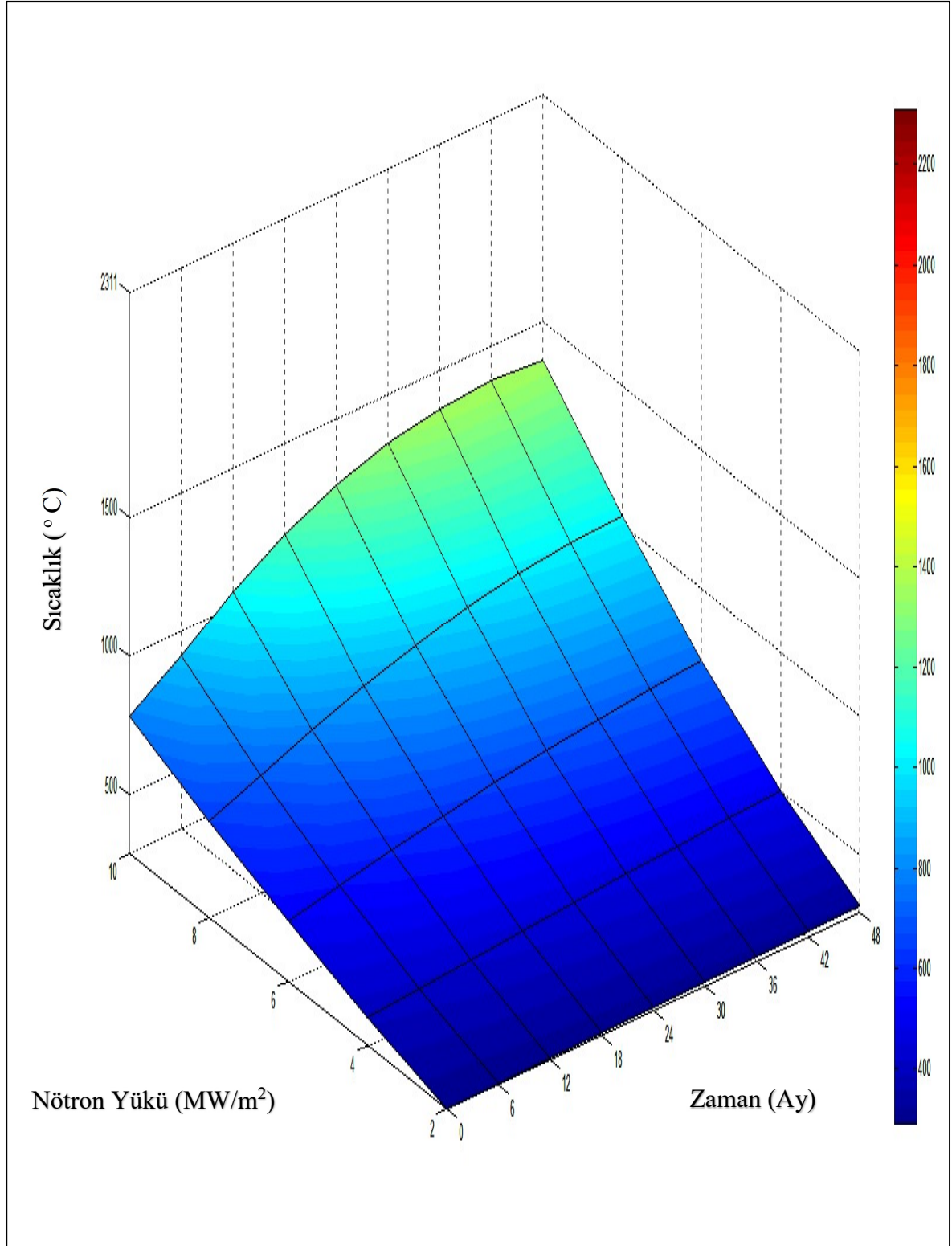
Şekil 5.23. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#5’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.23’ de Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#5’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 600 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 2311 °C’ dir.



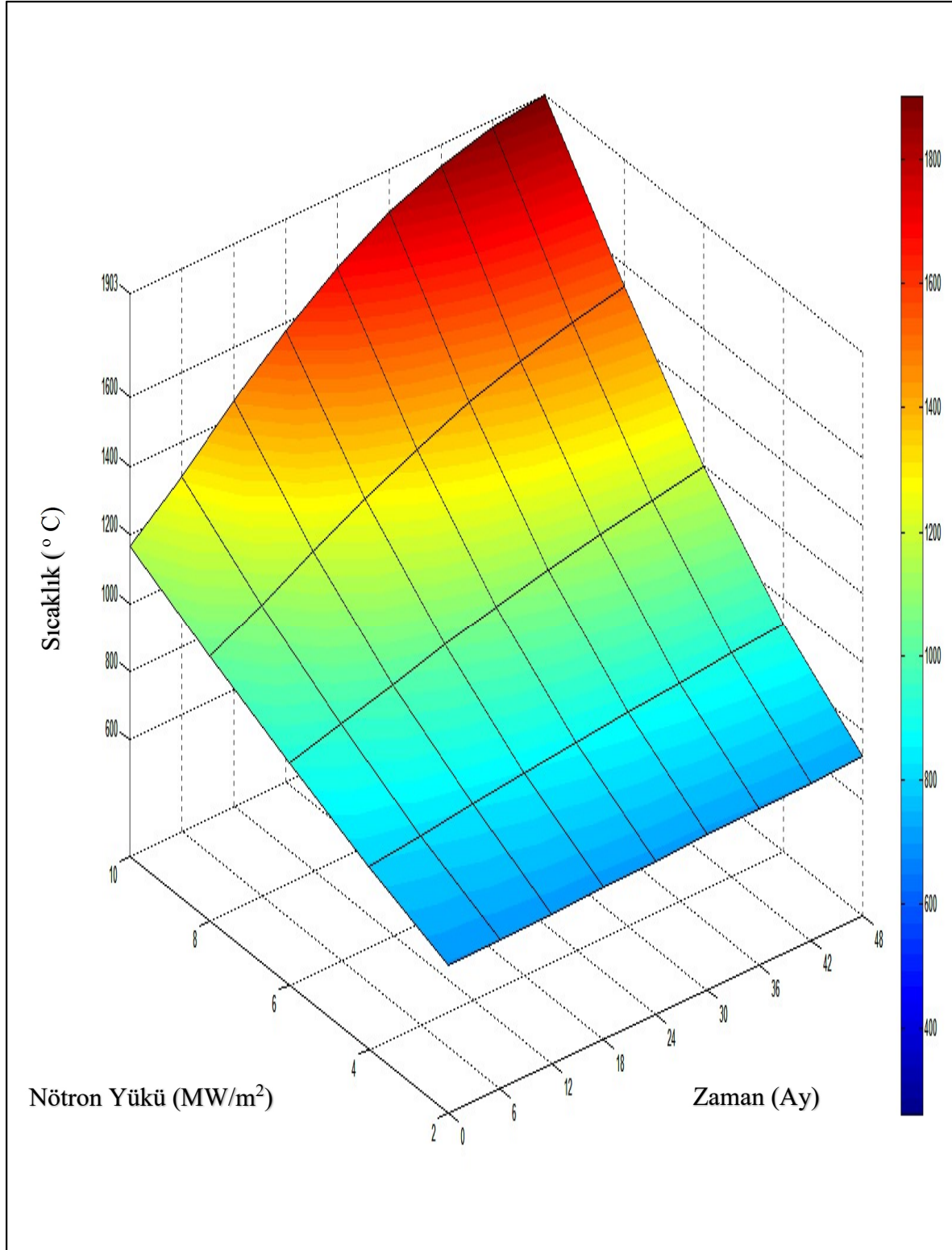
Şekil 5.24. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#5’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.24’ de Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#5’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 400 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 1865 °C’ dir.



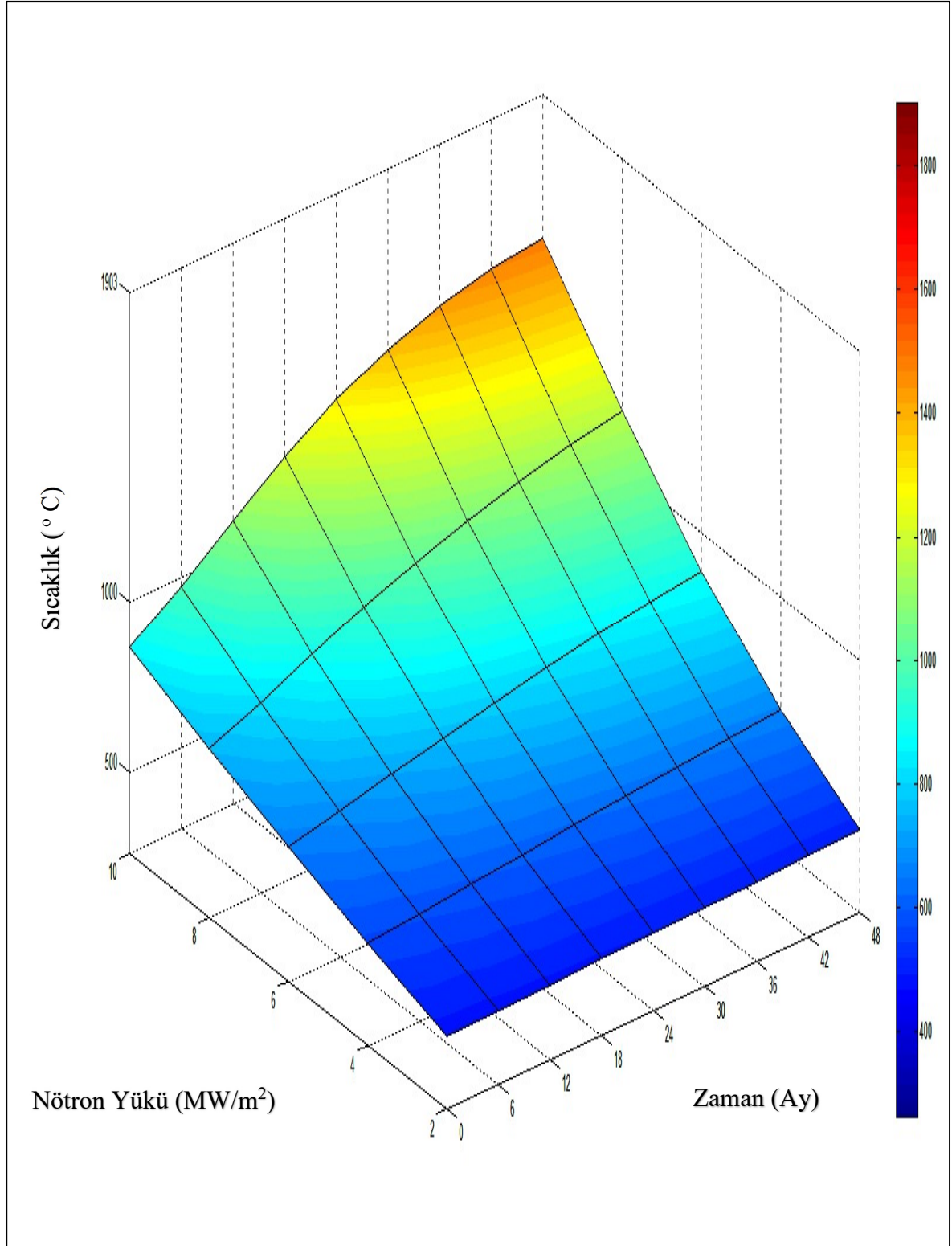
Şekil 5.25. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#5’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.25’ de Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#5’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 200 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 1371 °C’ dir.



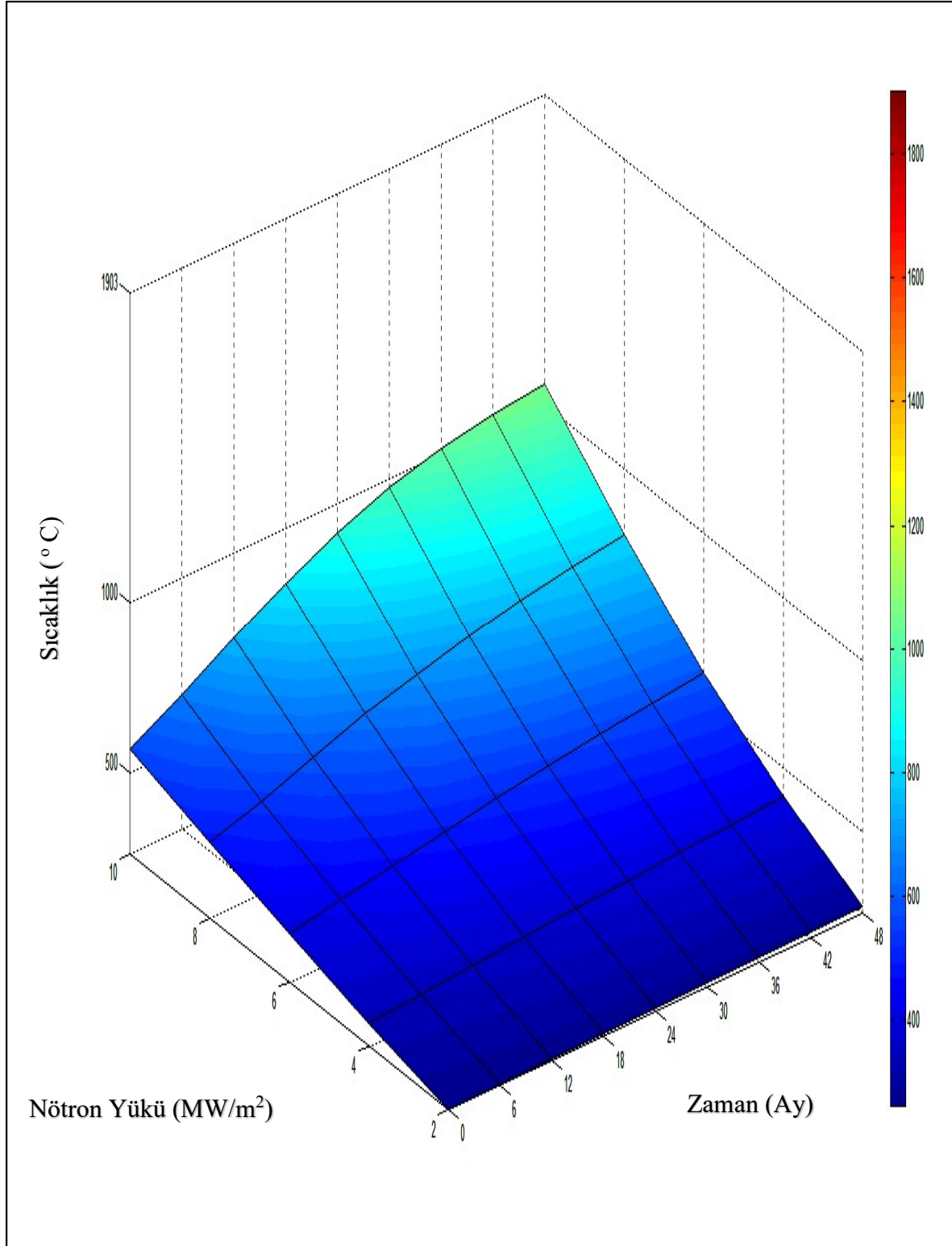
Şekil 5.26. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#10’da sıcaklık dağılımı

Şekil 5.26’ da Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#10’ da elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 600 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 1903 °C’ dir.



Şekil 5.27. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#10’da sıcaklık dağılımı

Şekil 5.27’ de Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#10’ da elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 400 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 1486 °C’ dir.



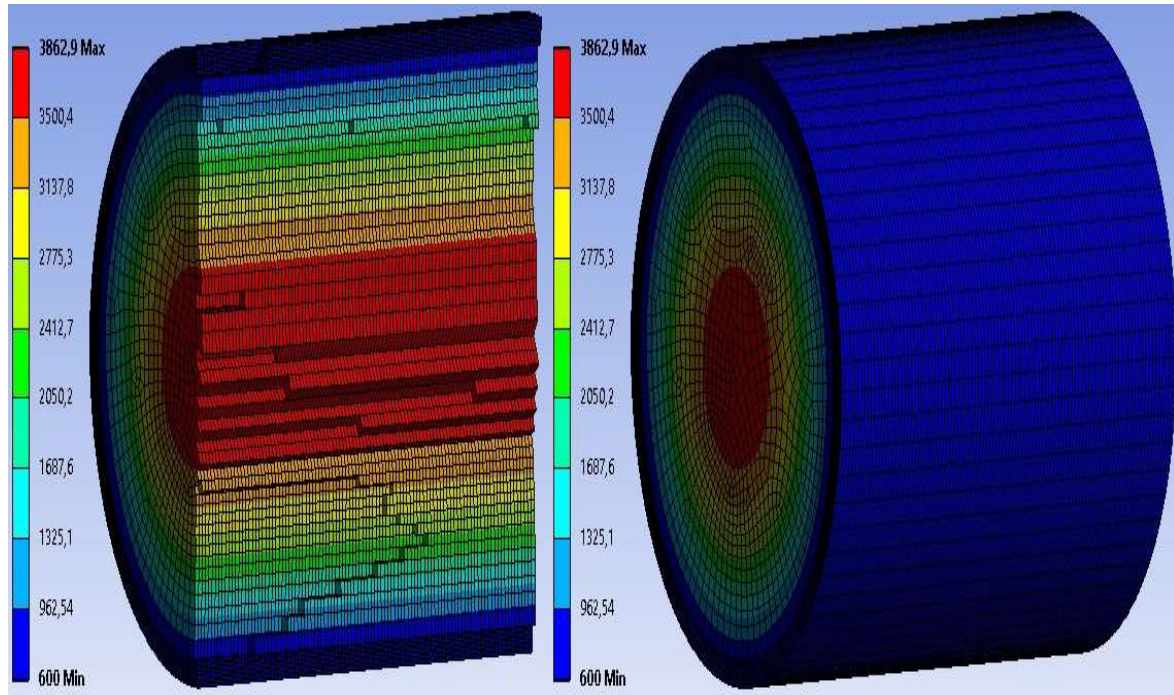
Şekil 5.28. Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#10’da sıcaklık dağılımı

Şekil 5.28’ de Doğal Lityum soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#10’ da elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 200 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 1059 °C’ dir.

Sonuçlar incelendiğinde, en yüksek ısı üretimi ve en yüksek sıcaklık yakıt çubuğu diziliş sırasına göre sıra#1’ de elde edilmektedir. Bunun sebebi nötron duvar yüklerine bağlı nötron akılarıdır. Nötron ilk etki ettiği bölge sıra#1’ de olduğu için fisyon oranı yüksek elde edilmektedir. Bu sebeble sıra#1’ den, sıra#10’ a doğru soğutucuların etkisiyle nötron akısı azalmakta ve fisyon değerlerine direk etki etmektedir. Doğal lityum soğutucusu için yakıt çubuğu diziliş sırasına göre verilen grafikler incelendiğinde en yüksek sıcaklık, yakıt çubuğu yüzey sıcaklığı için belirlenen 200°C, 400°C, 600°C sınır şartlarında 600 °C’ de elde edilmiştir. Sıcaklık dağılımı grafikleri incelendiğinde hem zamana bağlı hem de nötron duvar yükü ile birlikte yakıt çubuklarındaki en yüksek sıcaklıkta artış gözlenmektedir. Sadece sıra#1’ de 10 MW/m² nötron duvar yükünde 36. ay’ dan sonra en yüksek sıcaklık değerlerinde, incelenen üç sınır şartının hepsi için azalma meydana gelmiştir.

5.3.2. Flinabe soğutucu için sıcaklık dağılımı sonuçları

Flinabe soğutuculu bir hibrid reaktörde elde edilen yakıt çubuklarındaki 3 boyutlu sıcaklık dağılımı 1600 W/cm³ ısı üretimi ve 600 ° C zırh sıcaklığında örnek olarak Şekil 5.29’ da verilmiştir.



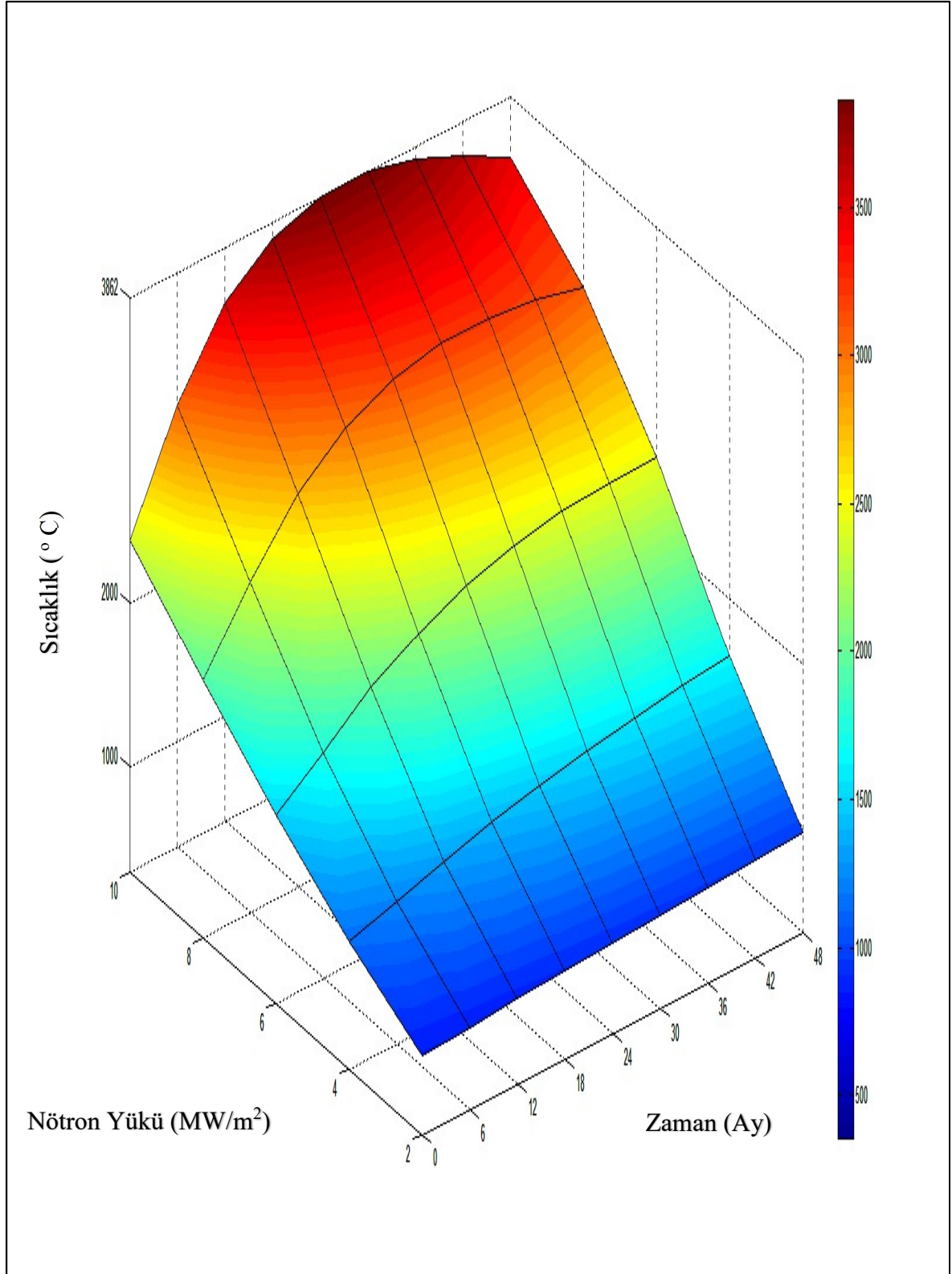
Şekil 5.29. 1600 W/cm³ ısı üretimi ve 600 ° C zırh sıcaklığında Flinabe soğutucu için sıcaklık dağılımı

Şekil 5.29’ da bu çalışmada ulaşılan en yüksek yakıt sıcaklığının oluştuğu yakıt sıcaklık dağılımının sonlu elemanlar metodu yardımıyla ANSYS paket programından elde edilen

perspektif görünüşünü veren modellemesi gösterilmiştir. Yakıt çubuklarının hücrelere (mesh) bölünmesi sıcaklık dağılımının en az hatayla hesaplanmasında çok önemlidir. Verilen modelde de görüldüğü gibi bölünen sonlu elaman parçaları birbirine bitişik ve sınır noktaları ve sınır çizgileri birbiriyle düzgün bir şekilde birleşmiştir. Modelde görüldüğü gibi merkez ve kırmızı olan bölgeler maksimum sıcaklığın elde edildiği bölgelerdir ve sıcaklık zırha doğru azalmaktadır. Yakıt çubuğu sıcaklığı, zırh yüzey sıcaklığı 600 ° C olarak belirlenen sınır şartına kadar değişim göstermektedir.

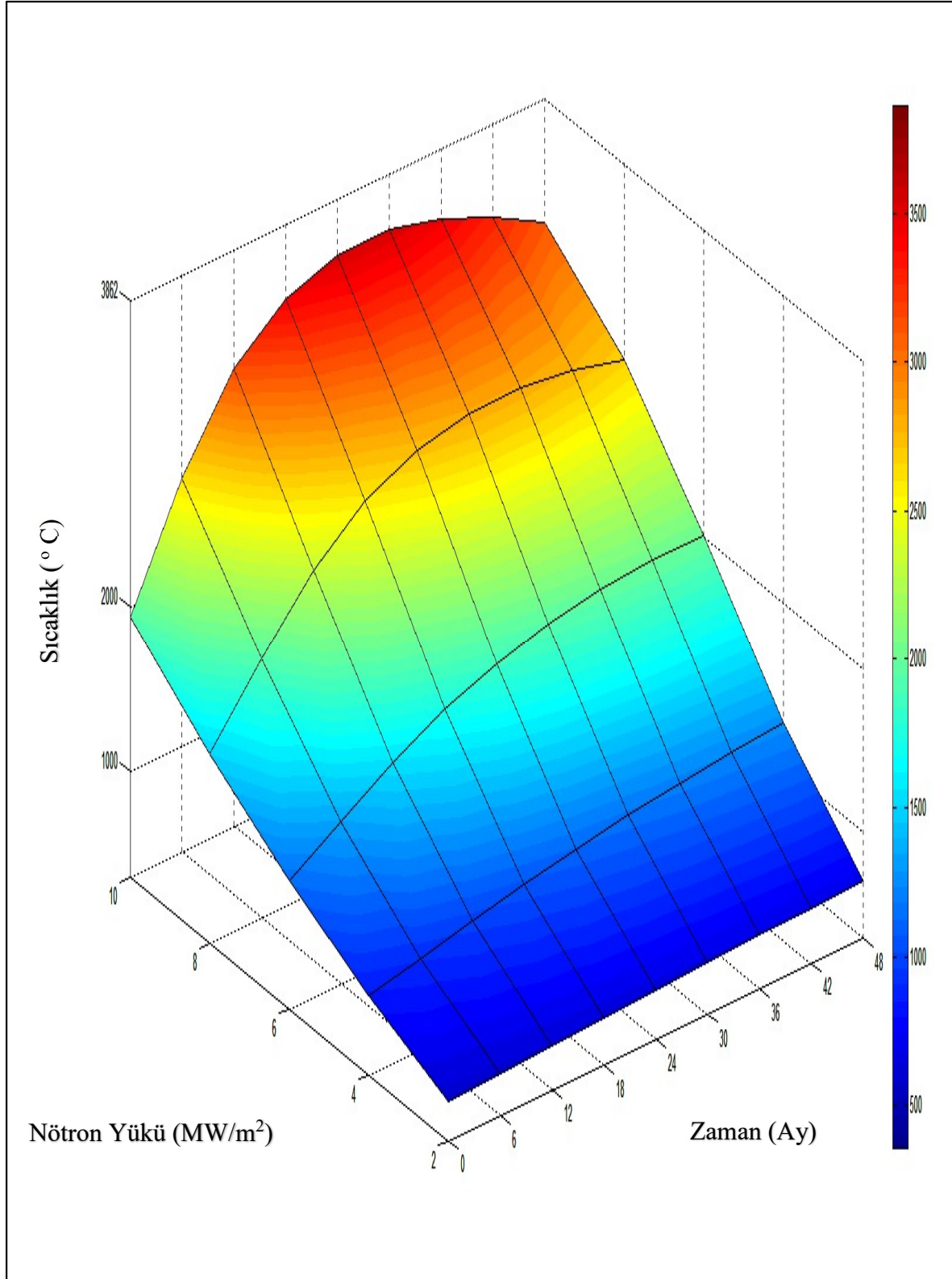
Flinabe soğutucusu için yakıtlarda oluşan en yüksek sıcaklıkların zamana ve nötron yüklerine göre değişimlerine bakıldığında en yüksek sıcaklık yakıt çubuğu diziliş sırasına göre sırasıyla, sıra#1' de, sıra#5' de ve sıra#10'da oluşmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, en yüksek ısı üretimi ve en yüksek sıcaklık yakıt çubuğu diziliş sırasına göre sıra#1' de elde edilmektedir. Bunun sebebi nötron duvar yüklerine bağlı nötron akılarıdır. Nötron ilk etki ettiği bölge sıra#1' de olduğu için fisyon oranı yüksek elde edilmektedir. Bu sebeble sıra#1' den, sıra#10'a doğru soğutucuların etkisiyle nötron akısı azalmakta fisyon değerlerine direk etki etmektedir. Grafikler incelendiğinde en yüksek sıcaklık incelenen sıradaki yakıt çubukları için 200 ° C, 400 ° C, 600°C sınır şartları arasında 600 °C' de elde edilmiştir. Elde edilen grafiklerde hem zamana bağlı hem de nötron duvar yüküne bağlı olarak yakıt çubuğundaki en yüksek sıcaklıkta genel olarak artış gözlenmektedir.

Flinabe soğutucusu bu çalışmadaki en yüksek sıcaklıkları sağlamıştır. Bunun nedeni en yüksek fisyon değerlerinin Flinabe soğutucusunda elde edilmesidir. Flinabe soğutucusu içindeki Lityum elementin yoğunluğu ve bu sebepten dolayı düşük trityum üretimi fisyon üretimini Flinabe soğutuculu hibrid blankette diğer soğutuculara göre en yüksek yapmaktadır. Sıcaklık grafikleri incelendiğinde sıra#1' de sıcaklık değerlerinde, 600 ° C ve 10 MW/m² nötron duvar yükünde 24. ay' dan sonra azalma meydana gelmiştir. Aynı grafikte 8 MW/m² nötron duvar yükünde 36.ay' dan sonra en yüksek sıcaklık değerlerinde azalma meydana gelmiştir. 400 ° C sınır şartı sıcaklığında ise en yüksek sıcaklıklarda 10 MW/m² nötron duvar yükünde 24 aydan sonra, 8 MW/m² nötron duvar yükünde 36. ay' dan sonra 6 MW/m² nötron duvar yükünde ise 42 ay' dan sonra azalma meydana gelmiştir. 200 ° C sınır şartında ise 10 MW/m² nötron duvar yükünde 30 ay' dan sonra, 8 MW/m² nötron duvar yükünde 36. Ay' dan sonra, 6 MW/m² nötron duvar yükünde 42. ay' dan sonra en yüksek sıcaklıklarda azalma meydana gelmiştir. Bu çalışmada en yüksek sıcaklıklar Flinabe soğutucusu kullanılan blankette elde edildiği için en fazla Flinabe soğutucusu incelenmiştir.



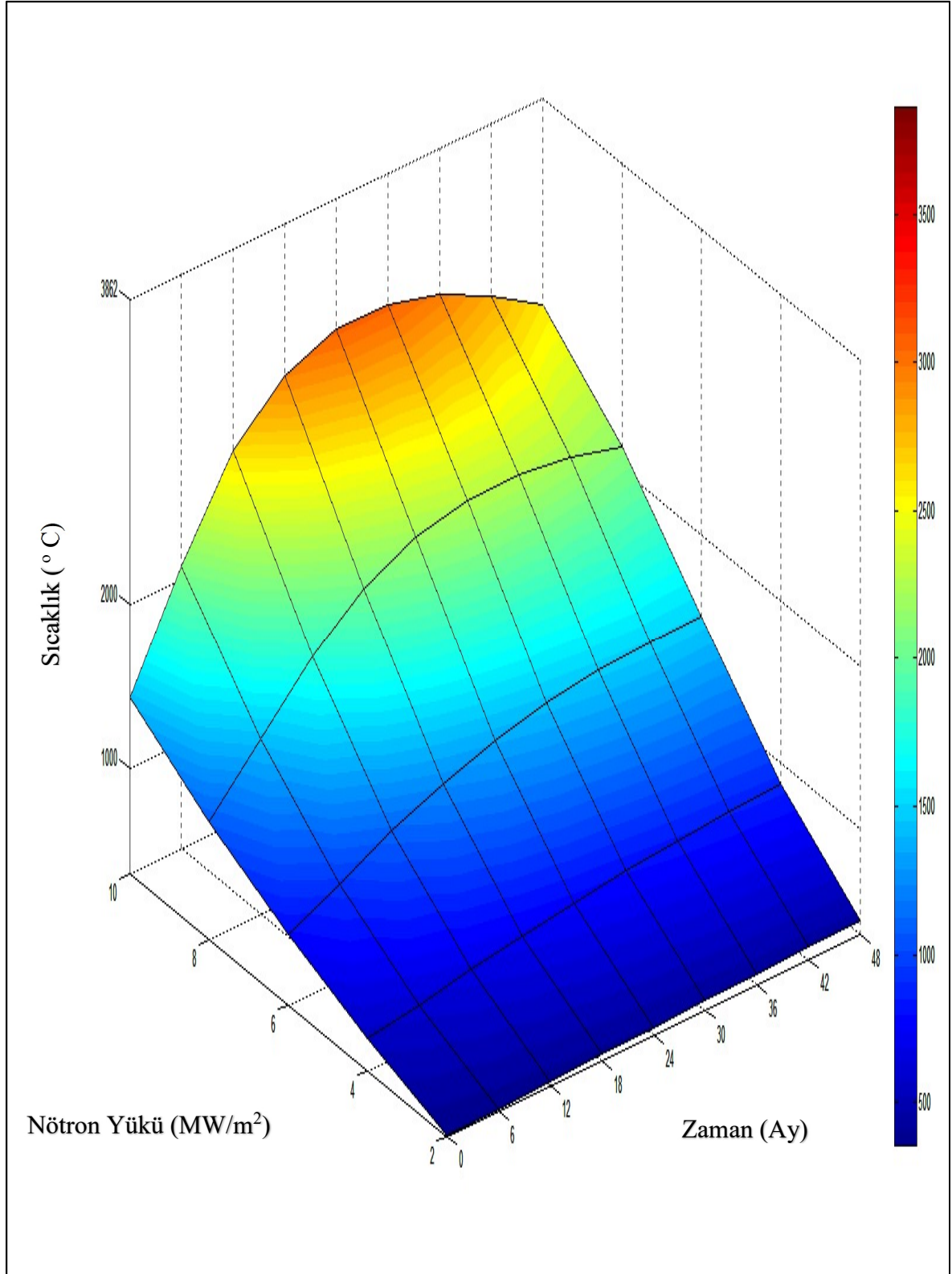
Şekil 5.30. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#1’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.30’ da Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#1’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 600 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 3862 °C’ dir.



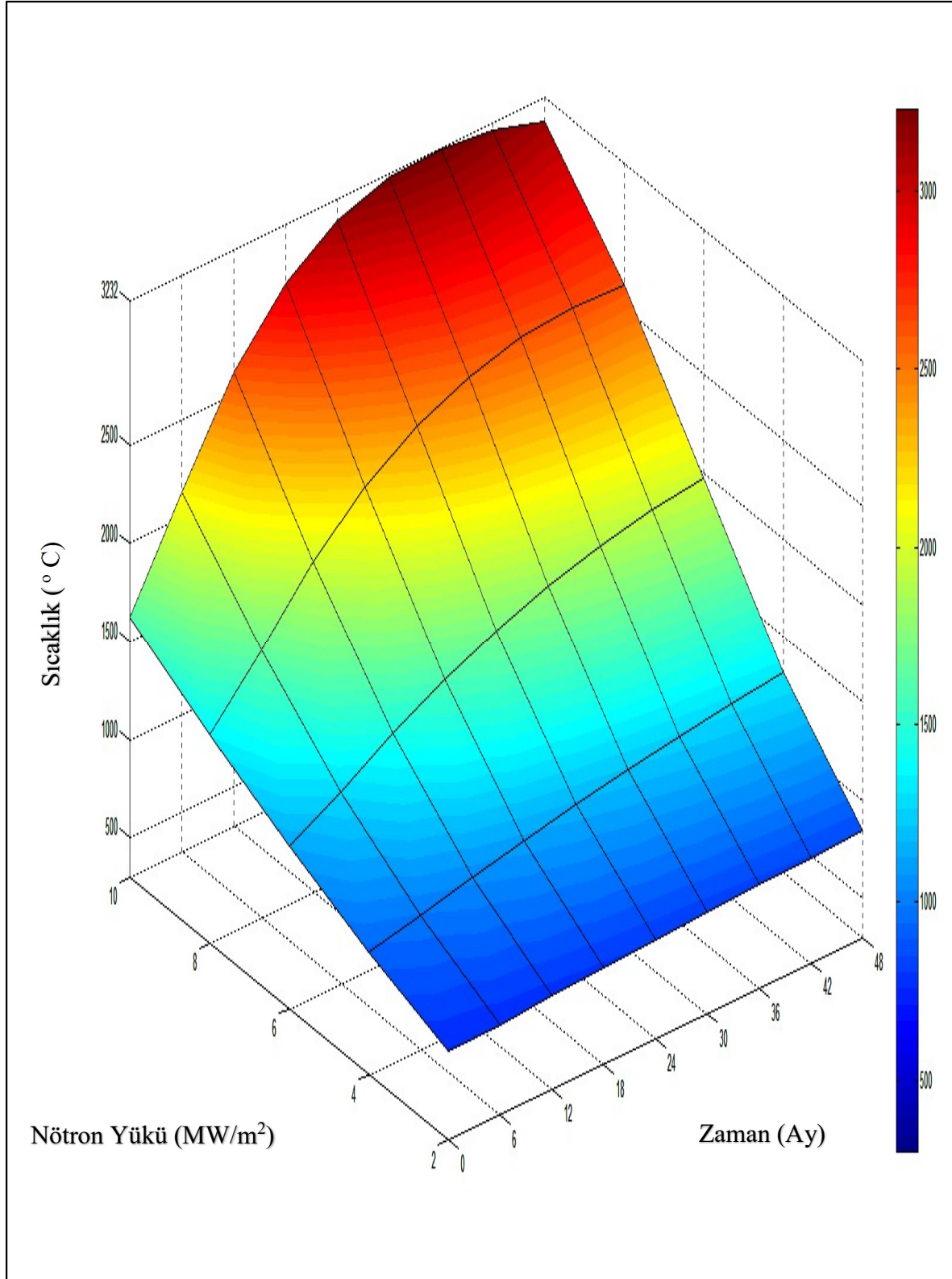
Şekil 5.31. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#1’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.31’ de Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#1’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 400 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 3524 °C’ dir.



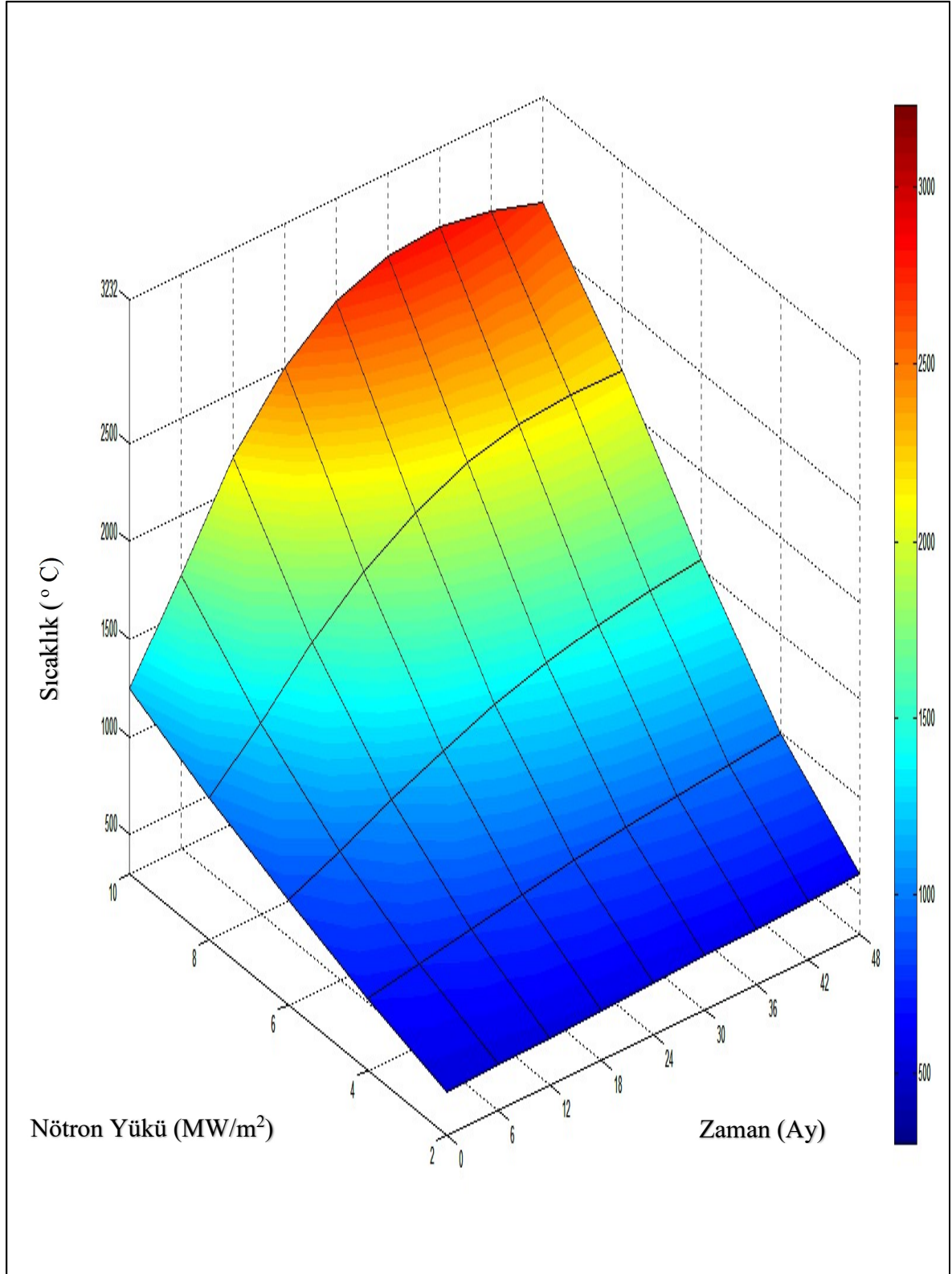
Şekil 5.32. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#1’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.32’ de Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#1’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 200 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 3065 °C’ dir.



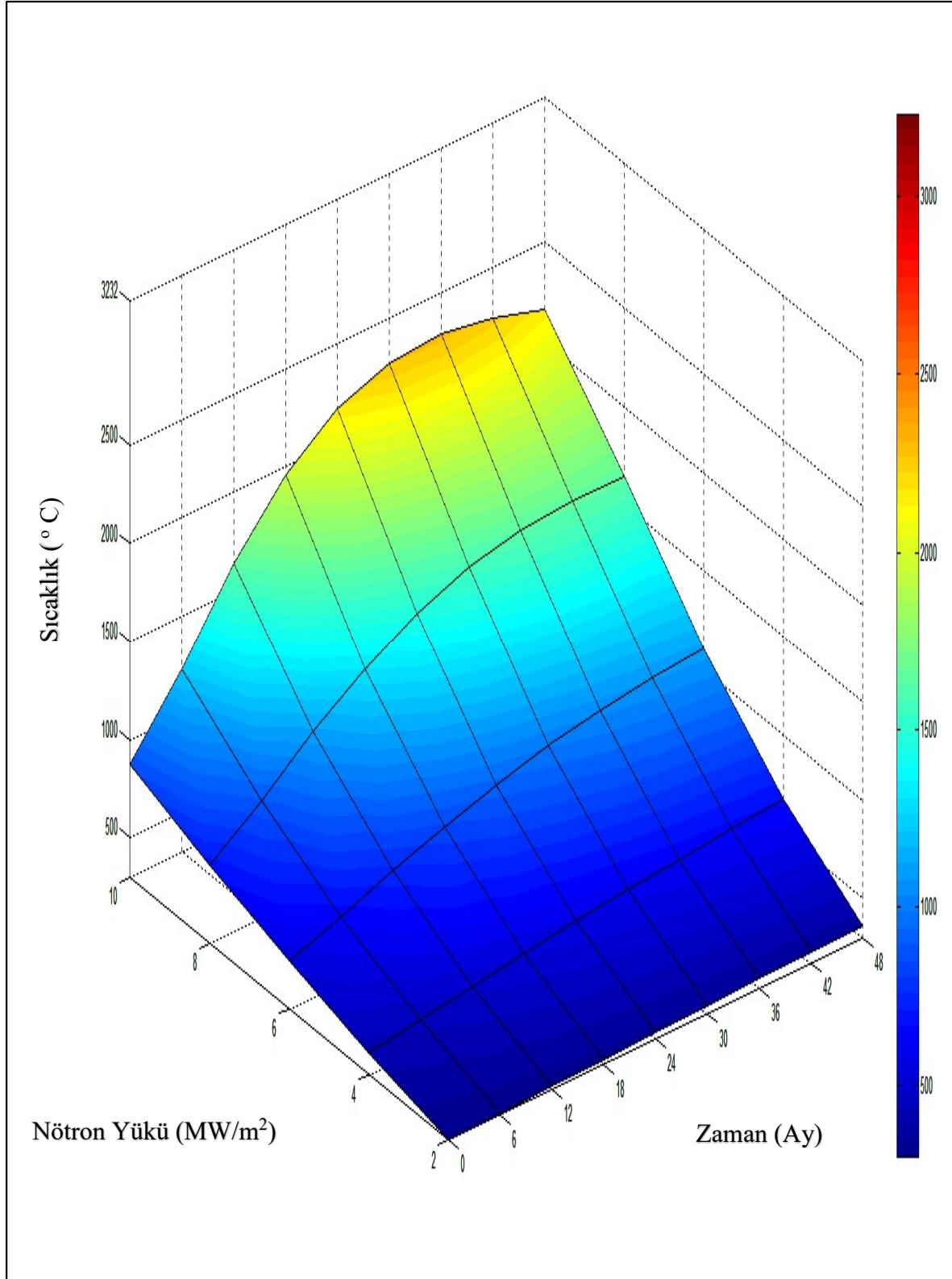
Şekil 5.33. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#5’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.33’ de Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#5’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 600 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 3232 °C’ dir.



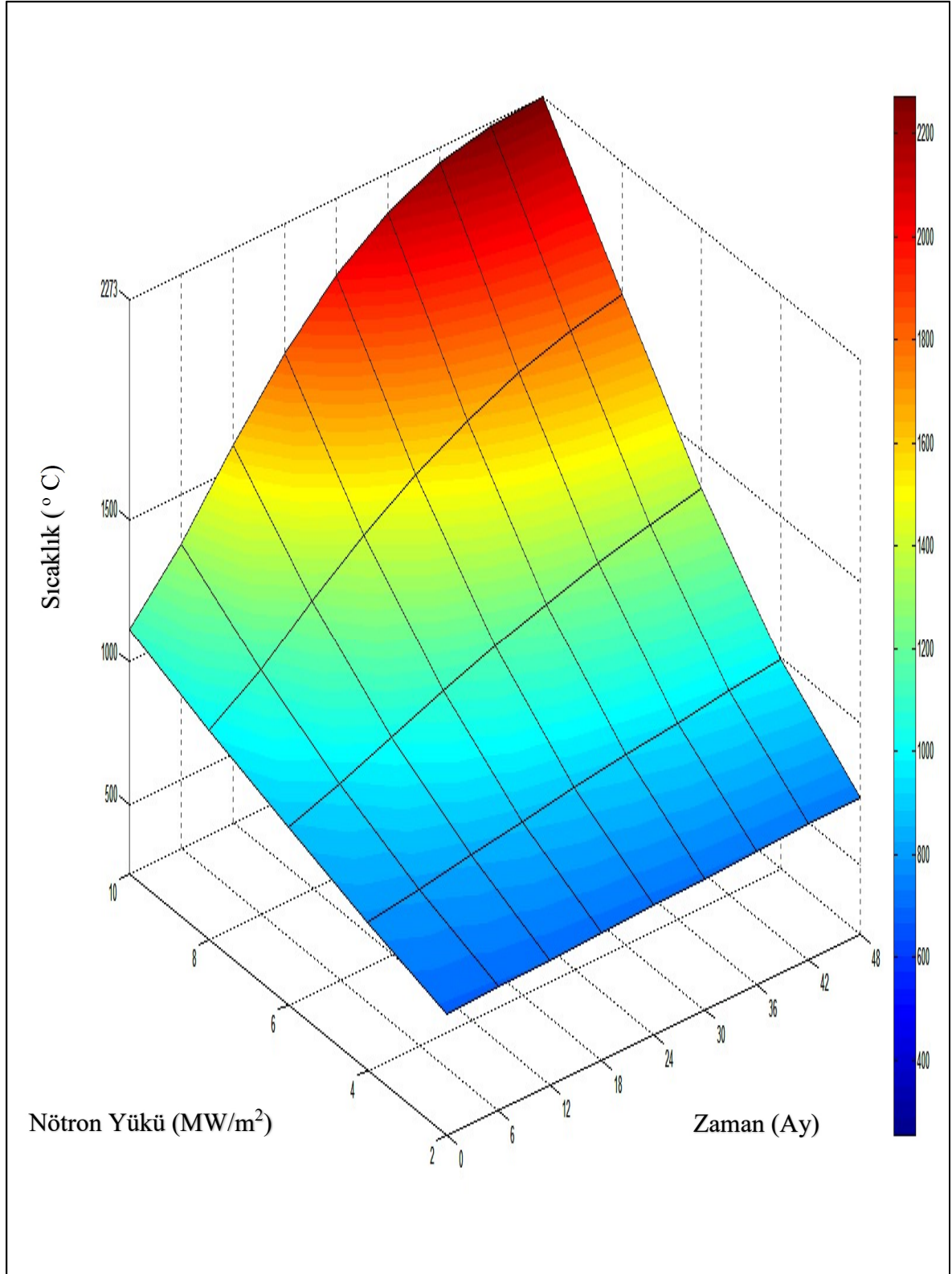
Şekil 5.34. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#5’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.34’ de Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#5’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 400 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 2826 °C’ dir.



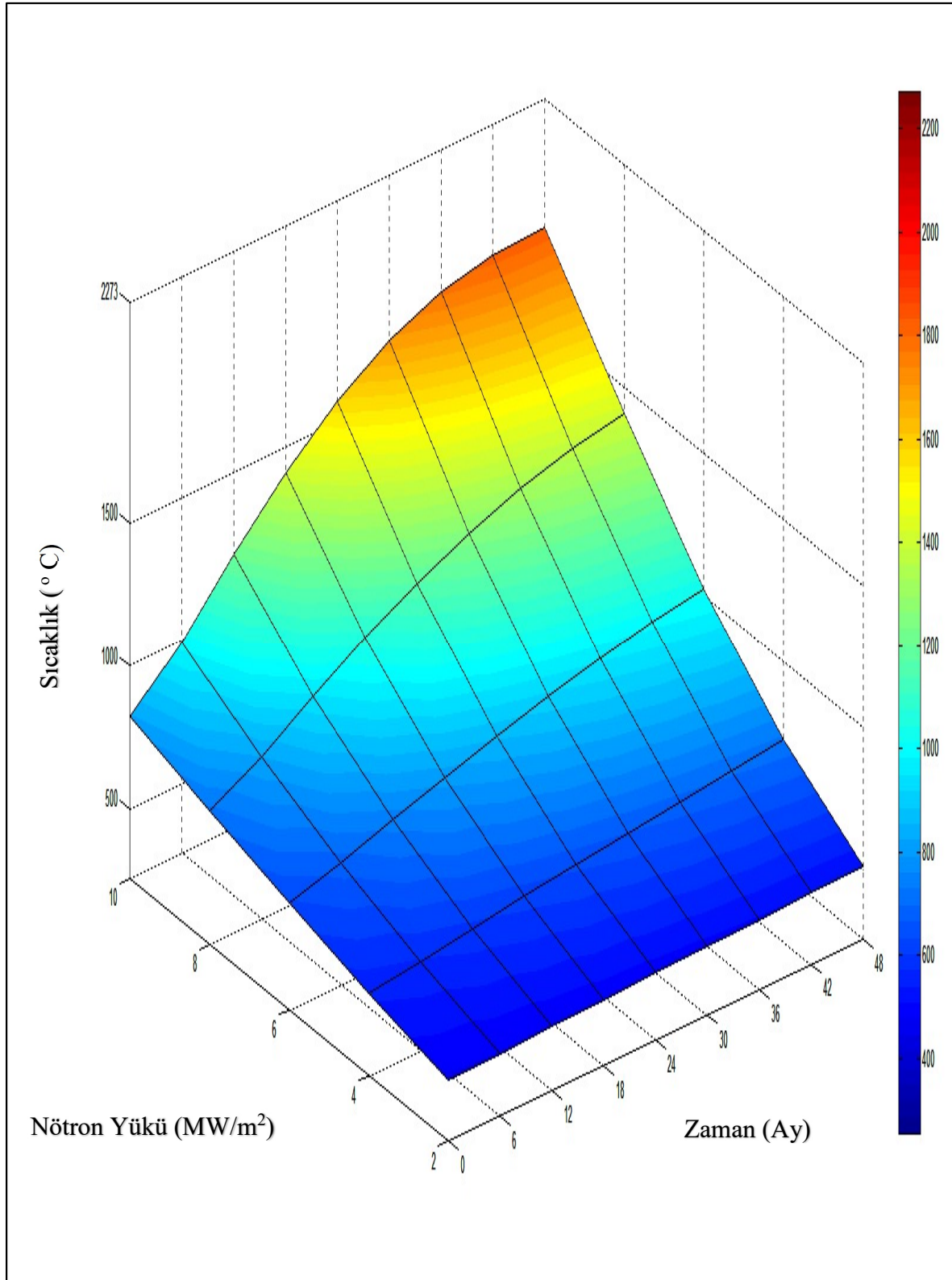
Şekil 5.35. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#5’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.35’ de Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#5’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 200 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 2290 °C’ dir.



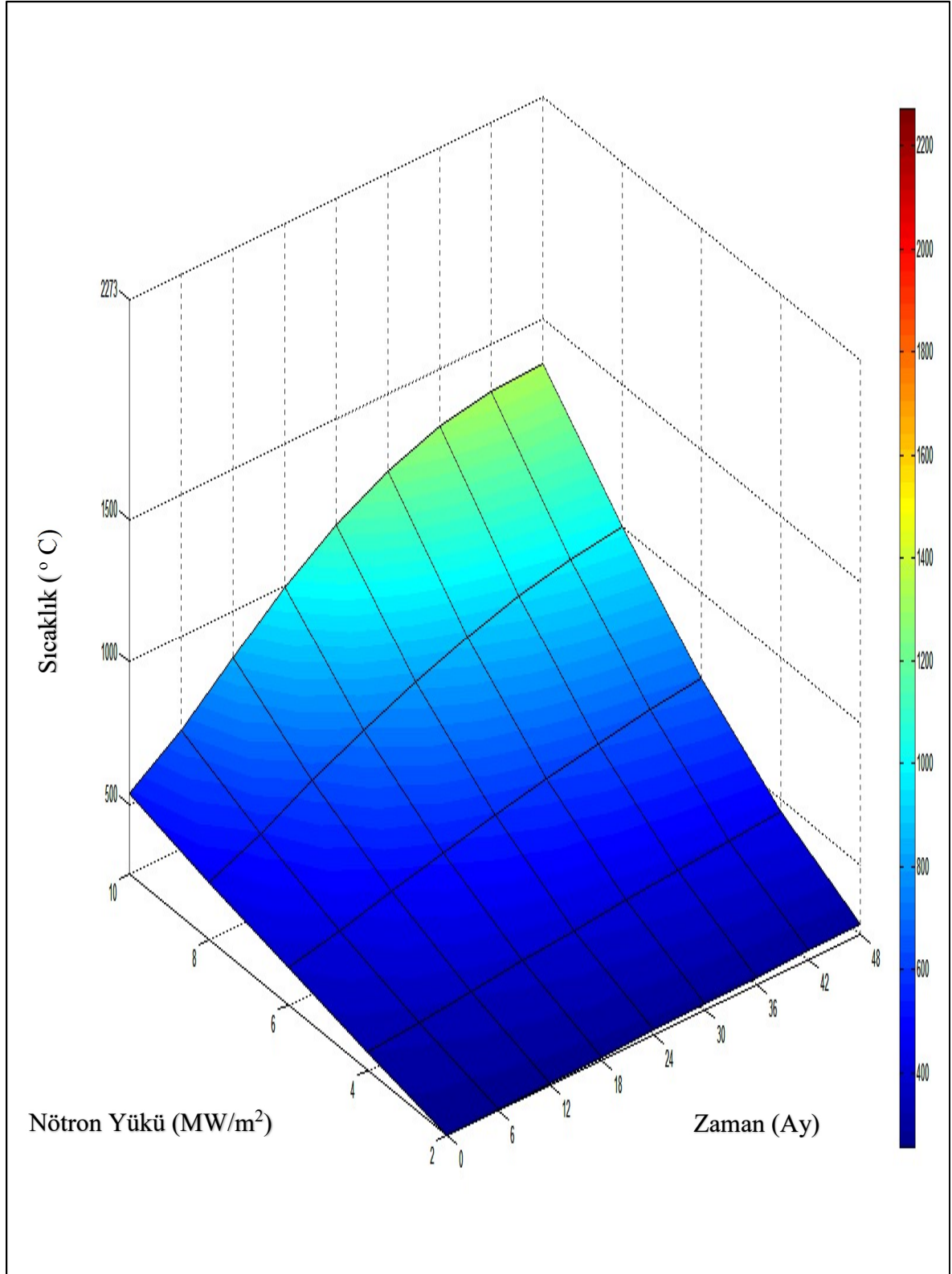
Şekil 5.36. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#10’da sıcaklık dağılımı

Şekil 5.36’ da Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#10’ da elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 600 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 2273 °C’ dir.



Şekil 5.37. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#10’da sıcaklık dağılımı

Şekil 5.37’ de Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#10’ da elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 400 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 1828 °C’ dir.

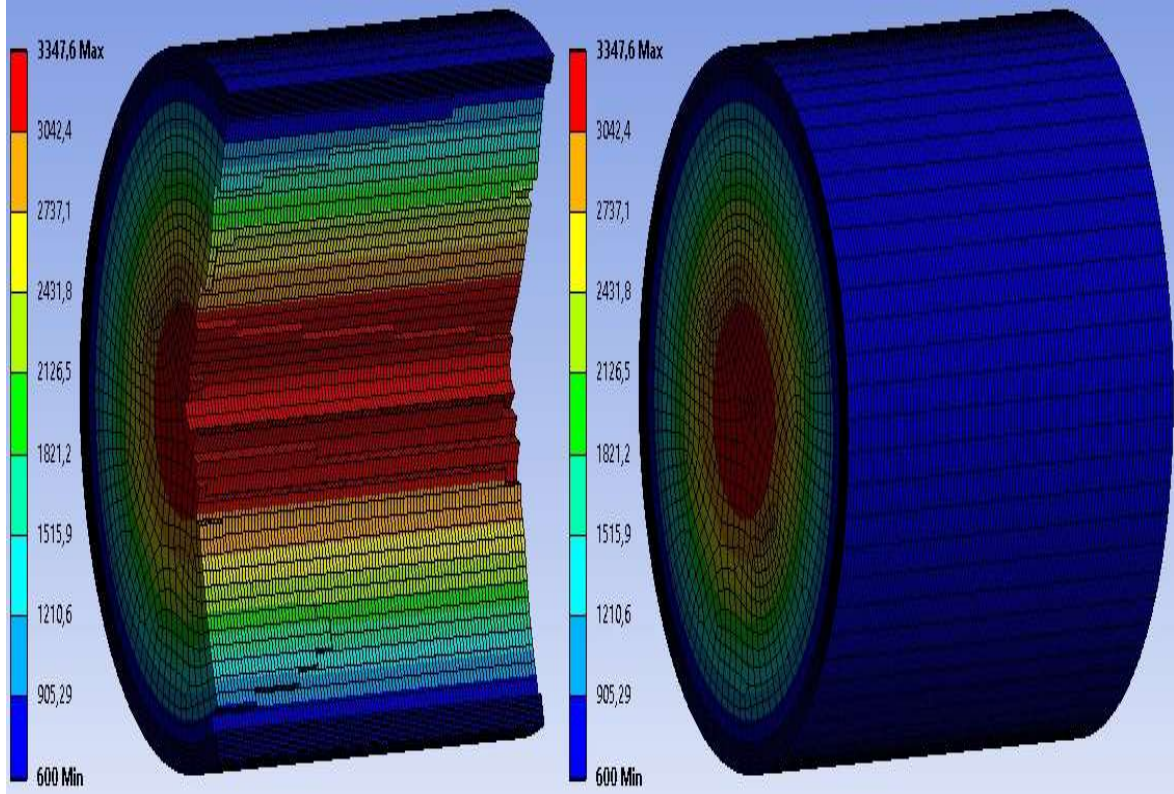


Şekil 5.38. Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#10’da sıcaklık dağılımı

Şekil 5.38’ de Flinabe soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#10’ da elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 200 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 1340 °C’ dir.

5.3.3. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu için sıcaklık dağılımı sonuçları

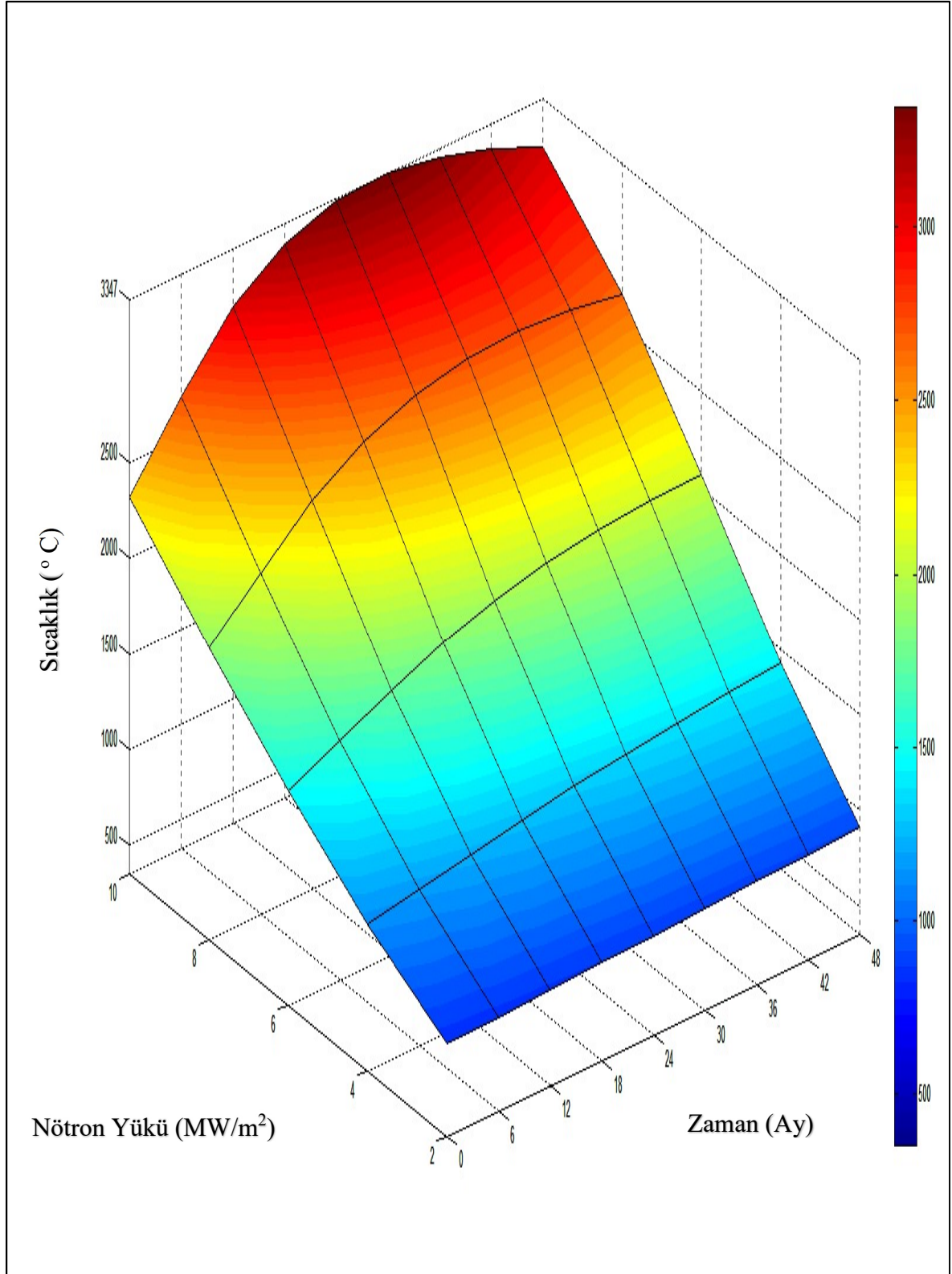
$\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutuculu bir hibrid reaktörde elde edilen yakıt çubuklarındaki 3 boyutlu sıcaklık dağılımı 1339 W/cm^3 ısı üretimi ve 600°C zırh sıcaklığında örnek olarak Şekil 5.39’ da verilmiştir.



Şekil 5.39. 1339 W/cm^3 ısı üretimi ve 600°C zırh sıcaklığında $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu için sıcaklık dağılımı

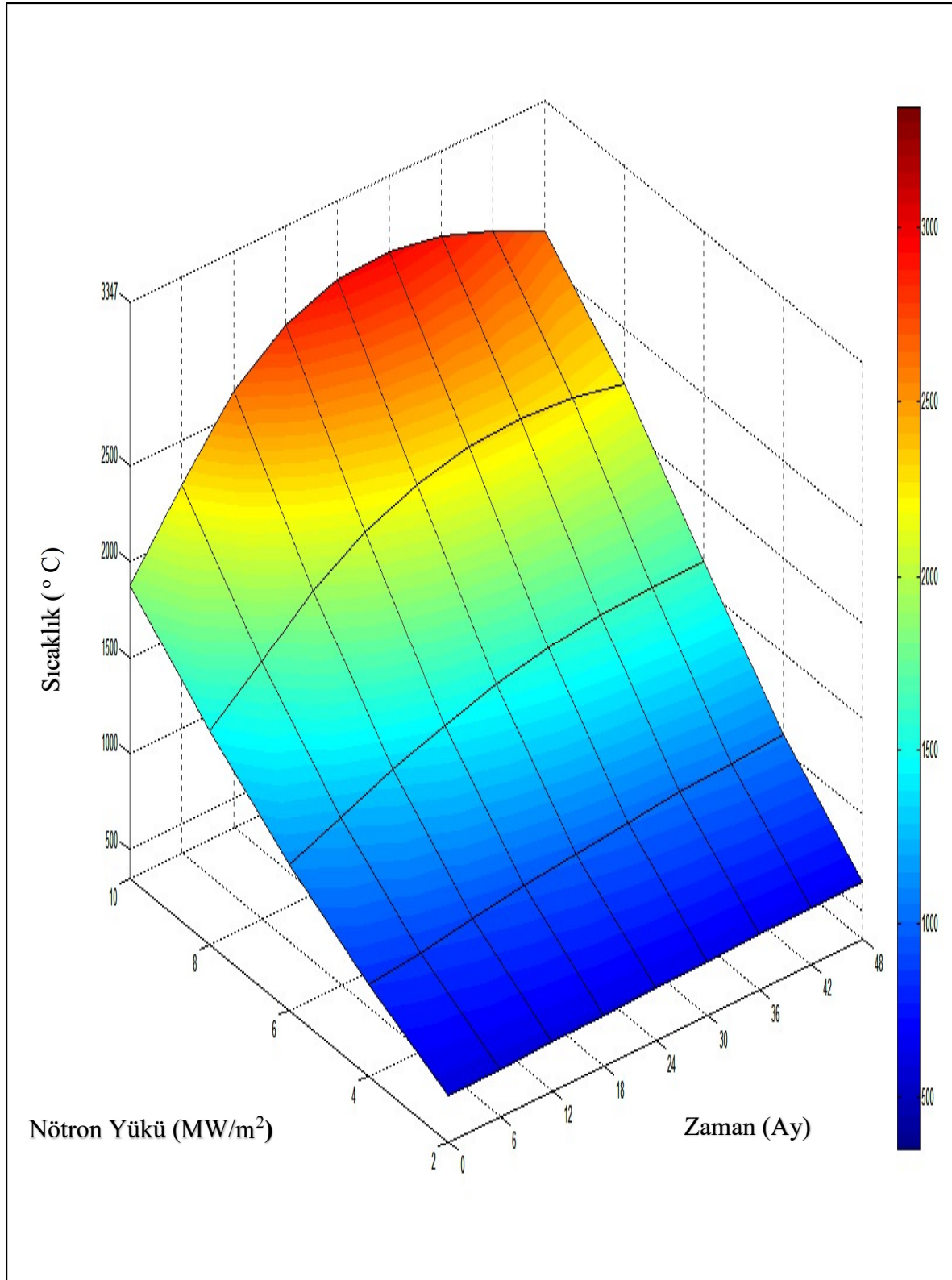
Şekil 5.39’ da bu çalışmada $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusu için elde edilen en yüksek sıcaklık dağılımının perspektif görünüşünü veren modellemesi gösterilmiştir. Yakıt çubuklarının hücrelere (mesh) bölünmesi sıcaklık dağılımının en az hatayla hesaplanmasında çok önemlidir. Verilen modelde de görüldüğü gibi bölünen sonlu elaman parçaları birbirine bitişik ve sınır noktaları ve sınır çizgileri birbiriyle düzgün bir şekilde birleşmiştir. Modelde görüldüğü gibi merkez ve kırmızı olan bölgeler maksimum sıcaklığın elde edildiği bölgelerdir ve sıcaklık zırha doğru azalmaktadır. Yakıt çubuğu sıcaklığı, zırh yüzey sıcaklığı 600°C olarak belirlenen sınır şartına kadar değişim göstermektedir.

$\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu için yakıtlarda oluşan en yüksek sıcaklıkların zamana ve nötron yüklerine göre değişimlerine bakıldığında en yüksek sıcaklık yakıt çubuğu diziliş sırasına göre sırasıyla, sıra#1’ de, sıra#5’ de ve sıra#10’ da elde edilmiştir.



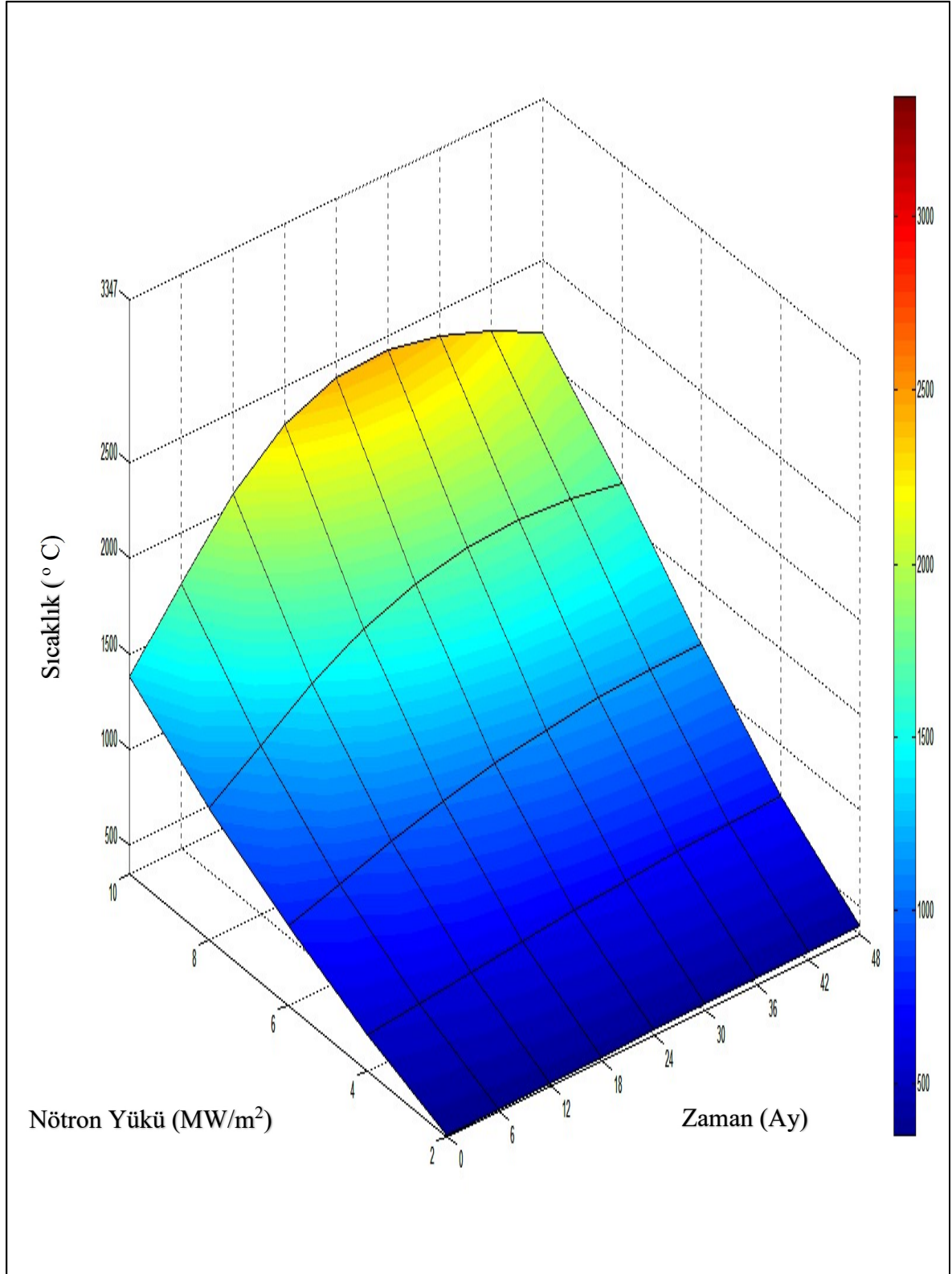
Şekil 5.40. $\text{Li}_2\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 600 $^{\circ}\text{C}$ ' de sıra#1'de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.40' da $\text{Li}_2\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 600 $^{\circ}\text{C}$ ' de sıra#1' de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 600 $^{\circ}\text{C}$ ' de elde edilen en yüksek sıcaklık 3347 $^{\circ}\text{C}$ ' dir.



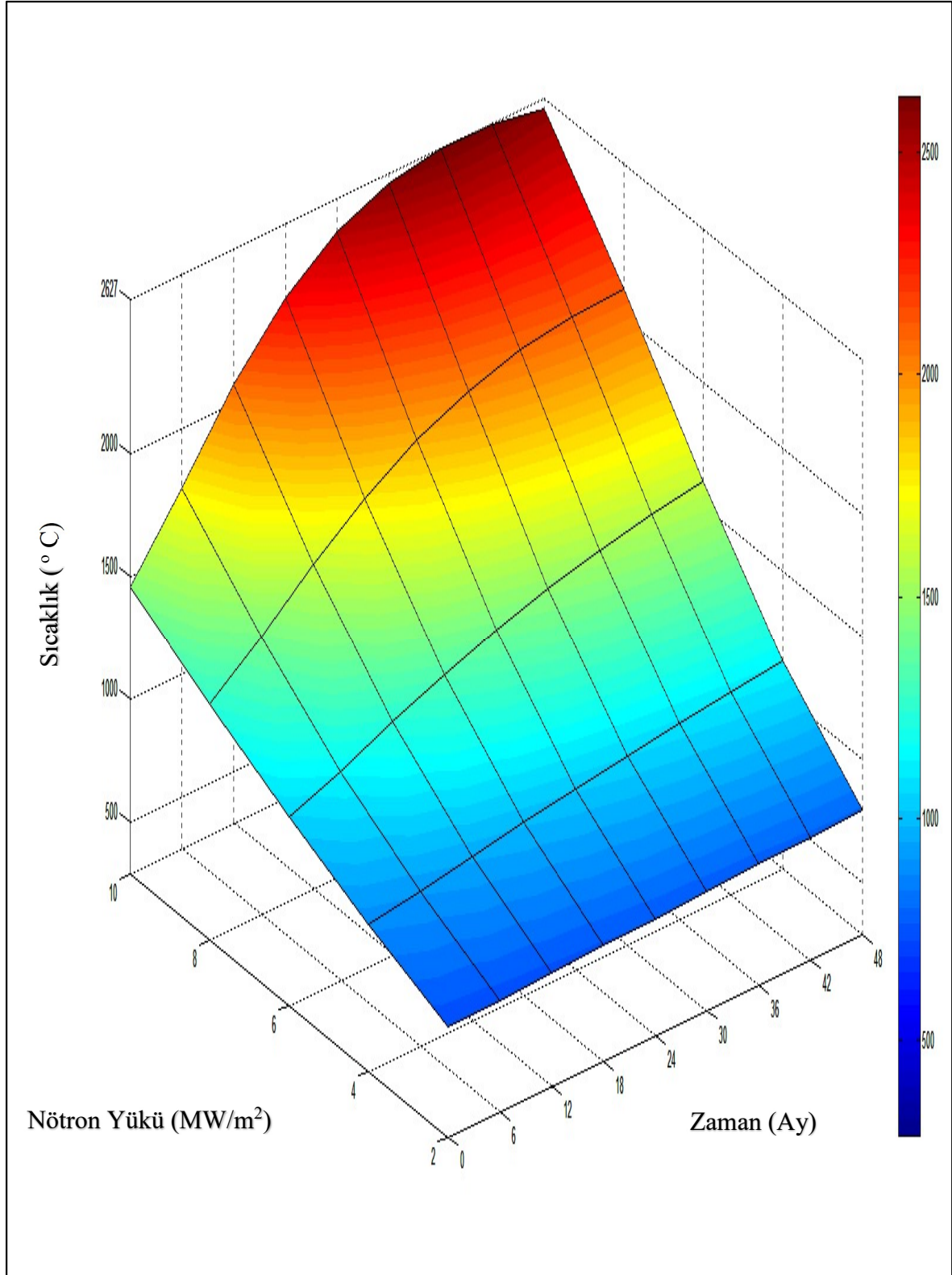
Şekil 5.41. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#1’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.41’ de $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#1’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 400 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 2953 °C’ dir.



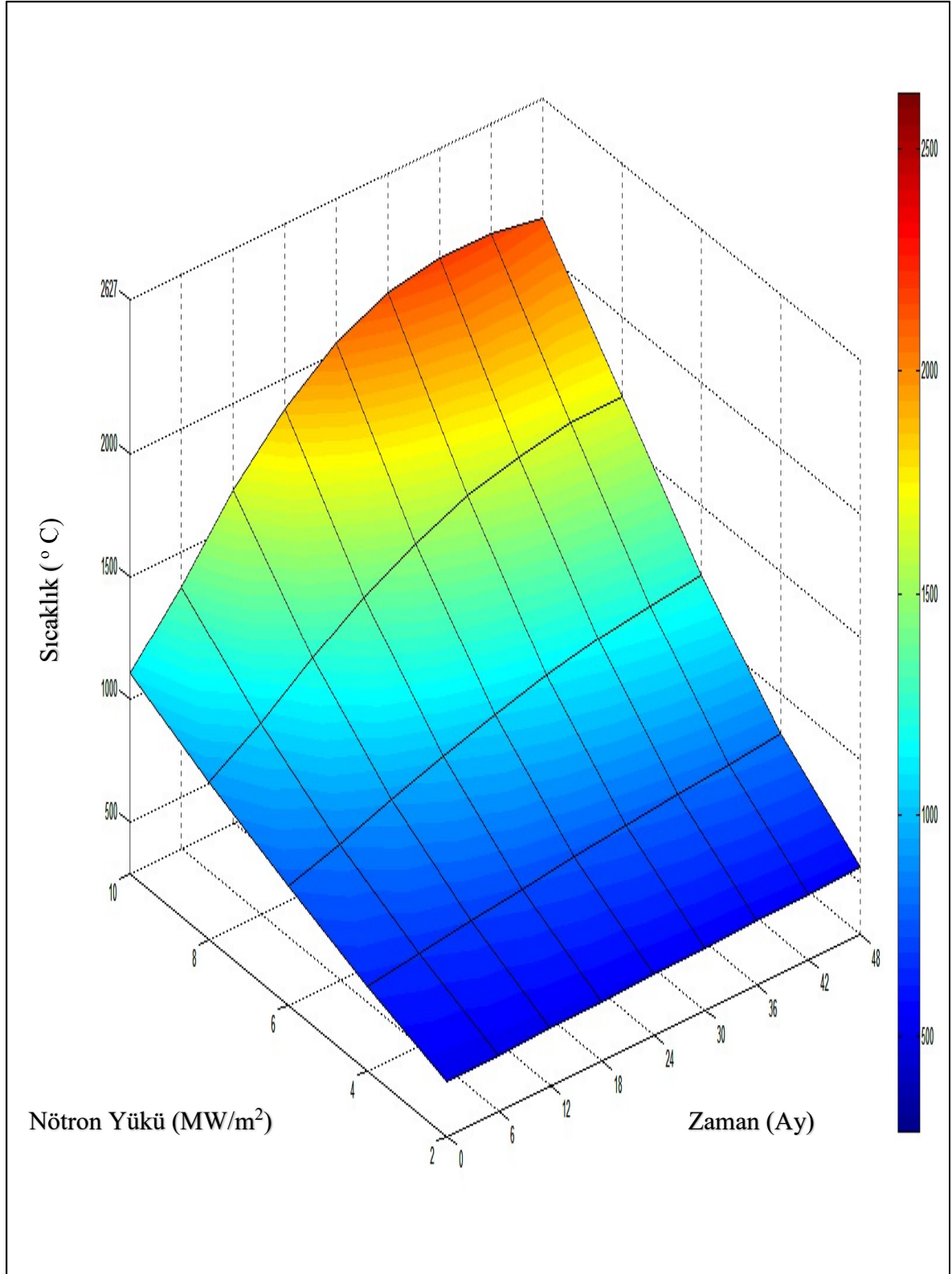
Şekil 5.42. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#1’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.42’ de $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#1’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. İlk sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 200 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 2426 °C’ dir.



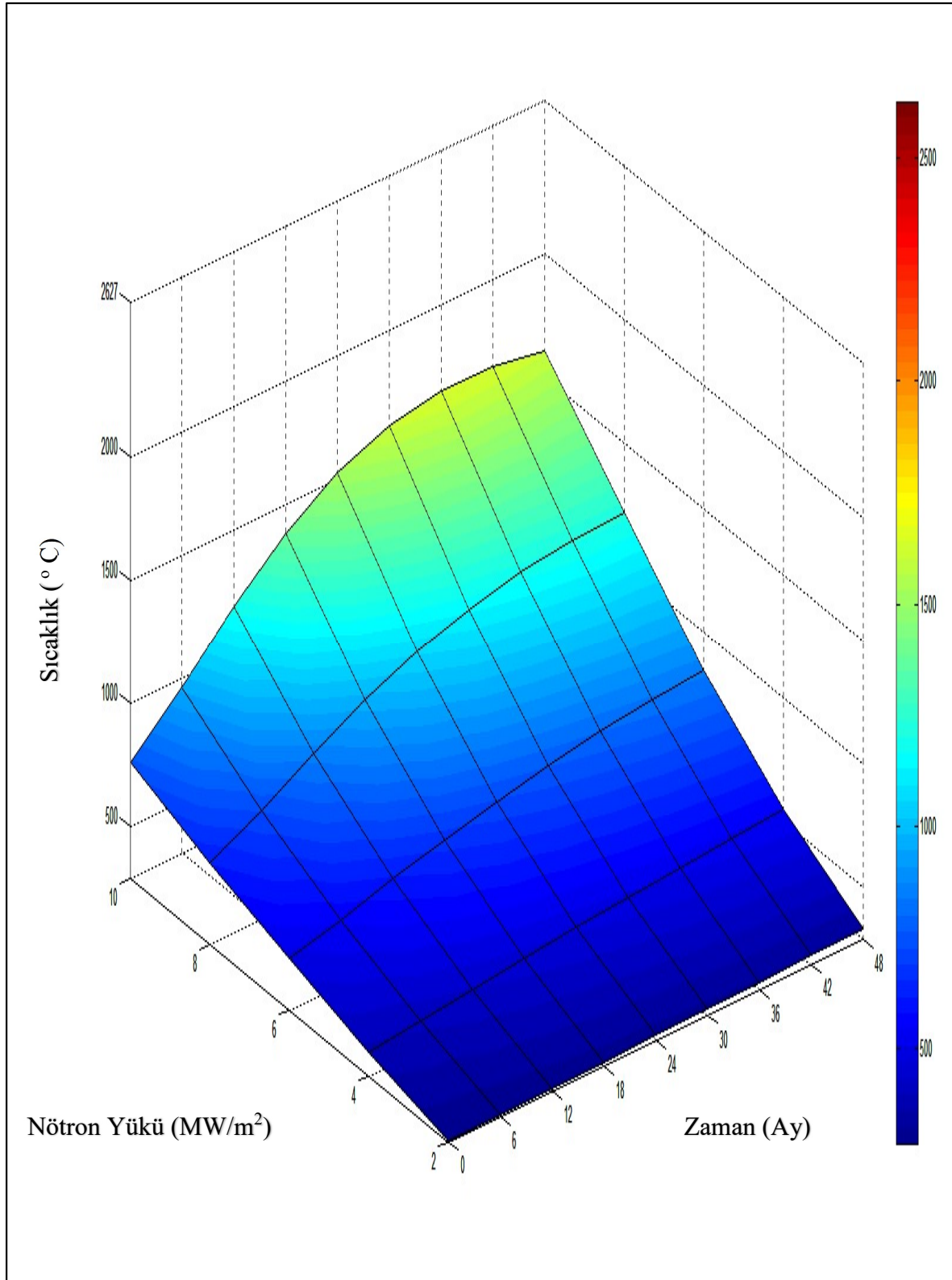
Şekil 5.43. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#5’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.43’ de $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#5’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 600 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 2627 °C’ dir.



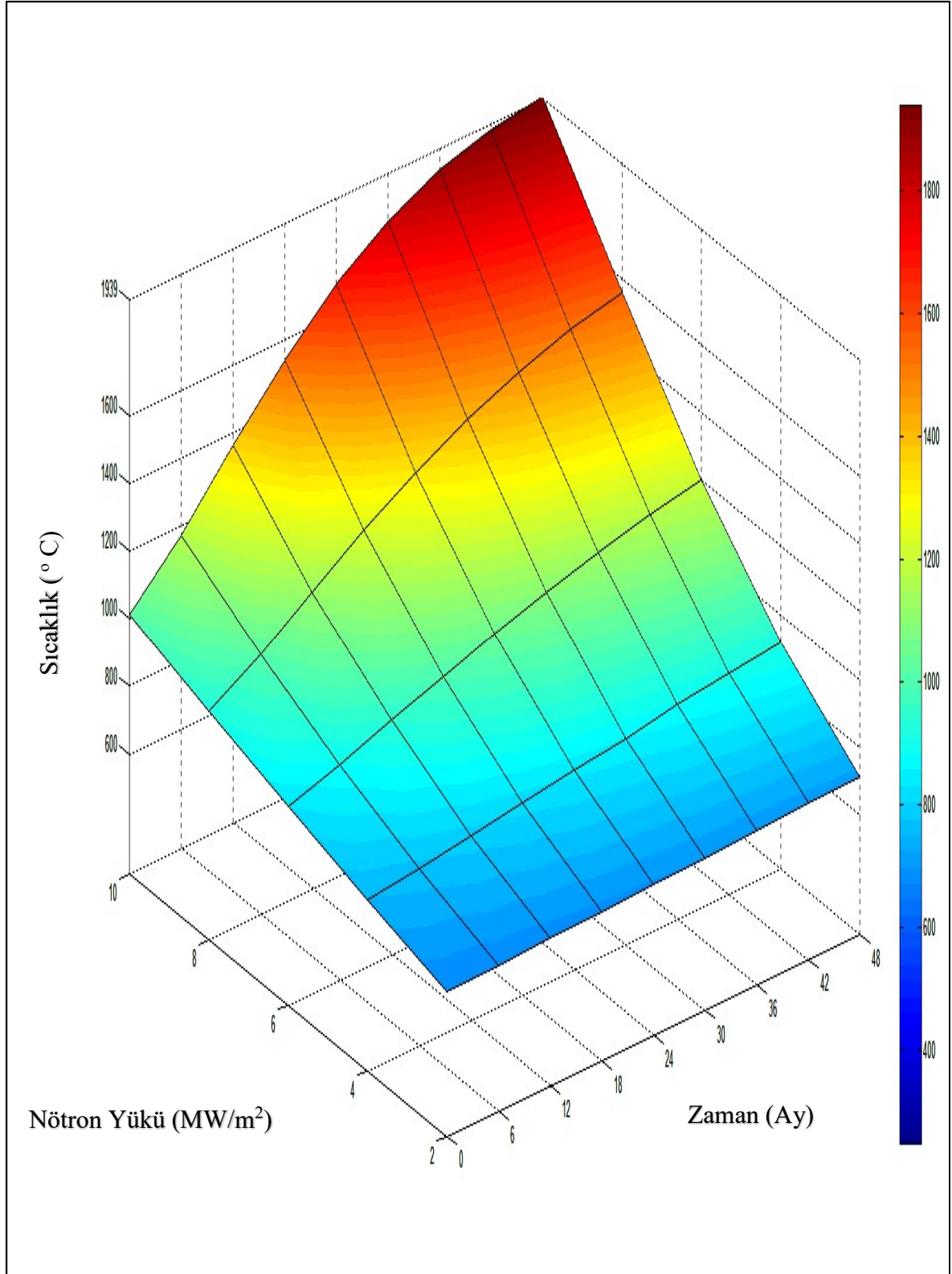
Şekil 5.44. $\text{Li}_2\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#5’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.44’ de $\text{Li}_2\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C’ de sıra#5’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 400 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 2180 °C’ dir.



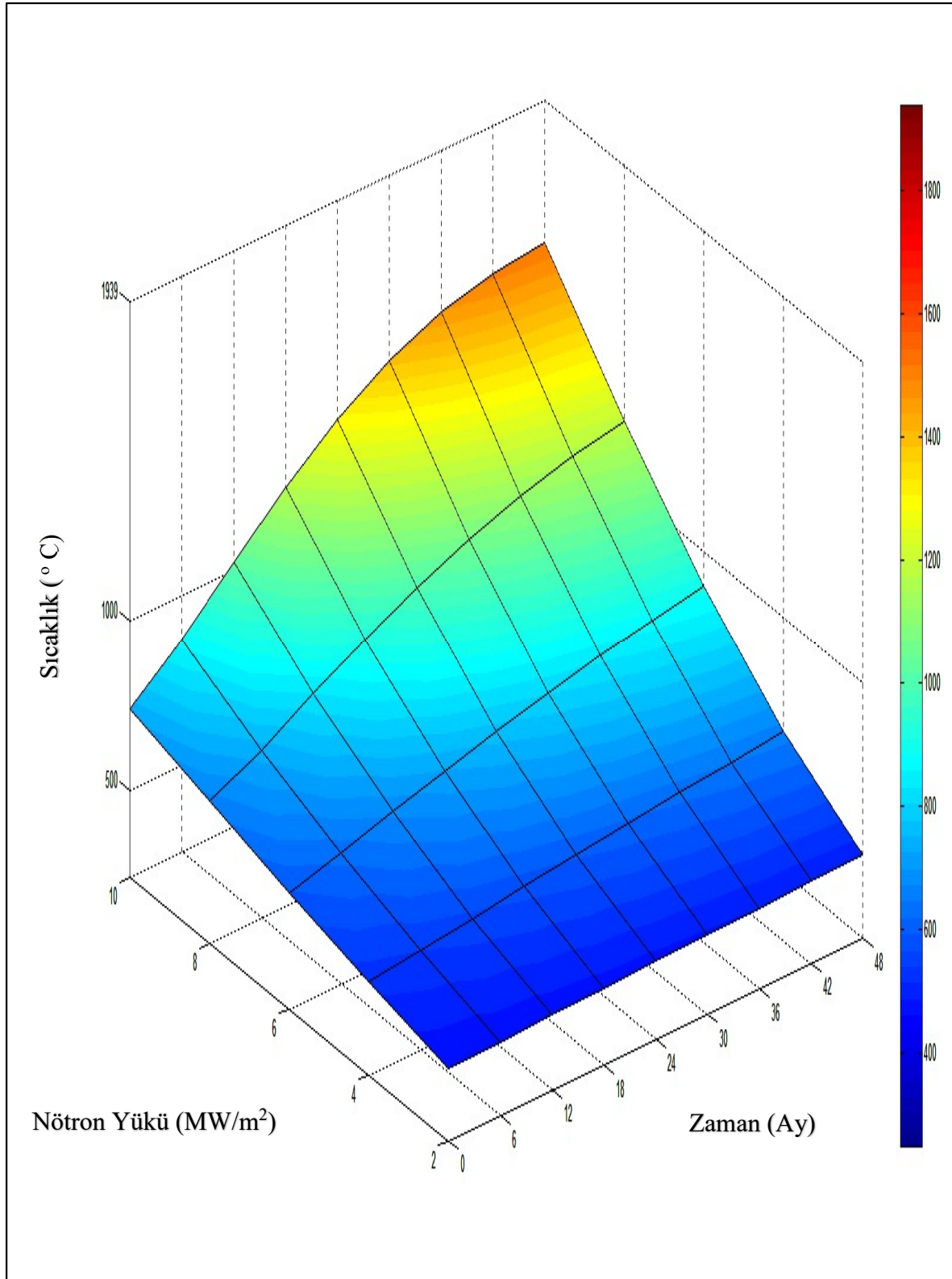
Şekil 5.45. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#5’de sıcaklık dağılımı

Şekil 5.45’ de $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C’ de sıra#5’ de elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Orta sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 200 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 1649 °C’ dir.



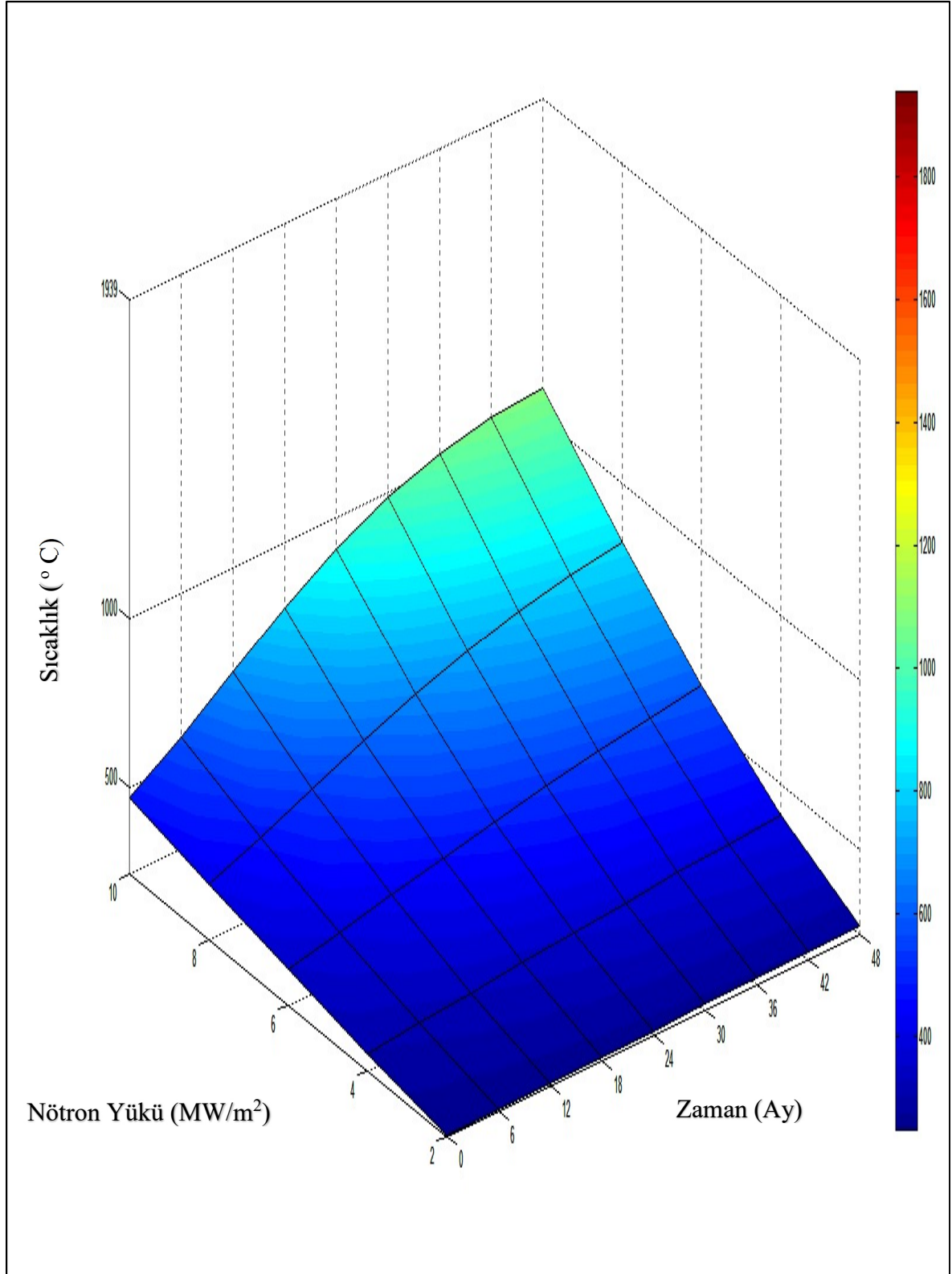
Şekil 5.46. $\text{Li}_2\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#10’da sıcaklık dağılımı

Şekil 5.46’ da $\text{Li}_2\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 600 °C’ de sıra#10’ da elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 600 °C’ de elde edilen en yüksek sıcaklık 1939 °C’ dir.



Şekil 5.47. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C' de sıra#10'da sıcaklık dağılımı

Şekil 5.47' de $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 400 °C' de sıra#10' da elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 400 °C' de elde edilen en yüksek sıcaklık 1518 °C' dir.



Şekil 5.48. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C' de sıra#10'da sıcaklık dağılımı

Şekil 5.48' de $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu içeren hibrid blankette 200 °C' de sıra#10' da elde edilen sıcaklıkların zaman ve nötron duvar yüklerine göre değişimleri verilmiştir. Son sırada bulunan bu yakıt çubuğunda 200 °C' de elde edilen en yüksek sıcaklık 1084 °C' dir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Özellikle günümüzde nükleer enerjide en büyük sorunlardan biri kullanılmış olan yakıtların çevreye zarar vermeden imha edilmesidir. Fakat bu kullanılmış yakıtların bir yarılanma ömrü vardır ve yarılanma ömürleri tükenene kadar radyo aktif sızıntı yapmaya devam etmektedirler. Bu sebepten dolayı bu kullanılmış yakıtlar imha edilemez, sadece çevreye zarar vermeden güvenli yerlerde depo edilebilirler. Bu depolama işlemleri hem ek maliyetler getirir hem de yakıtın potansiyelinin çok az bir kısmı kullanılmış olur. Hibrid reaktörlerin temel amacı bu kullanılmış yakıtları sürekli bölünebilir hale getirerek devamlı bir şekilde enerji elde etmek ve yakıtın tamamen çevreye zararsız hale gelene dek (Kurşuna dönüşmesini sağlayarak) enerjisini kullanmaktır.

Bu çalışmanın amacı böyle bir reaktörün teorik olarak tanımını ve hesaplarını yapıp eğer gerçek uygulama alanı bulursa nasıl bir sonuç alınacağını tespit etmektir. Bu nedenden dolayı bu çalışmada üç çeşit soğutucu uygulanıp, hangi soğutucu sıvının bu reaktörün, verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayacağını tespit edilmiştir. İlk başta reaktör için bakılması gereken kısım kullanılan bu soğutucular ile reaktörün füzyon ve fisyon reaksiyonlarını devamlı bir şekilde sürdürecek trityum üretim değerlerine sahip olup olmadığıdır. Bir füzyon nükleer reaktörünün kendi kendini sürdürebilmesi için trityum üretim oranı 1,05’ den büyük olmalıdır. Bu çalışmada kullanılan üç soğutucuda 1,05 trityum üretim oranını geçmiştir.

Bir reaktörde en önemli mesele reaktör güvenliğidir. Çünkü eğer bir nükleer sızıntı olursa çevre ve insanlar için yıkıcı sonuçları olacaktır. Bu çalışmada bu durum göz önünde bulundurularak seçilen soğutucu sıvılar ile seçilen yapı malzemelerinin hangisinin uyumlu ve güvenli bir şekilde çalışacağı tespit edilmiştir. Reaktör güvenliği açısından sıra#1’ deki sıcaklık değerleri değerlendirilmiştir. Bunun nedeni ilk duvara en yakın olan sıra#1 en çok nötron yüküne ve sıcaklığa maruz kalacak ve en çok ısı enerjisi, dolayısıyla en yüksek sıcaklık değerleri sıra#1’ deki yakıt çubuklarından elde edilecektir. Eğer sıra#1’ deki yakıt çubuklarının maksimum sıcaklıkları yakıt malzemesinin ergime sıcaklığını geçecek olursa yakıt malzemesi eriyerek, reaktörün çökmesine ve uygulamada inanılmaz yıkıcı sonuçlara neden olacaktır. Bu çalışmada elde edilen en yüksek sıcaklık sonuçları Çizelge 6.1’ de tablo halinde gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Maksimum sıcaklık değerleri

		Doğal Lityum			Flinabe			Li ₂₀ Sn ₈₀		
10 MW/m ²	SIRA	MAKSİMUM SICAKLIK (°C)			MAKSİMUM SICAKLIK (°C)			MAKSİMUM SICAKLIK (°C)		
		200	400	600	200	400	600	200	400	600
	SIRA 1	1772	2311	2753	3065	3524	3862	2426	2953	3347
	SIRA 5	1371	1865	2311	2290	2826	3232	1649	2180	2627
	SIRA 10	1059	1486	1903	1340	1828	2273	1084	1518	1939
8 MW/m ²	SIRA	MAKSİMUM SICAKLIK (°C)			MAKSİMUM SICAKLIK (°C)			MAKSİMUM SICAKLIK (°C)		
		200	400	600	200	400	600	200	400	600
	SIRA 1	1298	1779	2222	2272	2809	3216	1755	2293	2737
	SIRA 5	1030	1450	1863	1653	2184	2631	1216	1679	2116
	SIRA 10	804	1166	1532	996	1408	1814	822	1188	1558
6 MW/m ²	SIRA	MAKSİMUM SICAKLIK (°C)			MAKSİMUM SICAKLIK (°C)			MAKSİMUM SICAKLIK (°C)		
		200	400	600	200	400	600	200	400	600
	SIRA 1	915	1305	1696	1498	2012	2461	1182	1639	2072
	SIRA 5	736	1076	1427	1109	1549	1973	847	1221	1597
	SIRA 10	588	887	1195	695	1024	1361	592	893	1202
4 MW/m ²	SIRA	MAKSİMUM SICAKLIK (°C)			MAKSİMUM SICAKLIK (°C)			MAKSİMUM SICAKLIK (°C)		
		200	400	600	200	400	600	200	400	600
	SIRA 1	600	903	1214	880	1263	1646	734	1074	1423
	SIRA 5	497	772	1053	668	990	1319	546	835	1130
	SIRA 10	413	666	924	458	722	992	407	658	915
2 MW/m ²	SIRA	MAKSİMUM SICAKLIK (°C)			MAKSİMUM SICAKLIK (°C)			MAKSİMUM SICAKLIK (°C)		
		200	400	600	200	400	600	200	400	600
	SIRA 1	361	600	844	442	703	970	403	653	908
	SIRA 5	317	545	776	365	605	850	328	559	793
	SIRA 10	283	503	724	291	513	737	275	492	712

UO₂' in tavsiye edilen ergime sıcaklığı referanslara [24,25] göre 3120±30 °C' dir. Başka bir referansa [6] göre ise tavsiye edilen değer 2830 °C' dir. Bu çalışmada daha güvenli bir reaktör için ergime sıcaklığı 2830 °C alınarak sonuçlar bu sıcaklığa göre değerlendirilecektir.

En yüksek sıcaklık değeri sıra#1 için 600°C de 10 MW/m^2 nötron yükünde Flinabe soğutucusu için elde edilmiştir (3862°C). Bu değer referans ergime sıcaklığı olan 2830°C nin çok üstündedir ve reaktör bu yakıt sıcaklığında yakıtın erimesiyle birlikte çalışamaz hale gelecektir. Bu nedenden dolayı bu soğutucu ile bu nötron yükü 600°C yakıt yüzey sıcaklığı için uygulanamaz. Flinabe soğutucusu için 400°C yakıt yüzey sıcaklığında sıra#1' de yakıtta oluşan maksimum sıcaklık 3524°C dir. Bu sonuç da yakıt malzemesinin ergime sıcaklığının üstündedir ve kullanılan yakıt malzemesi için uygun değildir.

Flinabe soğutucusunun 200°C deki sıra#1' de maksimum yakıt sıcaklığı ise 3065°C dir ve yine Uranyum elementinin ergime sıcaklığını aşmaktadır. Bu sonuçlardan dolayı Flinabe soğutucusu 10 MW/m^2 nötron yüküyle bu hibrid reaktörde kullanılamaz. Flinabe soğutucusu için 8 MW/m^2 nötron yüküne bakıldığında 200°C , 400°C , 600°C yüzey sıcaklıkları için sıra# 1' de elde edilen maksimum değerler sırasıyla 2272°C , 2809°C , 3216°C dir. Bu sonuçlara bakıldığında 200°C ve 400°C yakıt yüzey sıcaklıkları için maksimum sıcaklık ergime sıcaklığını aşmamaktadır. Fakat 400°C yüzey sıcaklığında maksimum sıcaklık ile referans ergime sıcaklığı arasında sadece 27°C fark bulunmaktadır. Bu fark güvenli bir değer değildir ve eğer reaktör bu yakıt yüzey sıcaklığında çalıştırılırsa kaza riski çok fazladır. 200°C yüzey sıcaklığı için ise bir sorun bulunmamaktadır ve reaktör güvenli bir şekilde bu yüzey sıcaklığında işletilebilir.

Sonuç olarak ise eğer bu hibrid reaktörde Flinabe soğutucusu kullanılacak ise en uygun nötron yükü 6 MW/m^2 dir. Bu nötron yükünde çalışması yapılan bütün yakıt yüzey sıcaklıkları için bulunan maksimum sıcaklıklar yakıt malzemesinin ergime sıcaklığını geçmemektedir. Bu nedenden dolayı çalışılan bu reaktör için Flinabe soğutucusu en güvenli bir şekilde 6 MW/m^2 nötron duvar yükünde işletilebilir. Daha küçük nötron yüklerinde ise en yüksek sıcaklıklar referans ergime sıcaklığını geçmediği için reaktör bu nötron yüklerinde güvenli bir şekilde işletilebilir.

İkinci en yüksek sıcaklık değerlerinin elde edildiği $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusunda elde edilen maksimum sıcaklık dağılımı sonuçlarına baktığımızda en yüksek sıcaklık sıra#1 için 10 MW/m^2 nötron yükünde 600°C yakıt yüzey sıcaklığında 3347°C dir. Bu sıcaklık da referans ergime sıcaklığının üstündedir. Bu yüzden $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusu da 600°C yakıt yüzey sıcaklığında ve 10 MW/m^2 nötron duvar yükünde bu hibrid sistemde kullanılamaz. Sıra#1' de yakıt yüzey 400°C sıcaklığı ve 10 MW/m^2 nötron duvar yükü için bakıldığında maksimum yakıt sıcaklığı 2953°C dir. Bu değer de referans ergime sıcaklığından yüksektir

ve reaktör $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusunda, uygulanan bu nötron duvar yükünde ve yakıt yüzey sıcaklığında kullanılamaz. Sıra#1' de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve 10 MW/m^2 nötron yükü için yakıt maksimum sıcaklığı $2426\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' dir. Bu sonuçlara göre hibrid reaktörden $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ yakıt yüzey sıcaklığı ve 10 MW/m^2 nötron yükünde $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusu kullanılarak güvenli bir şekilde enerji elde edilebilir. $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusunda 8 MW/m^2 nötron duvar yükünde ilk sıradaki yakıt çubuğunda maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ yakıt yüzey sıcaklıkları için $1755\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2293\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2737\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' dir. Bu sıcaklık değerleri incelendiğinde hiçbir değer referans ergime sıcaklığını aşmamaktadır. Fakat $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ yakıt yüzey sıcaklığındaki maksimum sıcaklık referans ergime sıcaklığına yakın bir değerdedir ve reaktörde güvenlik zafiyeti oluşturacaktır. Bu sebepten dolayı 8 MW/m^2 nötron yükünde en uygun yüzey sıcaklıkları $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' dir. 8 MW/m^2 nötron duvar yükünün altındaki bütün yüklemelerde $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucusuyla hibrid reaktör güvenli bir şekilde çalışabilir.

Doğal Lityum moderatörü için elde edilen maksimum sıcaklık değeri sıra#1' de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ yakıt yüzey sıcaklığında 10 MW/m^2 nötron yükünde $2753\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' dir ve yakıt malzemesinin referans ergime sıcaklığının altındadır. Bu değer referans erime sıcaklığına yakın olmasından dolayı reaktörde güvenlik zafiyeti oluşturabilir. Sıra#1' deki diğer yakıt yüzey sıcaklık değerleri için maksimum sıcaklıklar sırasıyla $1771\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2311\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' dir. Bu sıcaklık değerleri reaktörde güvenlik zafiyeti oluşturmamaktadır. Bu yüzey sıcaklıklarında reaktör güvenli bir şekilde çalıştırılabilir. Diğer bütün nötron duvar yükleri ve yakıt yüzey sıcaklıkları için Doğal Lityum reaktörde güvenli bir şekilde kullanılabilir. Bütün bu sonuçlara bakıldığında reaktörün 10 MW/m^2 nötron duvar yükünde en güvenli çalışacağı soğutucu Doğal Lityumdur. En yüksek sıcaklıkların elde edildiği Flinabe soğutucusu ise en verimli soğutucudur.

6.2. Öneriler

Yapılan bu çalışma ile birlikte, LWR harcanmış yakıtının farklı soğutucular için ANSYS sonlu elemanlar kodu yardımıyla sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda, farklı tip nükleer yakıtlar kullanılarak sıcaklık dağılım analizleri yapılabilir. Ayrıca yeni hibrid reaktör tasarımları geliştirilebilir ve hem nötronik hem de termal analiz açısından analizler yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Lamarsh, J. R. (2001). *Introduction to Nuclear Engineering* (Third Edition). New Jersey: Prentice Hall, 1-44, 52-110.
2. Taşkolı, H. (2010). *Bir Füzyon-Fisyon Reaktöründe Triso Kaplamalı Candu Nükleer Yakıt Atıklarının Nötronik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-53.
3. Nifenecker, H., David, S., Loiseaux, J. M., Giorni, A. (1999) Hybrid Nuclear Reactors. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 683-827.
4. Zu, T., Wu, H., Zheng, Y., Cao, L. (2015). Economics analysis of fuel cycle cost of fusion–fission hybrid reactors based on different fuel cycle strategies. *Fusion Engineering and Design*, 90, 119-126.
5. Petrie, L. M. (2004). SCALE 5 System Drive, NUREG/CR-0200, Revision 7, Volume III, Section M1, ORNL/NUREG/CSD-2/V3/R7. *Oak Ridge National Laboratory*.
6. Yapıcı, H., İpek, O., Özceyhan, V. (2001). Temperature Distribution in Nuclear Fuel rod and variation of the Neutronic Performance Parameters in (D–T) Driven Hybrid Reactor System. *Annals of Nuclear Energy*, 28, 1825-1850.
7. Baysal, E. (2012). Investigation of the Temperature Distribution in Fuel Rod in a Fusion-Fission Reactor. Energy Education Science and Technology Part A: *Energy Science and Research*, 29(2), 1245-1252.
8. Yapıcı, H. (2002). Temperature Distribution in mixed ThO₂–UO₂ Fuel Rods Located in Blanket of an Inertial Fusion Energy Breeder. *Annals of Nuclear Energy*, 29, 2187–2209.
9. İpek, O. (2011). Analysis of temperature distribution, burn-up and breeding parameters in nuclear fuel rod in fusion–fission reactor system fueled with mixed ThO₂-UO₂ fuel. *International Journal of Energy Research*, 35, 112-122.
10. Gaspar, Jr., Moreira, M. L., DeSampaio, P. A. B. (2011, 12-15 September). *Temperature Distribution on Fuel Rods: A Study on the Effect of Eccentricity in the Position of UO₂ Pellets*. Paper presented at 20th International Conference Nuclear Energy For New Europe, Bovec.
11. Pandey, K. M., Mahesh, M. (2010). Determination of Temperature Distribution in a Cylindrical Nuclear Fuel Rod – a Mathematical Approach. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 1, 5.
12. An, C., Moreira, F. C., Su, J. (2014). Thermal analysis of the melting process in a nuclear fuel rod. *Applied Thermal Engineering*, 68, 133-143
13. Eskandari, M., Bavandi., Mihandoost. (2012). Studies on Nuclear Fuel Rod Thermal Performance. *Energy Procedia*, 14, 142-147.

14. Jiang, Y., Cui, Y., Huo, Y., Ding, S. (2011). Three-dimensional FE analysis of the thermal-mechanical behaviors in the nuclear fuel rods. *Annals of Nuclear Energy*, 38, 2581-2593.
15. Newman, C., Hansen, G., Gaston, D. (2009). Three dimensional coupled simulation of thermomechanics, heat, and oxygen diffusion in UO₂ nuclear fuel rods. *Journal of Nuclear Materials*, 392, 6-15.
16. Şahin, S., Yapıcı, H. (1998). Rejuvenation of Light Water Reactor Spent Fuel in Fusion Blankets. *Annals of Nuclear Energy*, 25(16), 1317-1339.
17. Yapıcı, H., Şahin, N., Bayrak, M. (2000). Investigation of neutronic potential of a moderated (D-T) fusion driven hybrid reactor fueled with thorium to breed fissile fuel for LWRs. *Energy Conversion & Management*, 41, 435-447.
18. Şahin, S., Yapıcı, H., Bayrak, M. (1999). Spent Mixed Oxide Fuel Rejuvenation in Fusion Breeders. *Fusion Engineering and Design*, 46, 9-23.
19. Übeyli, M. (2003). On the Tritium Breeding Capability of Flibe, Flinabe, and Li₂₀Sn₈₀ in a Fusion-Fission (Hybrid) Reactor. *Journal of Fusion Energy*, 22, 1.
20. Kang, Y., Terai, T. (2005). Tritium transport behavior in the molten lithium-tin alloy. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 66, 615-618.
21. Şahin, S., Übeyli, M. (2004). LWR spent fuel transmutation in a high power density fusion reactor. *Annals of Nuclear Energy*, (31), 871-890.
22. Çengel, Y. (2003). *Heat Transfer A Practical Approach* (Second edition). New York: Mc Graw-Hill, 1-127.
23. El-Wakil, M. M. (1971) *Nuclear Heat Transport*. UK: International Textbook Company, 1-200.
24. Rand, M.H., Ackermann, R.J., Gronvold, F., Oetting, L., Pattoret, A. (1978). *Rev.Int. Des Hautes Temperatures et des Refractories*, 15, 355.
25. Fink, J.K., Chasanov, M.G., Leibowitz, L. (1981). Properties for Reactor Safety Analysis. *Argonne National Laboratory Report*, 80(3).
26. Acır, A., Yıldız, K., Alkan, M. (2007). ThSi₂ Yakıtlı Flibe Soğutuculu Bir Füzyon-Fisyon Hibrid Reaktöründe Farklı Trityum Üretim Malzemelerinin Kullanılmasının Fisil ve Fusil Yakıt Üretimine Etkileri. *Politeknik Dergisi*, 145-153.
27. E, Greenspan. (1984). Fusion-fission Hybrid Reactors. *Advances in Science and Technology*, 289-295.
28. Şahin, S., Al-Kusayer, T. (1986). 244Cm as Multiplier and Breeder in a ThO₂ Hybrid Blanket Driven by a (Deuterium-Tritium) Source. *Fusion Technology*, 1297-1302.

29. Şahin, S., Al-Kusayer, T., Raoof, M. A. (1986). Preliminary Design Studies of a Cylindrical Experimental Hybrid Blanket with Deuterium-Tritium driver. *Fusion Technology*, 84-99.
30. Şahin, S. (1990). Power Flattening in a Catalyzed (D,D) Fusion Driven Hybrid Blanket Using Nuclear Waste Actinides. *Nuclear Technology*, 93-105.
31. E, Greenspan. (1984). Fusion-fission Hybrid Reactors. *Advances in Science and Technology*, 289-295.
32. Manson, B., Pigford, T. H., Levi, H. W. (1981). *Nuclear Chemical Engineering*. New York: McGraw-Hill.
33. Acır, A., Canlı, M. E., Taş, S. (2016, 11-13 May). *Finite Element Analysis of the Temperature Distribution in Nuclear Fuel Rod*. Paper presented at 8 th International Ege Energy Symposium, Afyonkarahisar.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TAŞ, Süleyman
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 03/05/1983, Kırşehir
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (543) 6056298
 e-mail : Suleymansolid@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	2017
Lisans	Erciyes Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2010
Lise	Sümer Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016- Halen	Kredi ve Yurtlar Kurumu	Yurt Yön. Per.

Yabancı Dili

İngilizce

Yayınlar

1. Acır, A., Canlı, M. E., Taş, S. (2016, 11-13 May). *Finite Element Analysis of the Temperature Distribution in Nuclear Fuel Rod*. Paper presented at 8 th International Ege Energy Symposium, Afyonkarahisar.

DİZİN

A

Abstract · V
Ansys · 3, 8, 13, 15, 18, 19, 40,
50

B

Blanket · 19, 20, 21, 22, 23, 24,
25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 33,
34, 35, 36, 37, 38, 41, 42, 43,
44, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 53,
54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 62,
63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70

Ç

Çizelge · 13, 14, 72

E

Enerji · 1, 2, 11, 71

F

Füzyon · 2, 3, 5, 6, 9, 10, 11, 71
Fisyon · 2, 3, 5, 6, 11, 13, 14, 15,
19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26,
27, 28, 29, 39, 50, 51, 71

G

Grafik · 19, 29, 39, 50, 51

H

Hibrid · 2, 3, 5, 11, 12, 19, 20,
21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28,
29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36,
37, 38, 41, 42, 43, 44, 45, 46,
47, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55,
56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63,
64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71,
73, 74

I

Isı iletim denklemi · 15
Isı iletim katsayısı · 16

L

LWR · 3, 10, 29, 74
Literatür · 5

Ö

Özgeçmiş · 79

R

Reaktör · 2, 3, 5, 6, 9, 10, 11,
12, 13, 19, 39, 71, 73, 74

S

Scale5 · 3, 13, 19

U

Uranyum · 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15,
72



GAZİ GELECEKTİR..