

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERİN VERİMİ
ÜZERİNDE FARKLI PARAMETRELERİN
ETKİLERİ VE OPTİMİZASYONU**

Aytuğ ÖNER

Kasım,2021

İZMİR

TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERİN VERİMİ ÜZERİNDE FARKLI PARAMETRELERİN ETKİLERİ VE OPTİMİZASYONU

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

Aytuğ ÖNER

Kasım,2021

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

AYTUĞ ÖNER, tarafından **PROF. DR. MEHMET ZOR** yönetiminde hazırlanan **“TERMoeLEKTRİK JENERATÖRLERİN VERİMİ ÜZERİNDE FARKLI PARAMETRELERİN ETKİLERİ VE OPTİMİZASYONU”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet ZOR

Yönetici

Prof. Dr. Evren Meltem TOYGAR

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Levent AYDIN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansım boyunca hem ders hem de tez aşamasında bana hep destek olan ve yardımlarını benden hiç esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet Zor’a sonsuz teşekkür ederim.

Yüksek lisansa başlamak ve akademik olarak ilerlemek için beni her zaman teşvik eden, kendime hep örnek aldığım babam Prof. Dr. Ertuğ ÖNER’e sonsuz teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren ve desteklerini hiç esirgemeyen anneme, başarılarıyla bana her zaman örnek olmuş ablama ve tüm aileme sonsuz teşekkür ederim.

Aytuğ ÖNER

TERMoeLEKTRİK JENERATÖRLERİN VERİMİ ÜZERİNDE FARKLI PARAMETRELERİN ETKİLERİ VE OPTİMİZASYONU

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, termoelektrik jeneratörlerde kullanılan parçaların belirli mekanik ve termal malzeme özelliklerini ele alarak daha yüksek sıcaklarda, daha verimli bir şekilde çalışabilecek termoelektrik modüllerin belirlenmesidir. Termoelektrik modüller n ve p tipi yarı iletken dirsekler ve bunların bağlı olduğu alümina levhalardan oluşur. Dirsekler ile levhalar arasındaki bağlantıyı bakır parçalar sağlar. Bakır parçanın malzeme özellikleri literatürdeki değerlerinde alınmıştır. Geri kalan parçaların Elastiklik modülleri ve ısı genleşme katsayıları belirli değerler arasında alınarak parametre olarak belirlenmiştir. Alümina dış yüzeyleri arasında ki sıcaklık farkı da değişken bir parametre olarak seçilmiştir. Belirlenen bu değişken parametrelerin kombinasyonundan 2187 farklı analiz yapılabileceği bulunmuştur. R programı kullanılarak D-optimal design metoduyla tüm kombinasyonlar arasından 176 tanesi seçilerek analizlerin yapılabileceği hesaplanmıştır. ANSYS programı ile sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak tüm parçalardaki ısı gerilmeleri hesaplanmıştır. Analizler sonucunda bulunan ısı gerilme değerleri için regresyon analizleri yapılarak amaç fonksiyonları belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen kısıtlar altında bu amaç fonksiyonları üzerinden optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu analizler dikdörtgen ve dairesel kesitli dirseklere ayrı ayrı uygulanmıştır. Elastiklik modülü, ısı genleşme katsayısı ve sıcaklık değişken parametrelerinin termoelektrik modülde oluşan ısı gerilmeleri nasıl etkilediği tespit edilmiştir. Sıcaklık farkı arttıkça dirseklerdeki ısı gerilmelerin arttığı, dairesel kesitli dirseklerde dikdörtgen kesite göre daha düşük gerilme değerlerinin oluştuğu görülmüştür

Anahtar kelimeler: Termoelektrik jeneratör, ısı gerilmeleri, sonlu elemanlar analizi, regresyon analizi, optimizasyon

EFFECTS AND OPTIMIZATION OF DIFFERENT PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF THERMOELECTRIC GENERATORS

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the thermoelectric modules that can operate more efficiently at higher temperatures by considering the specific mechanical and thermal material properties of the parts used in thermoelectric generators. Thermoelectric modules consist of n and p type semiconductor legs and alumina plates to which they are attached. Copper parts provide the connection between the legs and the plates. The material properties of the copper part are taken in the values in the literature. Elastic modules and thermal expansion coefficients of the remaining parts were determined as parameters by taking them between certain values.. It was found that 2187 different analyzes could be made from the combination of these variable parameters. By using the R program, it was calculated that 176 of all combinations could be selected and analyzed with the D-optimal design method. The thermal stresses in all parts were calculated using the finite element analysis method with the ANSYS program. For the thermal stress values found as a result of the analyzes, regression analyzes were performed and the objective functions were determined. Then, optimization studies were carried out on these objective functions under the determined constraints. These analyzes were applied to rectangular and circular section legs separately. It has been determined how the modulus of elasticity, coefficient of thermal expansion and temperature variable parameters affect the thermal stresses formed in the thermoelectric module. It has been observed that as the temperature difference increases, the thermal stresses on the elbows increase, and lower stress values occur in the circular section elbows compared to the rectangular section.

Keywords: Thermoelectric generator, thermal stresses, finite element analysis, regression analysis, optimization

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

1.1 Termoelektrik Jeneratörler.....	1
1.2 Literatür Taraması	3

BÖLÜM İKİ - DESIGN OF EXPERIMENTS (DENEYLERİN TASARIMI).. 12

2.1 DOE Teknikleri	12
2.1.1 Randomized Complete Block Design (Rastgele Tam Blok Tasarımı).....	12
2.1.2 Full Factorial Design (Tam Faktöriyel Tasarım)	13
2.1.3 Fractional Factorial Design (Kesirli Faktöriyel Tasarım)	13
2.1.4 Central Composite Design (Merkezi Birleşik Tasarım).....	13
2.1.5 Box-Behnken Design (Box-Behnken Tasarımı)	13
2.1.6 Taguchi Design (Taguchi Tasarımı).....	14
2.1.7 Optimal Design (İdeal Tasarım).....	14

BÖLÜM ÜÇ - MALZEME ÖZELLİKLERİ VE PARAMETRELER.....15

3.1 Malzeme Özellikleri ve Girdi Parametrelerinin Seçimi	16
3.2 D-optimal Tasarım Tekniği Uygulanarak Analiz Sayısının Belirlenmesi.....	17
3.2.1 R Programı Kullanılarak D-optimal Tasarım	18

BÖLÜM DÖRT - SONLU ELEMANLAR ANALİZİ..... 24

4.2 Termoelektrik Modüllerin Katı Model Çizimleri	26
4.3 Isıl Gerilme Analizleri	29
4.3.1 Modelin Kurulması Ve Sınır Şartlarının Uygulanması	29
4.3.2 Sonlu Elemanlar Ağı Oluşturma (Meshing).....	30
4.4 $\Delta T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ Sıcaklık Farkı ve 35 Numaralı Analiz İçin Analiz Sonuçları	31
4.4.1 Dikdörtgen Kesitli 35 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları.....	33
4.4.2 Dairesel Kesitli 35 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları.....	34
4.5 $\Delta T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ Sıcaklık Farkı ve 734 Numaralı Analiz İçin Analiz Sonuçları	38
4.5.1 Dikdörtgen Kesitli 734 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları.....	39
4.5.2 Dairesel Kesitli 734 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları.....	41
4.6 $\Delta T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ Sıcaklık Farkı ve 1470 Numaralı Analiz İçin Analiz Sonuçları ...	45
4.6.1 Dikdörtgen Kesitli 1470 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları.....	46
4.6.2 Dairesel Kesitli 1470 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları.....	47

BÖLÜM BEŞ - REGRESYON ANALİZİ VE OPTİMİZASYON..... 52

5.1 Modelleme	52
---------------------	----

5.1.1 Alümina Gerilme Değerlerinin Regresyon Analizi.....	54
5.1.2 Bakır Gerilme Değerlerinin Regresyon Analizi	60
5.1.3 N Tipi Dirsek Gerilme Değerlerinin Regresyon Analizi.....	64
5.1.4 P Tipi Dirsek Gerilme Değerlerinin Regresyon Analizi	67
5.2 Optimizasyon Algoritmaları	70
5.2.1 Değiştirilmiş Nelder –Mead Algoritması	70
5.2.2 Değiştirilmiş Differential Evolution Algoritması.....	71
5.2.3 Değiştirilmiş Simulated Annealing Algoritması	71
5.2.4 Değiştirilmiş Random Search Algoritması.....	71
5.3 Optimizasyon Senaryoları	72
5.3.1 Dikdörtgen Kesitli n Tipi Dirsek Optimizasyon Sonuçları	73
5.3.2 Dairesel Kesitli n Tipi Dirsek Optimizasyon Sonuçları	74
5.3.3 Dikdörtgen Kesitli p Tipi Dirsek Optimizasyon Sonuçları	75
5.3.3 Dairesel Kesitli p Tipi Dirsek Optimizasyon Sonuçları	77
 BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR	 80
 BÖLÜM YEDİ - DEĞERLENDİRMELER VE YARGILAR	 86
 KAYNAKLAR	 88
 EKLER.....	 91

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Termoelektrik modülün şematik diyagramı.....	2
Şekil 1.2 Termoelektrik modüllerin oluşturduğu TEJ	2
Şekil 1.3 Termoelektrik modül ve kesitleri.....	3
Şekil 1.4 Değişken dirsek yükseklikleri için uygulanan akıma karşı sıcaklık artışı	4
Şekil 1.5 Dirsek uzunlukları ile ısı gerilmeler arasında ki ilişki.....	5
Şekil 1.6 500 ⁰ C sıcaklık farkı ve 1000um bakır kalınlığı için oluşan maksimum Von Mises gerilmesi.....	6
Şekil 1.7 Temel modülün gerilme dağılımı	7
Şekil 1.8 Dirsek sayısı ve iç gerilmeler arasında ki ilişki	7
Şekil 1.9 Değişken parametre gruplarının sıcaklık ve gerilme dağılımları.....	8
Şekil 1.10 Termoelektrik jeneratörün sınır şartları, sıcaklık dağılımı, voltaj dağılımı ve akım dağılımı	9
Şekil 1.11 Farklı kesitlere sahip dirseklerde oluşan gerilmeler	10
Şekil 1.12 Farklı kesitlere sahip dirseklerin uzunlukları ile oluşan gerilmeler arasında ki ilişki.....	10
Şekil 2.1 D-optimal tasarımın 150-200 analiz aralığında uygulanması.....	19
Şekil 3.1 Dikdörtgen kesitli TEM modeli	15
Şekil 3.2 Dairesel kesitli TEM modeli.....	16
Şekil 3.3 D-optimal tasarımın 150-200 analiz aralığında uygulanması.....	19
Şekil 4.1 Tez çalışmasından alınan sıcaklık dağılımı (Baday, 2014)	24
Şekil 4.2 Tekrar yapılan çalışmada elde edilen sıcaklık dağılımı.....	25
Şekil 4.3 Tez çalışmasından alınan Von mises gerilme dağılımı (Baday, 2014).....	25
Şekil 4.4 Tekrar yapılan çalışmada elde edilen Von mises gerilme dağılımı	26
Şekil 4.5 Dikdörtgen kesitli modülün önden görünüşü.....	27
Şekil 4.6 Dikdörtgen kesitli modülün yandan görünüşü.....	27
Şekil 4.7 Dairesel kesitli modülün önden görünüşü.....	28
Şekil 4.8 Dairesel kesitli modülün yandan görünüşü.....	28
Şekil 4.9 Analizde kullanılan sınır şartları.....	30
Şekil 4.10 Dikdörtgensel kesiti için sonlu eleman ağı	31

Şekil 4.11 Dairesel kesit için sonlu eleman ağı	31
Şekil 4.12 $\Delta T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 35 nolu analiz için dikdörtgen kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı	32
Şekil 4.13 $\Delta T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 35 nolu analiz için dairesele kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı	32
Şekil 4.14 Dikdörtgen kesitli 35 numaralı analizin von mises sonuçları.....	33
Şekil 4.15 Dikdörtgen kesitli 35 numaralı analizin alümina asal gerilme sonuçları..	33
Şekil 4.16 Dikdörtgen kesitli 35 numaralı analizin dirsekler için asal gerilme sonuçları	34
Şekil 4.17 Dairesel kesitli 35 numaralı analizin von mises sonuçları.....	34
Şekil 4.18 Dairesel kesitli 35 numaralı analizin alümina asal gerilme sonuçları.....	35
Şekil 4.19 Dairesel kesitli 35 numaralı analizin dirsekler için asal gerilme sonuçları	35
Şekil 4.20 $\Delta T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 734 nolu analiz için dikdörtgen kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı	39
Şekil 4.21 $\Delta T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 734 nolu analiz için dairesele kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı	39
Şekil 4.22 Dikdörtgen kesitli 734 numaralı analizin von mises sonuçları.....	40
Şekil 4.23 Dikdörtgen kesitli 734 numaralı analizin alümina asal gerilme sonuçları	40
Şekil 4.24 Dikdörtgen kesitli 734 numaralı analizin dirsekler için asal gerilme sonuçları	41
Şekil 4.25 Dairesel kesitli 734 numaralı analizin von mises sonuçları.....	41
Şekil 4.26 Dairesel kesitli 734 numaralı analizin alümina asal gerilme sonuçları.....	42
Şekil 4.27 Dairesel kesitli 734 numaralı analizin dirsekler için asal gerilme sonuçları	42
Şekil 4.28 $\Delta T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 1470 nolu analiz için dikdörtgen kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı	45
Şekil 4.29 $\Delta T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 1470 nolu analiz için dairesele kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı	46
Şekil 4.30 Dikdörtgen kesitli 1470 numaralı analizin von mises sonuçları.....	46
Şekil 4.31 Dikdörtgen kesitli 1470 numaralı analizin alümina asal gerilme sonuçları.....	47

Şekil 4.32 Dikdörtgen kesitli 1470 numaralı analizin dirsekler için asal gerilme sonuçları	47
Şekil 4.33 Dairesel kesitli 1470 numaralı analizin von mises sonuçları.....	48
Şekil 4.34 Dairesel kesitli 1470 numaralı analizin alümina asal gerilme sonuçları...	48
Şekil 4.35 Dairesel kesitli 1470 numaralı analizin dirsekler için asal gerilme sonuçları.....	49
Şekil 5.1 Alümina von mises gerilmeleri için amaç fonksiyonları	59
Şekil 5.2 Alümina maksimum asal gerilmeleri için amaç fonksiyonları	60
Şekil 5.3 Dikdörtgen kesit bakır von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu	63
Şekil 5.4 Dairesel kesit bakır von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu	63
Şekil 5.5 Dikdörtgen kesit n tipi von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu	66
Şekil 5.6 Dairesel kesit n tipi von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu.....	66
Şekil 5.7 Dikdörtgensel kesit p tipi von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu.....	69
Şekil 5.8 Dairesel kesit p tipi von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu.....	69
Şekil 5.9 Dikdörtgen kesitli n tipi dirsek optimizasyon sonuçları	74
Şekil 5.10 Dairesel kesitli n tipi dirsek optimizasyon sonuçları	75
Şekil 5.11 Dikdörtgen kesitli p tipi dirsek optimizasyon sonuçları	77
Şekil 5.12 Dairesel kesitli p tipi dirsek optimizasyon sonuçları	78
Şekil 6.1 Isıl genleşme katsayısı değişiminin gerilmelere etkisi.....	81
Şekil 6.2 Elastiklik modüllerinin değişiminin gerilmelere etkisi.....	82

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Malzeme Özellikleri (Abid ve diğer., 2018; Baday ve diğer., 2017; Ring ve diğer., 2007; Sardahi ve diğer., 2015)	17
Tablo 3.2 Girdi parametreleri ve faktör seviyeleri.....	17
Tablo 3.3 D-optimal tasarım ile hesaplanan analizler.....	19
Tablo 4.1 Dikdörtgen kesitli 50 ⁰ C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi)	36
Tablo 4.2 Dikdörtgen kesitli 50 ⁰ C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme).....	36
Tablo 4.3 Dairesel kesitli 50 ⁰ C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi).....	37
Tablo 4.4 Dairesel kesitli 50 ⁰ C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme).....	38
Tablo 4.5 Dikdörtgen kesitli 150 ⁰ C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi)	43
Tablo 4.6 Dikdörtgen kesitli 150 ⁰ C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme).....	43
Tablo 4.7 Dairesel kesitli 150 ⁰ C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi).....	44
Tablo 4.8 Dairesel kesitli 150 ⁰ C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme).....	44
Tablo 4.9 Dikdörtgen kesitli 250 ⁰ C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi)	49
Tablo 4.10 Dikdörtgen kesitli 250 ⁰ C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme).....	50
Tablo 4.11 Dairesel kesitli 250 ⁰ C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi).....	50
Tablo 4.12 Dairesel kesitli 250 ⁰ C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme).....	51
Tablo 5.1 Regresyon analizinde kullanılan modeller ve program kodları	53
Tablo 5.2 Dikdörtgen kesit için alümina von mises gerilmesinin regresyon analizi .	55

Tablo 5.3 Dairesel kesit için alümina von mises gerilmesinin regresyon analizi	56
Tablo 5.4 Dikdörtgen kesit için alümina maksimum asal gerilmesinin regresyon analizi	57
Tablo 5.5 Dairesel kesit için alümina maksimum asal gerilmesinin regresyon analizi.....	58
Tablo 5.6 Dikdörtgen kesit için bakır von mises gerilmesinin regresyon analizi.....	60
Tablo 5.7 Dairesel kesit için bakır von mises gerilmesinin regresyon analizi.....	61
Tablo 5.8 Dikdörtgen kesit için n tipi dirsek von mises gerilmesinin regresyon analizi	64
Tablo 5.9 Dairesel kesit için n tipi dirsek von mises gerilmesinin regresyon analizi	65
Tablo 5.10 Dikdörtgen kesit için p tipi dirsek von mises gerilmesinin regresyon analizi.....	67
Tablo 5.11 Dairesel kesit için p tipi dirsek von mises gerilmesinin regresyon analizi.....	68
Tablo 6.1 Farklı optimizasyon senaryoları için kısıtlamalar ve dirseklerdeki minimum gerilme değerleri.....	84
Tablo 6.2 Farklı optimizasyon senaryoları için önerilen dizayn parametreleri.....	84

BÖLÜM BİR

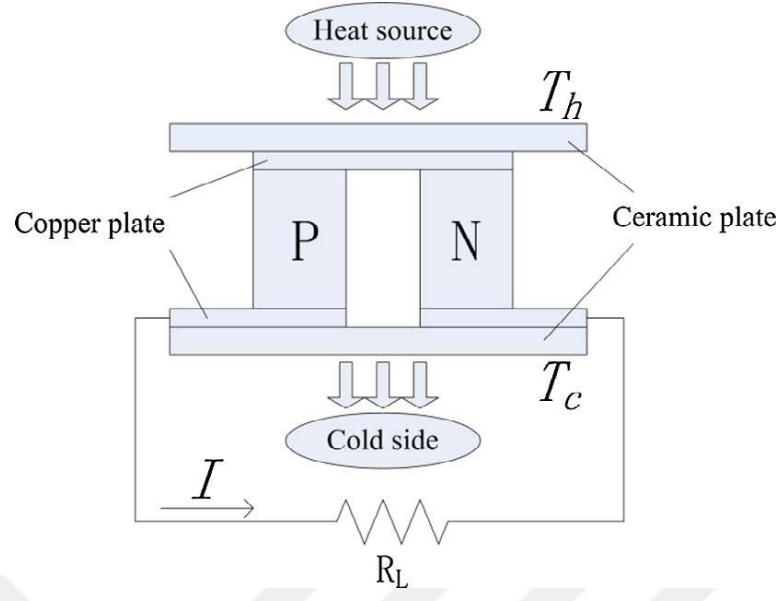
GİRİŞ

1.1 Termoelektrik Jeneratörler

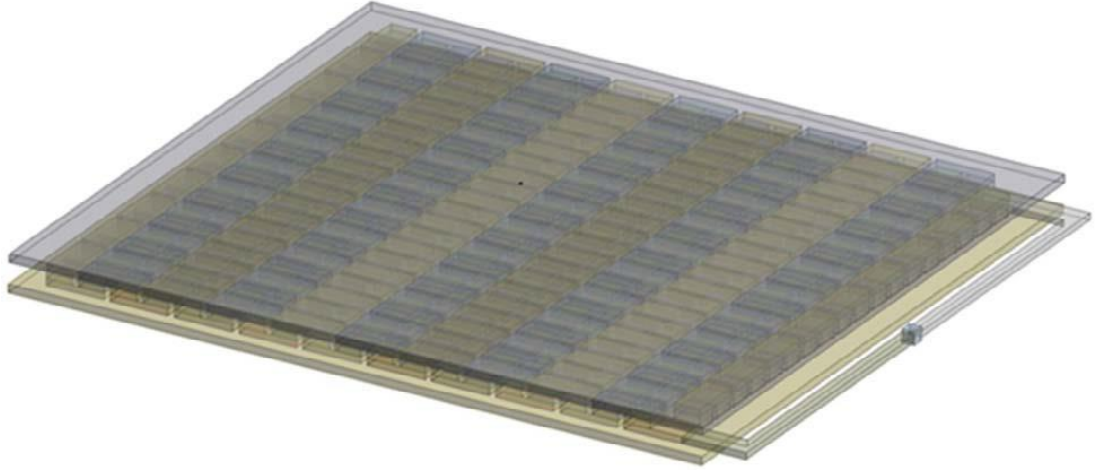
Dünya çapında enerji üretimi çoğunlukla fosil yakıtlara dayalıdır. Fosil yakıtların yakılmasının artmasıyla birlikte atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu önemli ölçüde artmış ve bu da küresel ısınmaya neden olmuştur. Son yıllarda araştırmalar ise daha çok yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi ve yönetimine odaklanmıştır. İlk termoelektrik etki Thomas Seebeck tarafından 1821'de gözlemlenmesine rağmen, enerji üretiminin farklı alternatif yolları arasında termoelektrik uygulamalar daha fazla ilgi görmüştür. Termoelektrik uygulamaları termoelektrik jeneratörler ve soğutucular olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılabilir. Termoelektrik jeneratörler (TEJ'ler), termoelektrik malzemelerin üstün özelliklerini ortaya çıkardığı için daha fazla uygulama alanı bulmuştur. Termoelektrik jeneratörler sağlamlığı, güvenilirliği ve radyasyona karşı duyarsızlığı nedeniyle uzun yıllardır uzay ve kara çalışmalarında kullanılmıştır (Abid, Somdalen ve Rodrigo, 2018).

Isı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen termoelektrik üretim teknolojisi, atık ısı geri kazanım sistemi olarak büyük ilgi çekmiştir. Bir termoelektrik jeneratör, sıcak ısı kaynağı ile soğuk ısı kaynağı arasındaki sıcaklık farkından doğrudan elektrik enerjisi üretebilir. Bununla birlikte sıcaklık farkından dolayı modüldeki parçalarda ısı gerilmeleri oluşur. Isıl gerilmeler modülün dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyebilir (Hori, Kusano, Ito ve Izumi, 1999).

Bir termoelektrik jeneratör modülünün şematik gösterimi Şekil 1.1'de görülmektedir. TEJ modülü p ve n-tipi yarı iletkenler, alümina plakalar ve bakır iletkenlerden oluşur. Bakır iletkenler p ve n-tipi yarı iletkenlere bağlanır ve alümina plakalara sabitlenir. Bu modüllerin bir araya gelmesi ile oluşan termoelektrik jeneratörün şematik gösterimi Şekil 1.2'de görülmektedir.



Şekil 1.1 Termoelektrik modülün şematik diyagramı (Wang ve diğer., 2018)

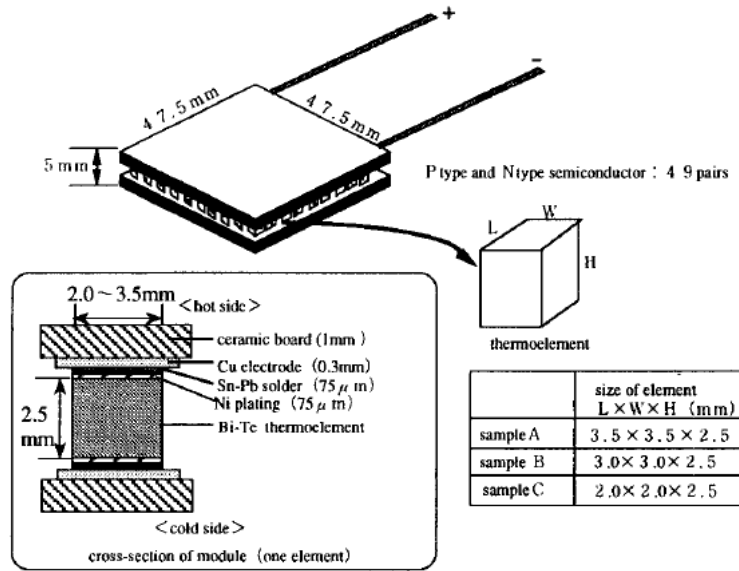


Şekil 1.2 Termoelektrik modüllerin oluşturduğu TEJ (Wang ve diğer., 2018)

1.2 Literatür Taraması

Literatür araştırmasında genellikle termoelektrik modülün elektriksel verimliliğine dair çalışmalar bulunmaktadır. Çalışmamızın odak noktası termoelektrik jeneratörlerde oluşan ısıl gerilmeler olduğu için literatürde daha çok ısıl gerilmelerin etkisini sonlu elemanlar analizleri ile inceleyen yayınlara yoğunluk verilmiştir. Ayrıca geometrik ve ısıl değişimlerin gerilmeler üzerindeki etkilerini araştırıp gerilmeler üzerinde optimizasyon çalışması yapılan yayınlar da incelenmiştir.

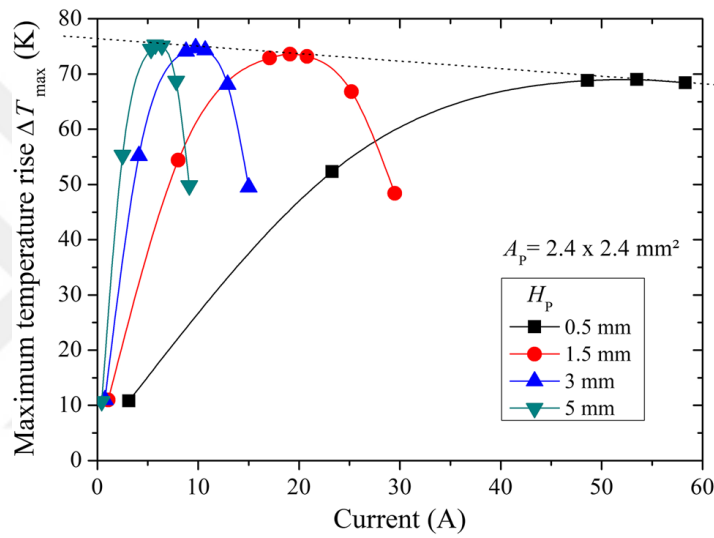
Hori ve diğer. (1999) yaptıkları çalışmada üç farklı kesit alanına sahip modüllerin termo mekanik performansını analiz etmek için bir ısı döngüsü testi yapmışlardır. Daha sonra modülleri ısı döngüsü testi ve öncesi olmak üzere iki ayrı gruba ayırmış ve sonlu elemanlar analizleri ile modüllerde oluşan gerilmeleri incelemişlerdir. Çalışmalar sonucunda elemanların kesit alanının termo mekanik performansı etkilediğini, üretim performansındaki düşüşün modülün dahili elektrik direncindeki artıştan kaynaklandığını gözlemlemişlerdir. Modüllerin bağlanma güçlerinin ısı döngüsü testinden sonra azaldığını tespit etmişlerdir. Şekil 1.3'te çalışmada kullanılan termoelektrik modül ve kesitleri gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Termoelektrik modül ve kesitleri (Hori ve diğer., 1999)

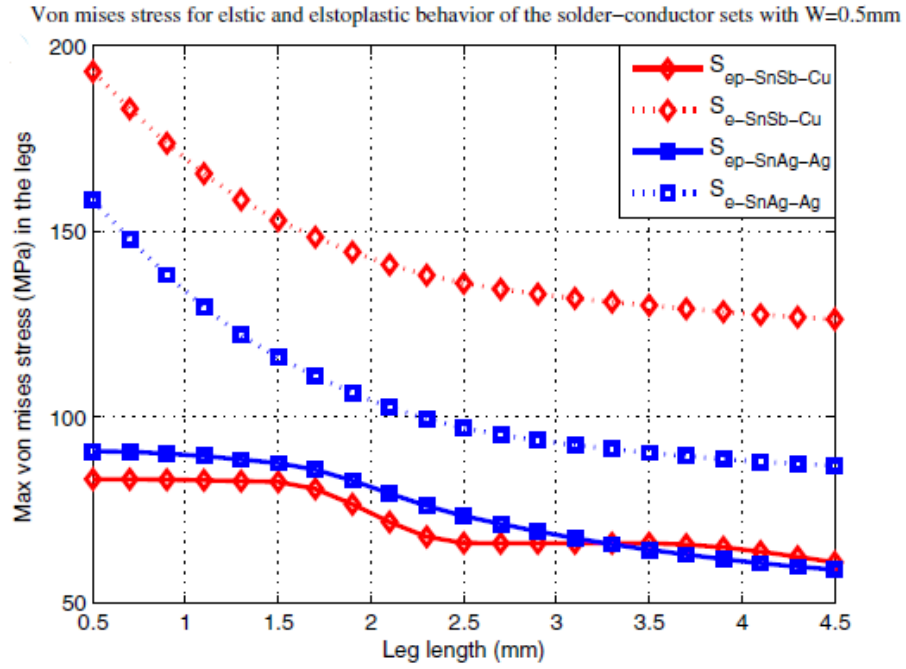
Abid ve diğer. (2018) yaptıkları çalışmada, bir termoelektrik soğutma modülünün çalışma verimini optimize etmek için simülasyonlar ve deneyler

gerçekleştirmişlerdir. Termoelektrik modüllere dört farklı voltaj seviyesi vererek seramik plakalar arasında oluşan sıcaklık farklarını ölçmüşlerdir. Daha sonra farklı kesit alanlarına ve farklı uzunluklara sahip dirsekler için bilgisayar analizleri gerçekleştirerek akım ve sıcaklık arasındaki ilişkileri gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda termoelektrik soğutucu modül boyunca daha yüksek bir sıcaklık artışının, dirsek yüksekliğinin kesit alanına oranının artırılmasıyla elde edilebileceğini gözlemlemişlerdir. Şekil 1.4'te kesit alanı sabit tutulurken değişken dirsek yükseklikleri için uygulanan akıma karşı sıcaklık artışı grafiksel olarak gösterilmiştir.



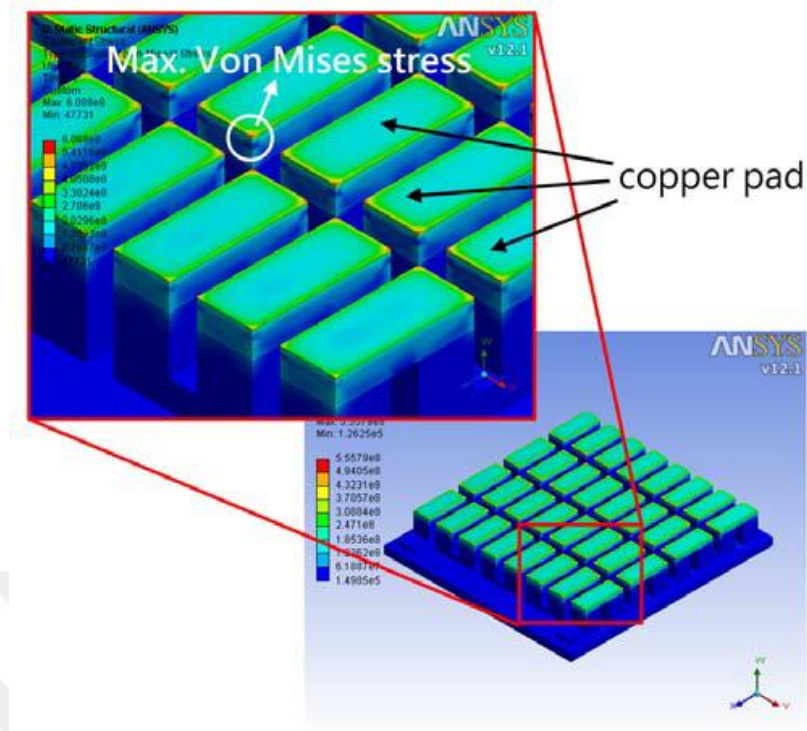
Şekil 1.4 Değişken dirsek yükseklikleri için uygulanan akıma karşı sıcaklık artışı (Abid ve diğer., 2018)

Sarhadi, Bjørk ve Pryds (2015) yaptıkları çalışmada termoelektrik modülün mekanik güvenilirlik ve performans açısından geometrik boyutlarını optimize etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda dirseklerin uzunluğu arttıkça çıkış gücü ve modüldeki ısı gerilmelerin azaldığını gözlemlemişlerdir. Verim değişiminin de dirseklerin genişliğine bağlı olduğunu, ayrıca dirseklerin genişliğinin artırılmasının çıkış gücünü de arttırdığını tespit etmişlerdir. Son olarak plastik bölge sınırına ulaşıldıysa dirsek genişliği arttırıldığı zaman modülde ki ısı gerilmelerin arttığını gözlemlemişlerdir. Şekil 1.5'te 0,5mm dirsek genişliği için dirseklerin uzunluğu ile ısı gerilmeler arasında ki ilişki gösterilmiştir.



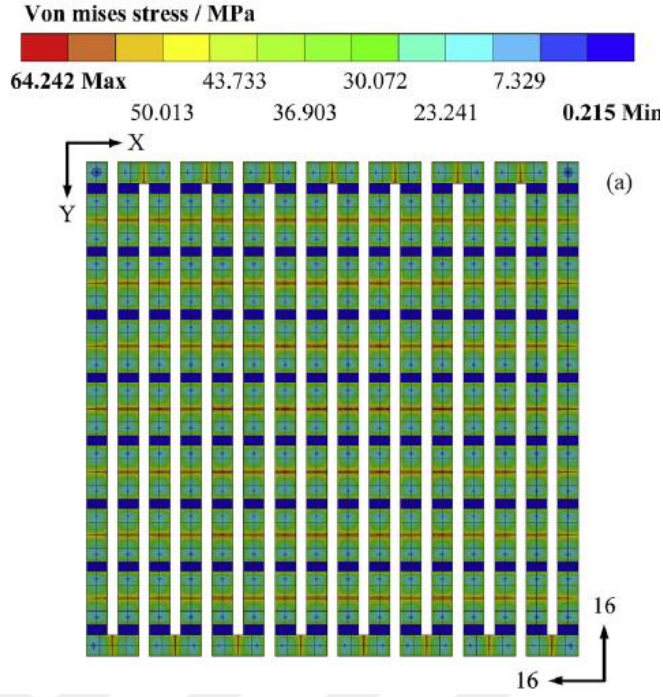
Şekil 1.5 Dirsek uzunlukları ile ısı gerilmeleri arasında ki ilişki (Sarhadi ve diğer., 2015)

Li ve diğer. (2010) farklı sıcaklık değerleri için farklı bakır kalınlıklarını kullanarak sonlu elemanlar analizi ile termoelektrik modülün termo mekanik performansını incelemişlerdir. Aynı sıcaklık değeri ve farklı bakır kalınlıklarında, maksimum güç çıkışının aynı değerde kaldığını; bakır kalınlıkları arttırıldığında oluşan maksimum Von Mises gerilmesinin de arttığını; üst alümina plaka ile bakır plakanın temas yüzeyinde maksimum gerilmenin oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bu sonuçların özellikle daha yüksek sıcaklık farklarında alümina ile bakır arasında ki ısı genleşme katsayısı uyumsuzluğundan meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Şekil 1.6'da 500°C sıcaklık farkında ve 1000mm bakır kalınlığında oluşan maksimum Von Mises gerilmeleri gösterilmiştir.

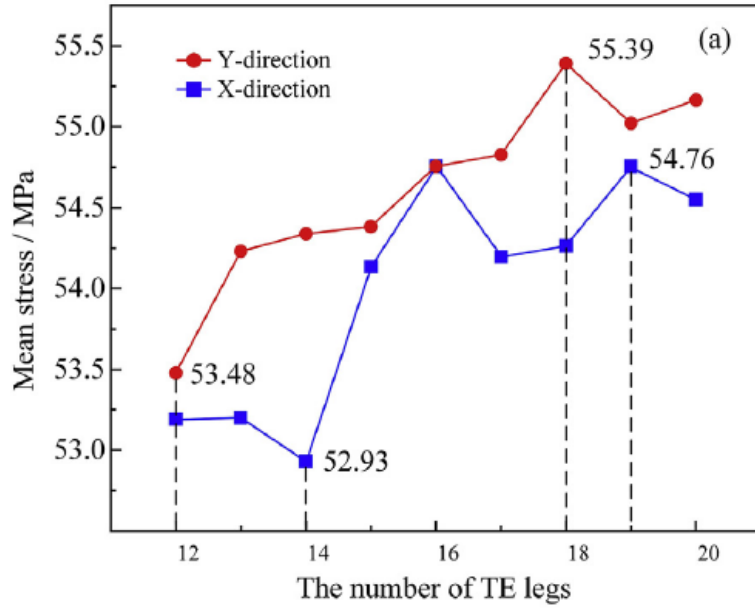


Şekil 1.6 500°C sıcaklık farkı ve 1000µm bakır kalınlığı için oluşan maksimum Von Mises gerilmesi (Li ve diğer., 2010)

Miao, Meng, Zhou ve Zhu (2019) yaptıkları çalışmada esas olarak termoelektrik modüllerin dizilimlerinin etkisini incelemişlerdir. İlk olarak, modüldeki gerilme ve deformasyonun boyutunu ve dağılımını keşfetmek için tek modül üzerinde sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Daha sonra modül yatay olarak genişletilerek 16x16 dirsekli temel modül oluşturularak gerilme ve deformasyon analizleri yapmışlar, son olarak X ve Y eksenlerindeki dirseklerin sayılarını değiştirerek modülün kararlılığı üzerinde ki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, termoelektrik modüldeki gerilmelerin Y eksenı boyunca kademeli olarak arttığını göstermiştir. Şekil 1.7’de oluşturulan temel modülün gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 1.8’de eksenlerdeki dirsek sayısının değişimiyle gerilmeler arasındaki ilişki gösterilmiştir



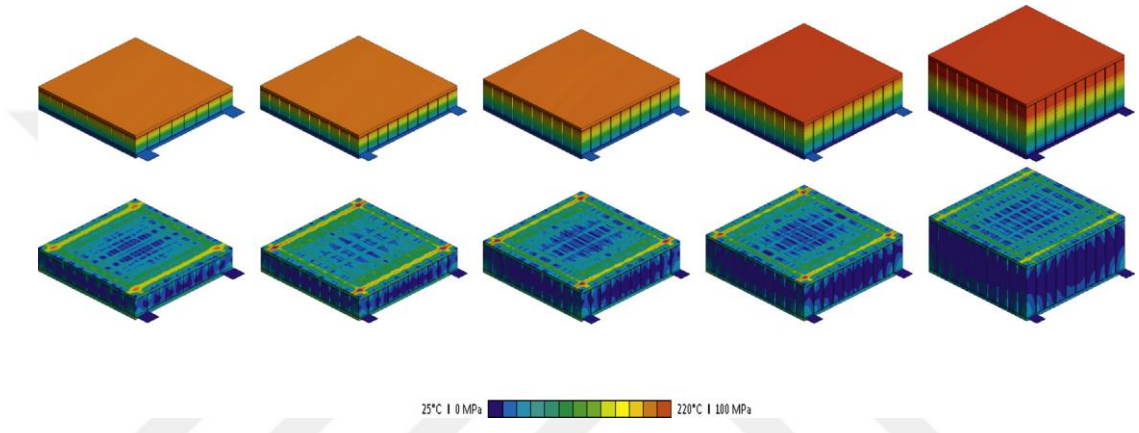
Şekil 1.7 Temel modülün gerilme dağılımı (Miao ve diğer., 2019)



Şekil 1.8 Dirsek sayısı ve gerilmeler arasında ki ilişki (Miao ve diğer., 2019)

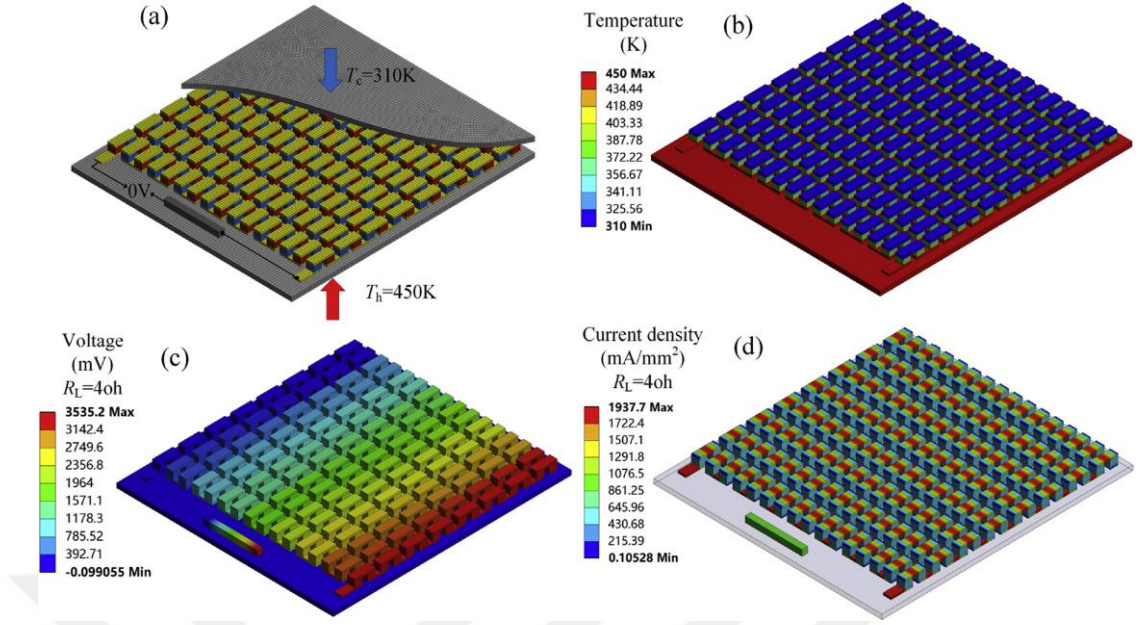
Heghmanns ve Beitelschmidt (2015) yaptıkları çalışmada gerçekçi sınır koşulları altında bir termoelektrik modülün mekanik gerilmesini azaltmak ve elektrik güç yoğunluğunu arttırmak için genetik algoritmaya dayalı çok amaçlı bir optimizasyon süreci tasarlamışlardır. Yüksek hesaplama hızına ulaşabilmek için optimizasyon

modelinde kabul edilebilir basitleştirmeler yapılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon yöntemleri kullanılarak ve termoelektrik modülde ki tüm geometrik değişkenler göz önüne alınarak gerilmelerin önemli ölçüde azaltılabildiğini, bakır bağlantılar ile dirseklerin arasında ki gerilmelerin yine de yüksek çıktığını tespit etmişlerdir ki bu durum yorulma mukavemetini önlemektedir. Gerilmelerde daha fazla bir azalmanın ancak sınır koşullarının değişimiyle veya sıcaklıkların azaltılmasıyla olabileceği yargısına varmışlardır. Şekil 1.9’ da değişken parametre gruplarının üst satırda sıcaklık dağılımları, alt satırda ise von Mises gerilme dağılımları gösterilmiştir.



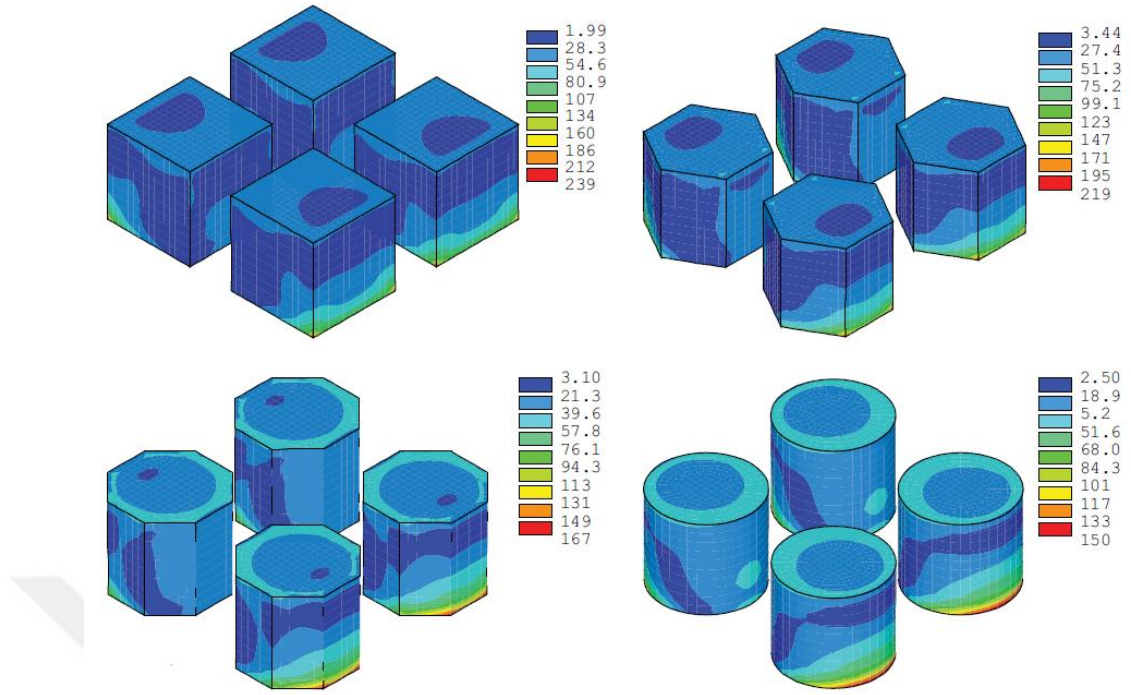
Şekil 1.9 Değişken parametre gruplarının sıcaklık ve gerilme dağılımları (Heghmanns ve Beitelschmidt, 2015)

Luo, Wang, Yu ve Zhou (2020) yaptıkları çalışmada farklı sınır koşulları altında termoelektrik jeneratör ve soğutucunun performansını tahmin etmek için kapsamlı bir model geliştirmişlerdir. Yükseklik, kesit alanı, dirsek sayısı, seramik plaka ile ısı kaybının jeneratör ve soğutucu üzerindeki etkilerini araştırmaları sonucunda nispeten daha düşük dirsek yüksekliğinin, dönüştürme verimliliğinde hafif bir düşüşe rağmen çıkış gücü ve soğutma gücünü arttırdığını tespit etmişlerdir. Dirseklerin toplam kesit alanı artırılırken, termoelektrik jeneratörün daha fazla dirsek sayısına adapte olmayı hedeflediğini, termoelektrik soğutucunun ise her bir dirsek için daha geniş bir alanı hedeflediğini gözlemlemişlerdir. Seramik plakaların optimizasyonu için ısıl iletkenliğin iyileştirilmesine daha fazla dikkat edilmesi gerektiğini önermişlerdir. Ayrıca genel ortamda termoelektrik modül için dolgu maddeleri önerilmemektedir. Şekil 1.10’da çalışmada kullanılan termoelektrik jeneratörün sınır şartları, sıcaklık dağılımı, voltaj dağılımı ve akım dağılımı gösterilmiştir.

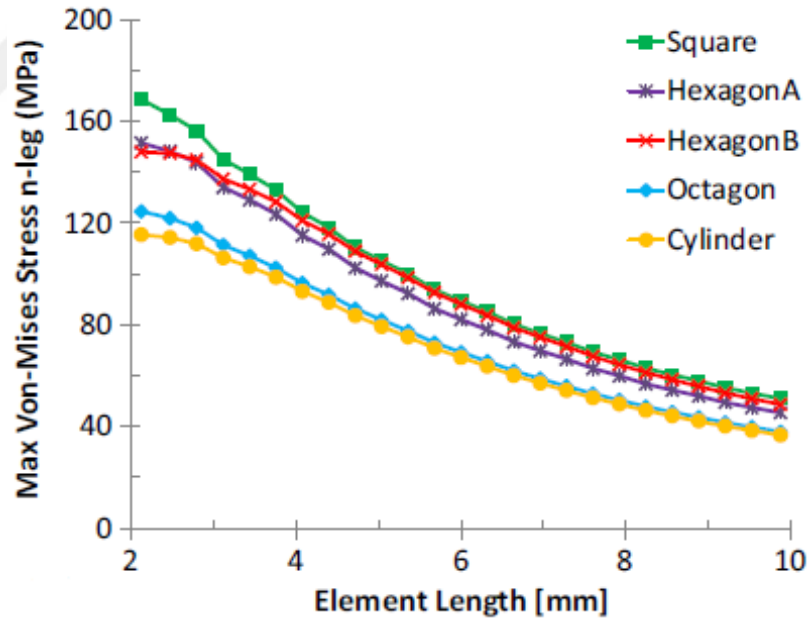


Şekil 1.10 Termoelektrik jeneratörün sınır şartları, sıcaklık dağılımı, voltaj dağılımı ve akım dağılımı (Luo ve diğer., 2020)

Karri ve Mo (2018) dirsek geometrisi, boyutlar, aralık, metalle kaplama kalınlığı ve üretim koşulları gibi termoelektrik modül çifti parametrelerinin gerilmeler üzerinde ki etkisini incelemek için sonlu elemanlar analizleri **ve** termoelektrik malzeme gerilmelerine dayalı olarak yapısal güvenilirlik değerlendirmeleri yapmışlardır. Sınır koşullarının ve işleme sıcaklıklarının, termoelektrik malzemesi ve metalizasyon gerilmeleri ile modül güvenilirliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve üst levhadan uygulanan dış basınç yükünün yapısal güvenilirliği önemli ölçüde arttırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca sonuçlar dirsek uzunluğunun, dirsek kesit şekillerine kıyasla toplam gerilmeler üzerinde daha etkili olduğunu göstermiştir. Dirseklerin kesit geometrisi, daha kısa dirsek uzunluklarında sonuçlar üzerinde daha fazla etkili olmuştur. Şekil 1.11’de dış yük uygulanmamış farklı kesitlere sahip dirseklerde oluşan Von Mises gerilmeleri; Şekil 1.12’de ise dış yük uygulanmamış farklı kesitlere sahip dirseklerin uzunlukları ile oluşan Von mises gerilmeleri arasında ki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 1.11 Farklı kesitlere sahip dirseklerde oluşan gerilmeler (Karri ve Mo, 2018)



Şekil 1.12 Farklı kesitlere sahip dirseklerin uzunlukları ile oluşan gerilmeler arasında ki ilişki (Karri ve Mo, 2018)

Belovski, Aleksandrova ve Aleksandrov (2019) yaptıkları çalışmada termoelektrik soğutucu bir modülün belirlenen parametrelerini kullanarak regresyon analizi yapmışlardır. Zaman, hacim ve akım değerlerini girdi parametreleri olarak seçip

sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklarını çıktı parametresi olarak belirlemişler ve 15 adet deney yapmışlardır. Yapılan regresyon analizi çalışmaları sonunda zaman parametresinin sıcaklıklar üzerinde en etkili girdi değeri olduğunu belirlemişlerdir. Daha sonra sıcaklık değerleri için amaç fonksiyonlarını hesaplamış ve bunları optimizasyon çalışmasında kullanarak hangi girdi parametrelerinde sıcaklık değerlerinin minimum olabileceğini hesaplamışlardır.

Literatür taraması yapıp çalışmalar incelendikten sonra aşağıdaki yargılara varılmıştır:

Yapılan optimizasyon ve analiz çalışmalarında çok az parametre belirlenerek düşük analiz ve deney sayısı ile sonuca gidilmeye çalışılmıştır. Design of experiments (DOE) teknikleri çalışmalarda göz ardı edilmiştir. Optimizasyon metotları çok fazla çeşitlendirilmemiş ve genellikle tek çeşit optimizasyon metodu ile sonuçlar bulunmuştur.

Bu tez çalışmasında termoelektrik modülü oluşturan yarı iletken kesitli dirseklerin alt ve üst alümina levhaların Elastiklik modülleri (E), ısı genleşme katsayıları (α) ve levhalar arası sıcaklık farkı (ΔT) belli aralıklarda teorik olarak değiştirilmiş; bu değişimin modülü oluşturan her bir parçadaki gerilmeleri nasıl etkilediği analizlerle tespit edilmiştir. Analizler dikdörtgen ve dairesel kesitli dirsekler için ayrı ayrı yapılarak geometrinin de etkisi gözlemlenmiştir. DOE teknikleri kullanılarak planlı ve verimli bir analiz sistemi kurulmuştur. Tüm bu analizler için sonlu elemanlar modelleri kurulmuş ve analizler ANSYS programında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları ile Mathematica programında regresyon analizleri yapılmış ve gerilme davranışı için amaç fonksiyonları elde edilmiştir. Bulunan bu amaç fonksiyonları belirlenen kriterlerde çeşitli optimizasyon metotları kullanılarak minimize edilmiştir. Bu amaç fonksiyonları sayesinde, istenilen çalışma sıcaklıklarında, verimli ve güvenli şekilde çalışabilen malzeme kombinasyonları önerilebilmektedir ve bununla ilgili örnek öneriler yapılmıştır.

BÖLÜM İKİ

DESIGN OF EXPERIMENTS (DENEYLERİN TASARIMI)

Deneyisel verilerin optimize edilmesinde kullanılan DOE teknikleri aşağıda açıklanmıştır. Bu tez çalışmasındaki “Deney” terimi Ansys workbench’te yapılan her bir analize karşılık gelmektedir.

Deneylerin tasarımı (DOE), yeni süreçler bulmak, mevcut süreçler hakkında daha fazla bilgi edinmek ve bunları mükemmel bir performans ile optimize etmek için yararlı bir araçtır. Sonuçlar anlamsız verilerden önemli ölçüde etkilenebileceğinden, mevcut verileri analiz etmek için yeterli istatistiksel araçları seçmek çok önemlidir. Rastgele sıralama, engelleme ve çoğaltma DOE'deki istatistiksel yöntemlerin temel ilkeleridir. Çoğaltma, daha doğru bir sonuç elde etmek ve deneySEL hatayı azaltmak için deneyin tekrarıdır. Rastgele sıralama, deneyin yürütüleceği rastgele sırayı tanımlar. Engelleme, bilinen bir sistematik yanlılık etkisini izole etmeyi ve ana etkilerin gizlenmesini engellemeyi amaçlar (Aydın, Artem ve Öterkuş, 2020).

2.1 DOE Teknikleri

DOE yaklaşımının seçimi, deneyin hedeflerine ve dikkate alınacak faktörlerin sayısına bağlıdır. Bu bölümde en yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar listelenmiş ve kısaca açıklanmıştır (Aydın ve diğer., 2020).

2.1.1 *Randomized Complete Block Design (Rastgele Tam Blok Tasarımı)*

DeneySEL bileşenler için işlem dağılımı sınırlı değildir. Ancak uygulamada, deneySEL verilerin nispeten geniş ölçüde değiştiği durumlar vardır. Bu gibi durumlarda, ilişkili olarak yapılan tasarıma Randomized complete block design (RCBD) denir. Bloklamanın temel amacı, bir blok içindeki deneySEL birimler arasındaki değişkenliği en aza indirmek ve bloklar arasındaki değişkenliği en üst düzeye çıkarmaktır (Aydın ve diğer., 2020).

2.1.2 Full Factorial Design (Tam Faktöriyel Tasarım)

İmalat sanayilerinde en sık kullanılan DOE yönteminin tam ve kesirli faktöriyel tasarımlar olduğu genel olarak bilinmektedir. Faktöriyel tasarımlar, bir araştırmacının değişkenlerin etkisi üzerinde tutarlı bir cevap bulmasına izin verebilir. Faktöriyel tasarım, tam veya kesirli faktöriyeler olarak ayrılabilir. Her faktör ayarının birbiri ile gerçekleştiği deneysel tasarım, tam faktöriyel tasarımıdır. Faktör sayısı beş veya daha fazlaysa, tam faktöriyel tasarım çok fazla çalışma gerektirir ve kullanışlı değildir. Bu durumlarda, kesirli faktöriyel tasarım daha verimli bir seçimdir (Aydın ve diğer., 2020).

2.1.3 Fractional Factorial Design (Kesirli Faktöriyel Tasarım)

Araştırmacılar genellikle tam faktöriyel deneyler yapmak için yeterli zamana, paraya ve imkana sahip değildir. Bazı yüksek mertebeden ilişkiler gerekli değilse, birincil etkiler ve ikinci derece mertebeden etkileşimler, tam faktöriyel deneylerin bir kısmı yapılarak elde edilebilir. Kesirli faktöriyel tasarım, araştırmacıların minimum deneysel çalışma ile önemli etkileri keşfetmelerini sağlayan bir dikey sıra düzeni olarak tanımlanabilir (Aydın ve diğer., 2020).

2.1.4 Central Composite Design (Merkezi Birleşik Tasarım)

En popüler “tepki yüzey tasarımı”, faktöriyel bir tasarım oluşturan bir merkezi birleşik tasarımıdır (central composite design). Merkezi birleşik tasarım için beş faktöriyel seviye gerekmektedir. En kritik avantajlarından biri, eğer eğriliğin önemli olmadığı gösterilirse, köşe noktalarının kontrol edilebilmesidir (Aydın ve diğer., 2020).

2.1.5 Box-Behnken Design (Box-Behnken Tasarımı)

Box-Behnken Tasarımı, köşe noktalarından ziyade küp kenarı orta noktalarına dayalıdır ve programın daha az çalıştırılmasını sağlar. Sadece üç faktör seviyesi için geçerlidir. Tarama deneyinde belirtilen eğriliğin gerekli olması durumunda avantajları vardır (Aydın ve diğer., 2020).

2.1.6 Taguchi Design (Taguchi Tasarımı)

Taguchi yöntemleri, robust tasarım yöntemleri olarak adlandırılan istatistiksel yöntemlerdir. Birincil amaç, ortaya çıkan anlamsız verilerin olması durumunda bile çıkış dalgalanmasını en düşük seviyede tutmaktır. Bu teknik mühendislik verimliliğini önemli ölçüde artırır. Taguchi tasarımı, anlamsız veri faktörlerini ve hata miktarını bilinçli olarak göz önünde bulundurarak kaliteyi garanti eder. Bu yaklaşım, tasarım sürecinin birincil işlevini geliştirmeye ve böylece esnek tasarımları teşvik etmeye odaklanır. Ürünün karakteristik değeri üzerinde hangi değişkenin en önemli etkiye sahip olduğunu belirleyememesi ve dinamik olarak değişen prosedürler için uygun olmaması dezavantajlarıdır (Aydın ve diğer., 2020).

2.1.7 Optimal Design (Optimal Tasarım)

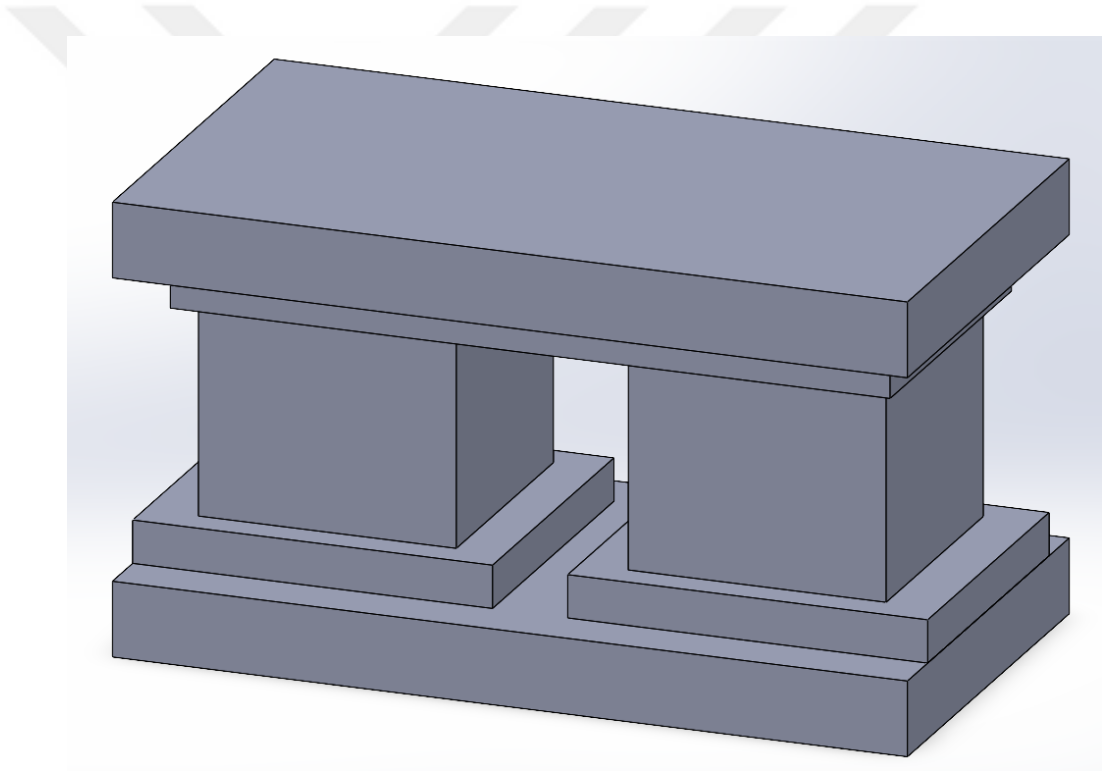
Tüm uygulanabilir deneyler arasında en iyi ve kapsayıcı kısmı içeren bilgisayar destekli bir tasarımıdır. Çeşitli bilgisayar yazılım programları ile optimal tasarım (D-optimal) yöntemi uygulanabilir. Bir seçim yöntemi, seçilen bir faktöre ve belirli sayıda test çalışmasına dayalı olarak en iyi tasarımı oluşturur. Özellikle klasik tasarım yöntemleri kullanılmıyorsa bu yaklaşım çok faydalıdır. Aşağıdaki durumlarda optimal tasarım yöntemini kullanmak avantajlıdır:

- Sarf malzemeleri veya faktör yapılandırmaları kısıtlıysa.
- Tasarım çalışmalarının sayısını azaltmak gerekirse.
- Halihazırda gerçekleştirilen deneyler dahil edildiğinde.
- Deneyler kararsız bir yapıdaysa (Aydın ve diğer., 2020).

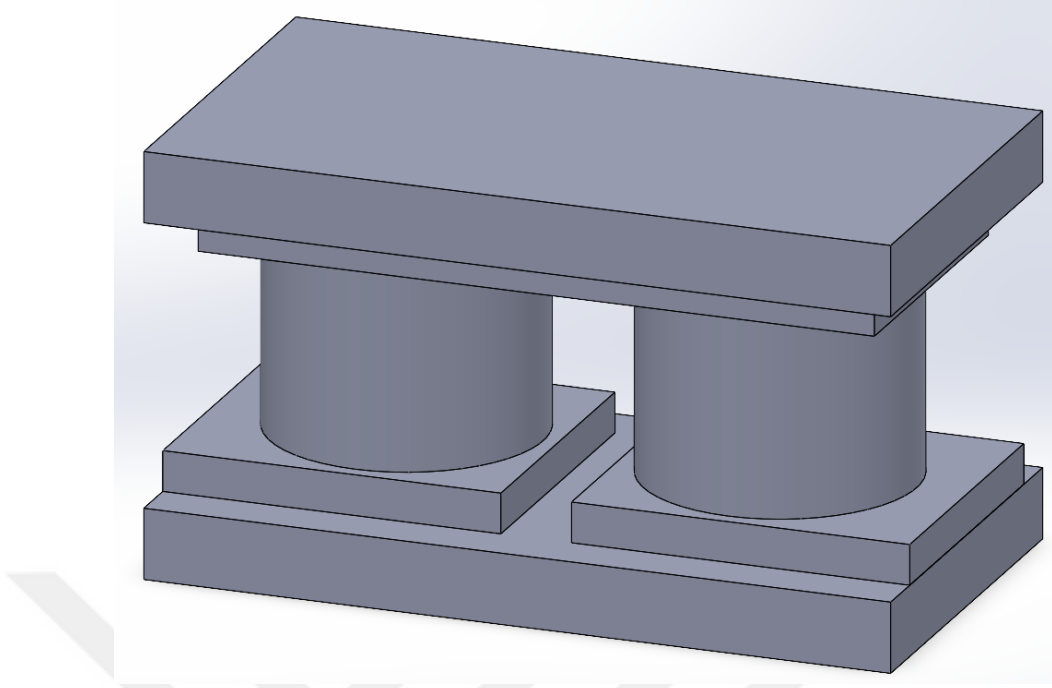
BÖLÜM ÜÇ

MALEME ÖZELLİKLERİ VE PARAMETRELER

Çalışmanın temel amacı, üst ve alt levhalar arasında sıcaklık farkından dolayı oluşan gerilmeleri incelemek ve optimum malzeme özellikleri kombinasyonlarını elde edebileceğimiz genel formüller elde etmektir. Bu sebeple öncelikle dikdörtgen ve dairesel kesitli dirseklere sahip TEM modelleri kurulmuş ve kararlı rejim ısı yapısal gerilme analizleri yapılmıştır. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de TEM modellerinin perspektif görüşünleri verilmiştir.



Şekil 3.1 Dikdörtgen kesitli TEM modeli



Şekil 3.2 Dairesel kesitli TEM modeli

3.1 Malzeme Özellikleri ve Girdi Parametrelerinin Seçimi

Termoelektrik modülde bakır, gümüş, alümina, seramik ve farklı malzeme alaşımlarından oluşan yarı iletken dirsekler kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar ve literatür taranarak üst levhalar için alümina, iletken kısımlar için ise bakır malzemenin kullanılması kararlaştırılmıştır.

Bakır gerçek malzeme özelliklerinde sabit tutulmuştur ve bir girdi parametresi olarak analiz sistemine dahil edilmemiştir. Alümina, n-tipi ve p-tipi dirseklerin Elastiklik modülleri (E) ; ısı genleşme katsayıları (α) değişken girdi parametreleri olarak seçilmiş ve analizlerde belli aralıklarda değiştirilmiştir. Ayrıca üst ve alt levha arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) da değişken bir girdi parametresi olarak analiz sistemine dahil edilmiş ve bu şekilde toplamda 7 farklı girdi parametresi belirlenmiştir. Tablo 3.1’ de gerçek malzeme özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Malzeme Özellikleri (Abid ve diğer., 2018; Baday ve diğer., 2017; Ring ve diğer., 2007; Sardahi ve diğer., 2015)

Malzeme	Yoğunluk (Kg.m ⁻³)	Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	Elastiklik Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Isı İletim Katsayısı (W/m.°C)	Akma Mukavemeti (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)
Alümina	3800	8,1	300	0,22	35	-	-
Bakır	8920	17	110	0,35	391,1	69	588
n-tipi	7740	4	110	0,28	1,397	-	-
p-tipi	7740	12,6	70	0,28	1,387	-	-

Elastiklik modülü ve ısıl genleşme katsayısı dışındaki tüm malzeme özellikleri sabit tutularak analizlerde hiç değiştirilmemiştir. Araştırmalarda dirseklerin malzeme özellikleri aynı ve farklı alınan çalışmalar olduğu görülmüştür. Çalışmamızda n tipi ve p tipi dirsekler farklı malzeme özelliklerinde kabul edilerek teorik olarak daha geniş bir aralık analiz edilmiştir. 7 farklı girdi parametresi için 3 farklı faktör seviyesi belirlenmiştir. Yani bu parametreler alabilecekleri değer olarak belirlenen faktör seviyesi aralığında olacaktır. Tablo 3.2’ de seçilen girdi parametreleri ve faktör seviyeleri gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Girdi parametreleri ve faktör seviyeleri

Girdi Parametreleri	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
$E_{n\text{-tipi}}=x_1$	110 GPa	200 GPa	290 GPa
$\alpha_{n\text{-tipi}}=x_2$	$4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
$E_{p\text{-tipi}}=x_3$	70 GPa	150 GPa	240 GPa
$\alpha_{p\text{-tipi}}=x_4$	$6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$12,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$19,2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
$E_{\text{alümina}}=x_5$	150 GPa	270 GPa	390 GPa
$\alpha_{\text{alümina}}=x_6$	$7,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$13,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$19,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
$\Delta T=x_7$	50°C	150°C	250°C

3.2 D-optimal Tasarım Tekniği Uygulanarak Analiz Sayısının Belirlenmesi

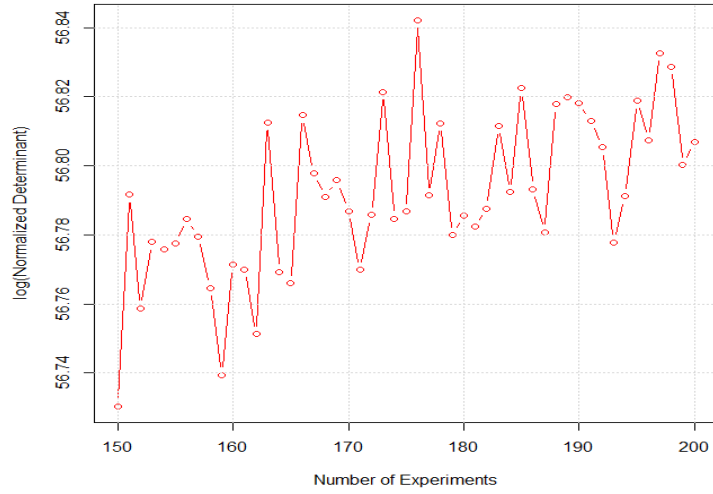
DOE teknikleri incelendiği zaman tam faktöriyel tasarımın en doğru sonucu veren teknik olduğu görülmektedir. Ancak hem iş yükü olarak hem kullanılan bilgisayarların teknolojik kapasitesi olarak tam faktöriyel tekniği çalışmalarda uygulamak verimsiz bir yaklaşımdır.

D-optimal tasarım tekniği, hem bilgisayar destekli bir teknik olması, hem de önceden kapasiteniz ölçeğinde yapılabilecek analiz ve deney sayısını belirtebilmeniz sebebiyle en kapsayıcı DOE tekniğidir. Çalışmamızda hem en verimli hem de en doğru sonuçlara ulaşabilmek açısından girdi parametreleri üzerinde D-optimal tasarım tekniği uygulanmıştır.

3.2.1 R Programı Kullanılarak D-optimal Tasarım

Günümüzde çok çeşitli bilgisayar destekli istatistik programları mevcuttur. Hem analizleri düzenlemek hem de bu analizler üzerinde DOE tekniklerini kolay bir şekilde uygulamak için R programı en yararlı programlardan birisidir. Öncelikle 7 farklı girdi parametresinin her biri 3 farklı değer alabildiğinden 3^7 yani 2187 farklı analiz olduğu hesaplanmıştır. Eğer tam faktöriyel tasarım tekniği kullanılsaydı bu 2187 analizin tamamının yapılması anlamına gelirdi. Bu durumun hem iş yükü hem zaman açısından verimsiz bir yaklaşım oluşturduğu görülmüştür.

D-optimal tasarım ile 2187 analiz arasından belirli bir analiz grubu seçilip bunlar üzerinden çalışılmıştır. Zaman, bilgisayar gücü ve literatürde yapılan regresyon analizi çalışmaları incelendiğinde 25 ila 50 analiz sayısında çalışmalar yapıldığı tespit edilmiştir. Ancak daha doğru sonuçlara ulaşmak ve çalışmanın daha geniş kapsamlı olması için, R programında D-optimal tasarım tekniği seçilerek kararlaştırılan analiz sayısı 150 ile 200 aralığında belirtilmiştir. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere, R programı bu analiz aralığından D-optimal tasarım tekniğini kullanarak 176 analiz yapmanın en optimum sonucu verdiğini göstermiştir. Bu tekniğin en önemli avantajı daha fazla analiz yaparak daha doğru sonucun bulunacağı yanılgısını önlemesidir.



Şekil 3.3 D-optimal tasarımın 150-200 analiz aralığında uygulanması

R programı ile D-optimal tasarım tekniği kullanılarak 2187 analiz arasından kaç tanesinin yapılacağı hesaplanmıştır. R programı D-optimal tasarım yaptıktan sonra ortaya çıkan analiz sayısından bir sonraki aşamada liste halinden seçilen 176 analizi satırlar halinde vermektedir. Tablo 3.3'te çalışmamız boyunca sonlu elemanlar analizinde de kullanacağımız girdi parametreleri listesi gösterilmektedir.

Tablo 3.3 D-optimal tasarım ile hesaplanan analizler

Analiz No	$E_{n\text{-tipi}}$	$\alpha_{n\text{-tipi}}$	$E_{p\text{-tipi}}$	$\alpha_{p\text{-tipi}}$	$E_{\text{alümina}}$	$\alpha_{\text{alümina}}$	ΔT
35	200	20	70	12,6	150	7,6	50
53	200	20	240	12,6	150	7,6	50
55	110	4	70	19,2	150	7,6	50
69	290	12	150	19,2	150	7,6	50
70	110	20	150	19,2	150	7,6	50
86	200	12	70	6	270	7,6	50
101	200	4	240	6	270	7,6	50
115	110	20	70	12,6	270	7,6	50
145	110	4	150	19,2	270	7,6	50
158	200	12	240	19,2	270	7,6	50
159	290	12	240	19,2	270	7,6	50
160	110	20	240	19,2	270	7,6	50
171	290	20	70	6	390	7,6	50
184	110	12	240	6	390	7,6	50
196	110	20	70	12,6	390	7,6	50
197	200	20	70	12,6	390	7,6	50
208	110	4	240	12,6	390	7,6	50
254	200	4	150	19,2	150	13,6	50
274	110	12	70	19,2	150	13,6	50

Tablo 3.3 Devamı

278	200	20	70	19,2	150	13,6	50
306	290	20	70	19,2	150	13,6	50
308	200	4	150	19,2	150	13,6	50
318	290	4	240	19,2	150	13,6	50
346	110	12	240	6	270	13,6	50
350	200	20	240	6	270	13,6	50
352	110	4	70	12,6	270	13,6	50
354	290	4	70	12,6	270	13,6	50
366	290	12	150	12,6	270	13,6	50
378	290	20	240	12,6	270	13,6	50
407	200	4	70	6	390	13,6	50
435	290	4	70	12,6	390	13,6	50
442	110	4	150	12,6	390	13,6	50
480	290	4	240	19,2	390	13,6	50
481	110	12	240	19,2	390	13,6	50
501	290	12	150	6	150	19,6	50
513	290	20	240	6	150	19,6	50
514	110	4	70	12,6	150	19,6	50
533	200	4	240	12,6	150	19,6	50
534	290	4	240	12,6	150	19,6	50
547	110	20	70	19,2	150	19,6	50
589	110	12	240	6	270	19,6	50
594	290	20	240	6	270	19,6	50
630	290	20	70	19,2	270	19,6	50
637	110	20	150	19,2	270	19,6	50
649	110	4	70	6	390	19,6	50
651	290	4	70	6	390	19,6	50
662	200	12	150	6	390	19,6	50
686	200	4	150	12,6	390	19,6	50
692	200	20	150	12,6	390	19,6	50
699	290	12	240	12,6	390	19,6	50
704	200	4	70	19,2	390	19,6	50
725	200	12	240	19,2	390	19,6	50
734	200	12	70	6	150	7,6	150
750	290	4	240	6	150	7,6	150
753	290	12	240	6	150	7,6	150
761	200	12	70	12,6	150	7,6	150
770	200	12	150	12,6	150	7,6	150
773	200	20	150	12,6	150	7,6	150
776	200	4	240	12,6	150	7,6	150
788	200	12	70	19,2	150	7,6	150
792	290	20	70	19,2	150	7,6	150
793	110	4	150	19,2	150	7,6	150
816	290	12	70	6	270	7,6	150
837	290	20	240	6	270	7,6	150
856	110	4	240	12,6	270	7,6	150
857	200	4	240	12,6	270	7,6	150
872	200	20	70	19,2	270	7,6	150
875	200	4	150	19,2	270	7,6	150
877	110	12	150	19,2	270	7,6	150
902	200	4	150	6	390	7,6	150
906	290	12	150	6	390	7,6	150
908	200	20	150	6	390	7,6	150

Tablo 3.3 Devamı

916	110	20	240	6	390	7,6	150
922	110	12	70	12,6	390	7,6	150
935	200	20	150	12,6	390	7,6	150
953	200	20	70	19,2	390	7,6	150
957	290	4	150	19,2	390	7,6	150
959	200	12	150	19,2	390	7,6	150
961	110	20	150	19,2	390	7,6	150
979	110	20	70	6	150	13,6	150
993	290	4	240	6	150	13,6	150
1025	200	20	240	12,6	150	13,6	150
1037	200	4	150	19,2	150	13,6	150
1068	290	12	150	6	270	13,6	150
1071	290	20	150	6	270	13,6	150
1079	200	20	240	6	270	13,6	150
1081	110	4	70	12,6	270	13,6	150
1102	110	12	240	12,6	270	13,6	150
1107	290	20	240	12,6	270	13,6	150
1165	110	12	70	12,6	390	13,6	150
1171	110	4	150	12,6	390	13,6	150
1184	200	12	240	12,6	390	13,6	150
1201	110	12	150	19,2	390	13,6	150
1202	200	12	150	19,2	390	13,6	150
1208	200	4	240	19,2	390	13,6	150
1228	110	12	150	6	150	19,6	150
1241	200	20	240	6	150	19,6	150
1255	110	12	150	12,6	150	19,6	150
1257	290	12	150	12,6	150	19,6	150
1267	110	20	240	12,6	150	19,6	150
1273	110	12	70	19,2	150	19,6	150
1287	290	20	150	19,2	150	19,6	150
1296	290	20	240	19,2	150	19,6	150
1326	290	4	70	12,6	270	19,6	150
1330	110	20	70	12,6	270	19,6	150
1335	290	4	150	12,6	270	19,6	150
1338	290	12	150	12,6	270	19,6	150
1352	200	4	70	19,2	270	19,6	150
1366	110	20	150	19,2	270	19,6	150
1373	200	12	240	19,2	270	19,6	150
1377	290	20	240	19,2	270	19,6	150
1393	110	20	150	6	390	19,6	150
1403	200	20	240	6	390	19,6	150
1405	110	4	70	12,6	390	19,6	150
1409	200	12	70	12,6	390	19,6	150
1435	110	12	70	19,2	390	19,6	150
1444	110	12	150	19,2	390	19,6	150
1470	290	4	150	6	150	7,6	250
1474	110	20	150	6	150	7,6	250
1477	110	4	240	6	150	7,6	250
1503	290	20	150	12,6	150	7,6	250
1507	110	12	240	12,6	150	7,6	250
1527	290	12	150	19,2	150	7,6	250
1532	200	4	240	19,2	150	7,6	250
1538	200	20	240	19,2	150	7,6	250

Tablo 3.3 Devamı

1554	290	12	150	6	270	7,6	250
1562	200	12	240	6	270	7,6	250
1567	110	4	70	12,6	270	7,6	250
1570	110	12	70	12,6	270	7,6	250
1576	110	4	150	12,6	270	7,6	250
1610	200	20	150	19,2	270	7,6	250
1612	110	4	240	19,2	270	7,6	250
1619	200	20	240	19,2	270	7,6	250
1648	110	4	70	12,6	390	7,6	250
1668	290	4	240	12,6	390	7,6	250
1674	290	20	240	12,6	390	7,6	250
1683	290	20	70	19,2	390	7,6	250
1698	290	12	240	19,2	390	7,6	250
1701	290	20	240	19,2	390	7,6	250
1718	200	20	150	6	150	13,6	250
1739	200	4	150	12,6	150	13,6	250
1740	290	4	150	12,6	150	13,6	250
1757	200	4	70	19,2	150	13,6	250
1763	200	20	70	19,2	150	13,6	250
1788	290	12	70	6	270	13,6	250
1804	110	12	240	6	270	13,6	250
1816	110	20	70	12,6	270	13,6	250
1868	200	12	70	6	390	13,6	250
1869	290	12	70	6	390	13,6	250
1870	110	20	70	6	390	13,6	250
1883	200	4	240	6	390	13,6	250
1903	110	12	150	12,6	390	13,6	250
1907	200	20	150	12,6	390	13,6	250
1918	110	4	70	19,2	390	13,6	250
1940	200	12	240	19,2	390	13,6	250
1961	200	20	150	6	150	19,6	250
1964	200	4	240	6	150	19,6	250
1987	110	20	150	12,6	150	19,6	250
1995	290	12	240	12,6	150	19,6	250
2001	290	4	70	19,2	150	19,6	250
2054	200	4	70	12,6	270	19,6	250
2069	200	20	150	12,6	270	19,6	250
2080	110	4	70	19,2	270	19,6	250
2084	200	12	70	19,2	270	19,6	250
2088	290	20	70	19,2	270	19,6	250
2094	290	12	150	19,2	270	19,6	250
2095	110	20	150	19,2	270	19,6	250
2101	110	12	240	19,2	270	19,6	250
2131	110	20	240	6	390	19,6	250
2136	290	4	70	12,6	390	19,6	250
2143	110	4	150	12,6	390	19,6	250
2148	290	12	150	12,6	390	19,6	250
2171	200	4	150	19,2	390	19,6	250
2176	110	20	150	19,2	390	19,6	250
2182	110	12	240	19,2	390	19,6	250
2187	290	20	240	19,2	390	19,6	250

R programı kullanılarak D-optimal tasarım tekniğiyle bulunan analiz grubunun ANSYS programı ile sırasıyla kararlı rejim ısı yapısı analizleri yapılmıştır. Analizler hem dikdörtgen kesitli dirseklere hem de dairesel kesitli dirseklere uygulanmış böylelikle geometrik olarak bir değişken daha çalışmaya eklenmiştir. Daha sonra her malzeme için bulunan Von mises gerilmeleri ve asal gerilmeler listelenmiştir. Buradaki 176 analiz ile regresyon analizi çalışmaları yapılarak bu çıktı parametrelerinin hangi matematiksel fonksiyona göre dağılım gösterdiği hesaplanmış, böylelikle ilk başta belirlenen girdi parametrelerinin faktör seviyeleri içerisinde kalan tüm değerler için istenilen gerilme çıktıları yaklaşık olarak tahmin edilmiştir.



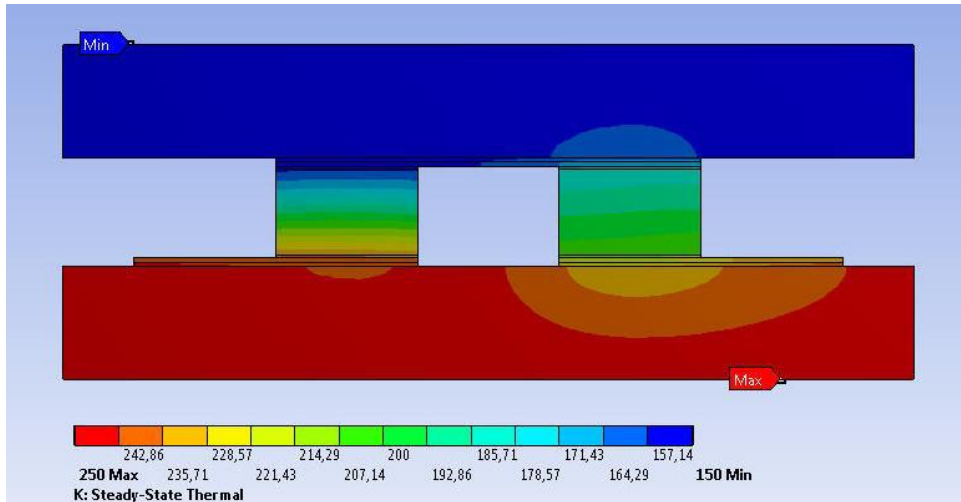
BÖLÜM DÖRT

SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

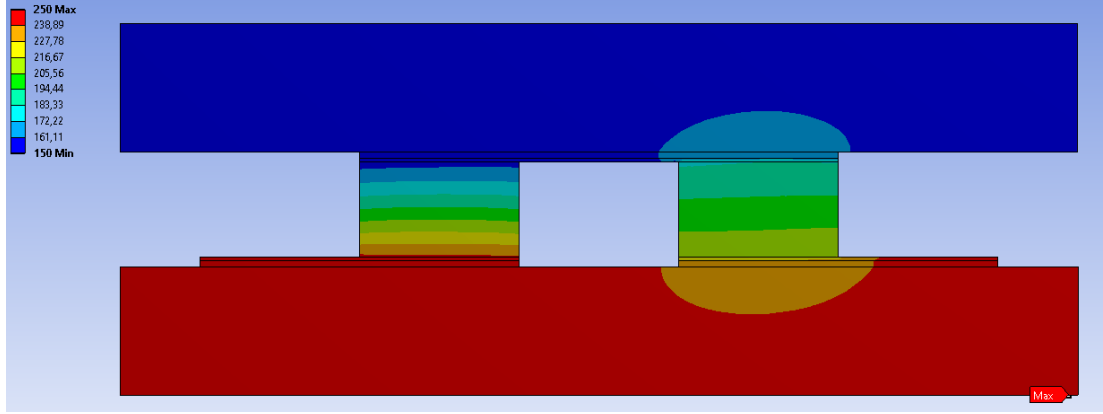
Bu bölümde termoelektrik modülde alt ve üst levhalar arasındaki sıcaklık farkından dolayı oluşan sıcaklık dağılımı ısı gerilmelerin belirlenmesi için ANSYS programı ile sonlu elemanlar analizlerinin nasıl yapıldığı; kullanılan termoelektrik modüllerin Solidworks programı ile nasıl katı modellerinin oluşturulduğu ve sonlu eleman modellerinin geometrik özellikleri açıklanacaktır. Bölüm ikide açıklanan 176 analiz satırı teker teker hem dikdörtgensel kesitli modüller hem de dairesel kesitli modüller için yapılacaktır. Her malzeme için bulunan Von mises gerilmeleri ve asal gerilmeler tablolar halinde verilecektir.

4.1 Benzer Bir Çalışma İle Analizlerin Desteklenmesi

Öncelikle Baday (2014) yaptığı tezdeki çalışma aynen ele alınmış, aynı model ve girdiler için analizler tekrarlanmıştır. Her iki çalışmada da birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Böylece izlediğimiz yolun doğruluğundan emin olunmuş, aşağıda ayrıntıları anlatılan tez çalışmamızdaki analiz girdilerinin ve sonuçlarının doğruluğu desteklenmiştir. Şekil 4.1’de tezden alınan çalışmanın sıcaklık dağılımı gösterilmiş ve Şekil 4.2’de ise tekrar modellenip yapılan analizin sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.

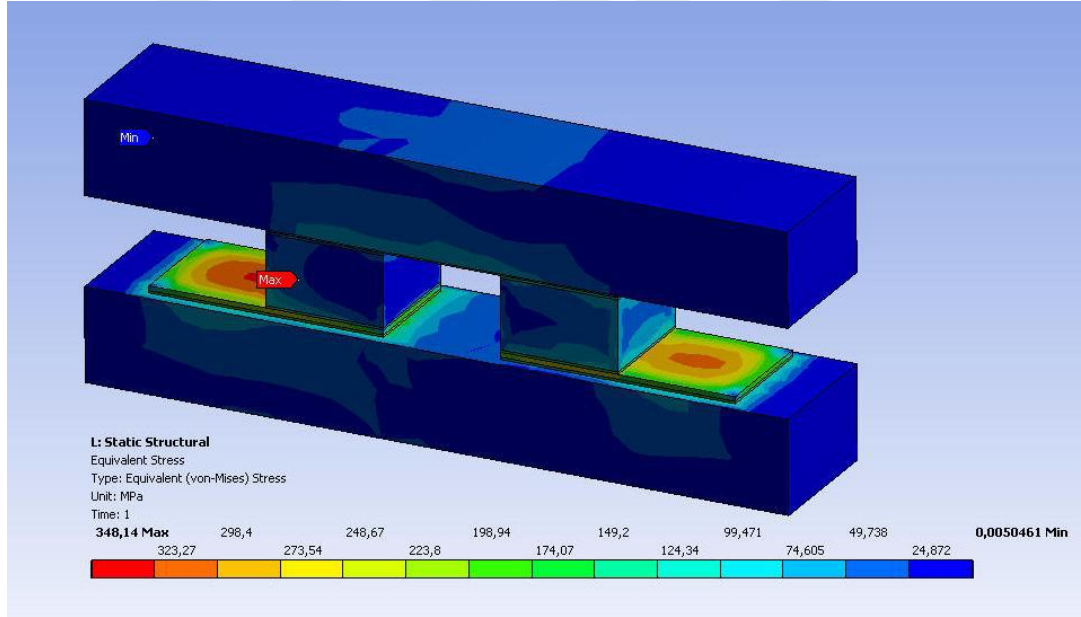


Şekil 4.1 Tez çalışmasından alınan sıcaklık dağılımı (Baday, 2014)

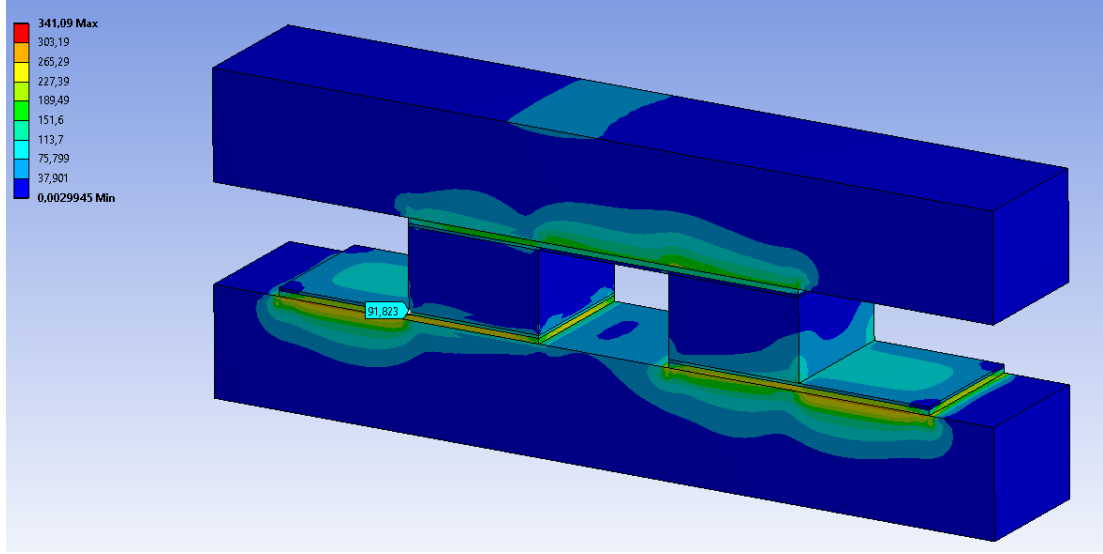


Şekil 4.2 Tekrar yapılan çalışmada elde edilen sıcaklık dağılımı

Sıcaklık dağılımları karşılaştırıldığında, tekrar yapılan çalışmada elde edilen sıcaklık dağılımının tez çalışmasından alınan sıcaklık dağılımı ile çok yakın sonuçlarda olduğu görülmüştür. Şekil 4.3'te tezden alınan çalışmanın Von mises gerilme dağılımı gösterilmiş ve Şekil 4.4'te tekrar modellenip yapılan analizin Von mises gerilme dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Tez çalışmasından alınan Von mises gerilme dağılımı (Baday, 2014)



Şekil 4.4 Tekrar yapılan çalışmada elde edilen Von mises gerilme dağılımı

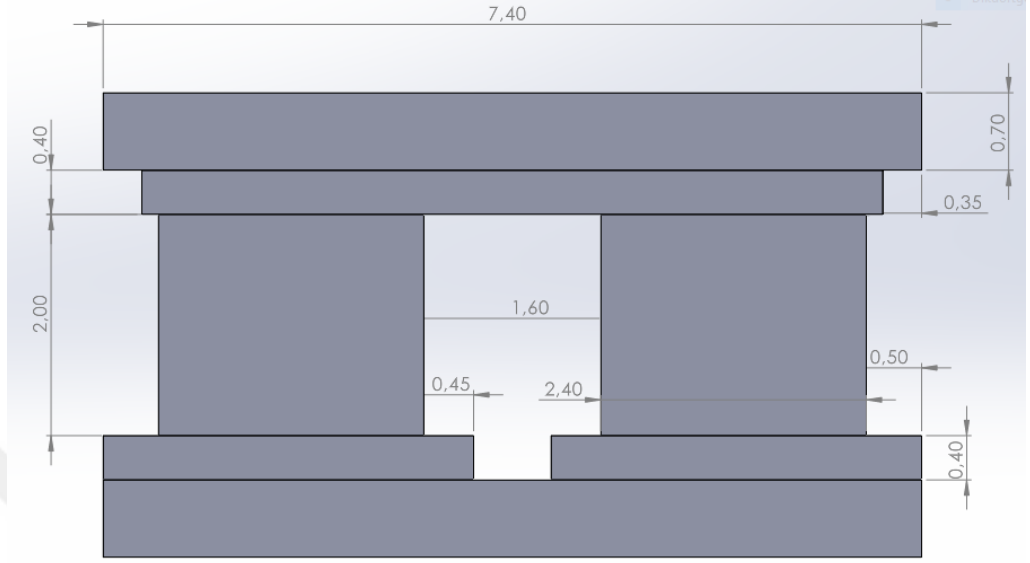
Von mises gerilme dağılımları incelendiğinde, maksimum gerilme hem alınan çalışmada hem de tekrar yapılan çalışmada 340 MPa üzeri bulunmuştur. Yarı iletken dirseklerin keskin köşelerinde her iki çalışmada da yaklaşık 90 MPa gerilme değeri bulunmuştur. Görsel olarak gerilme dağılımları hem kullanılan ANSYS programlarının versiyon farklılıklarından hem de renk skalası sebebiyle ufak farklılıklar göstermektedir. Ancak bulunan sonuçların yakınlığı tekrar kurgulanan analizin doğruluğunu göstermektedir.

4.2 Termoelektrik Modüllerin Katı Model Çizimleri

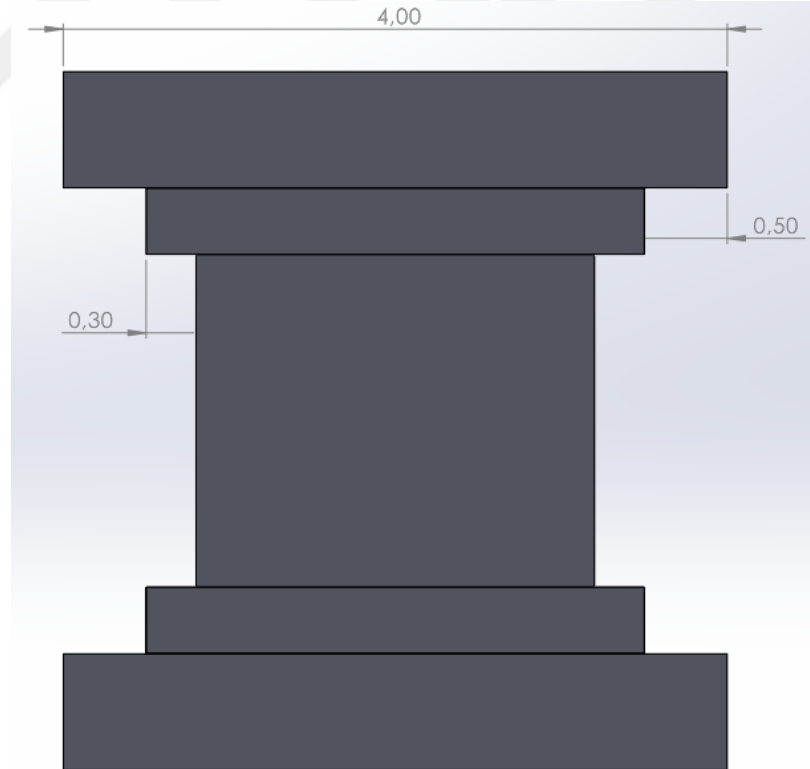
Bu çalışmada asıl incelenen, analiz ve optimizasyonu yapılan Ferrotec-NORD firmasının geliştirdiği ve dirsek boyutları 2,4 mm x 2,4 mm x 2 mm olan termoelektrik modüllerdir. Katı modeller Solidworks Premium 2021 programı kullanılarak kurulmuştur.

Katı modellerin oluşturulmasında dikkat edilmesi gereken nokta dikdörtgen kesitli dirsekler ile dairesel kesitli dirseklerin sahip oldukları kesit alanlarını ve yükseklikleri aynı olması sebebiyle de hacimlerini aynı almaktır ki, geometrinin etkisi ancak bu şekilde doğru karşılaştırılabilir. Şekil 4.5'te geometrik ölçüleriyle birlikte dikdörtgen kesitli termoelektrik modülün önden görünüşü gösterilmiştir. Dirsekler 2.4 mm x 2.4 mm ölçülerinde olduğundan alanları $5,76 \text{ mm}^2$ çıkmıştır.

Şekilde 4.6’da dikdörtgensel kesitli termoelektrik modülün sol yandan görünüşü gösterilmiştir.

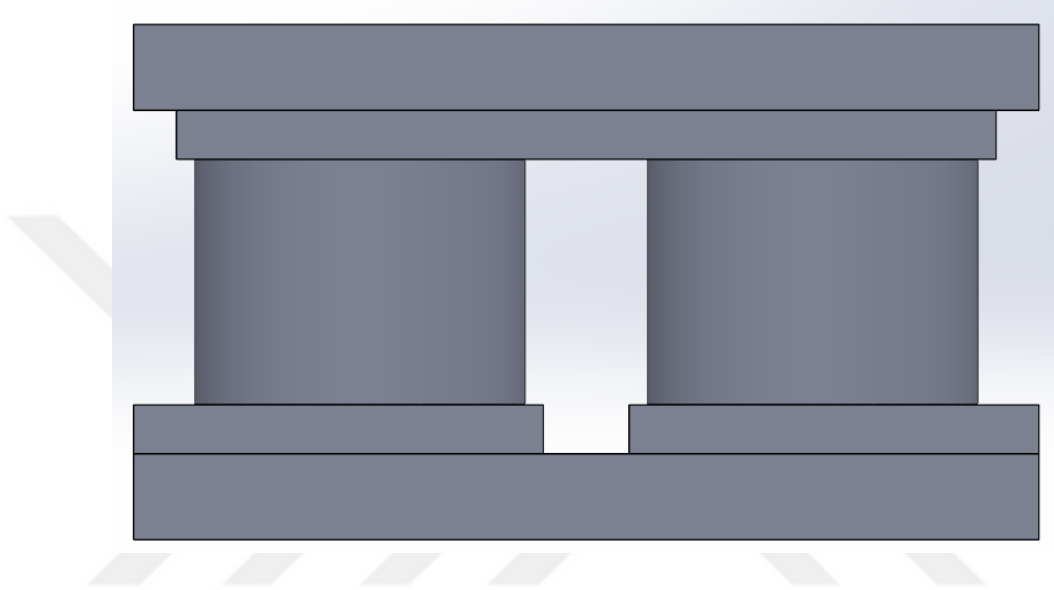


Şekil 4.5 Dikdörtgen kesitli modülün önden görünüşü

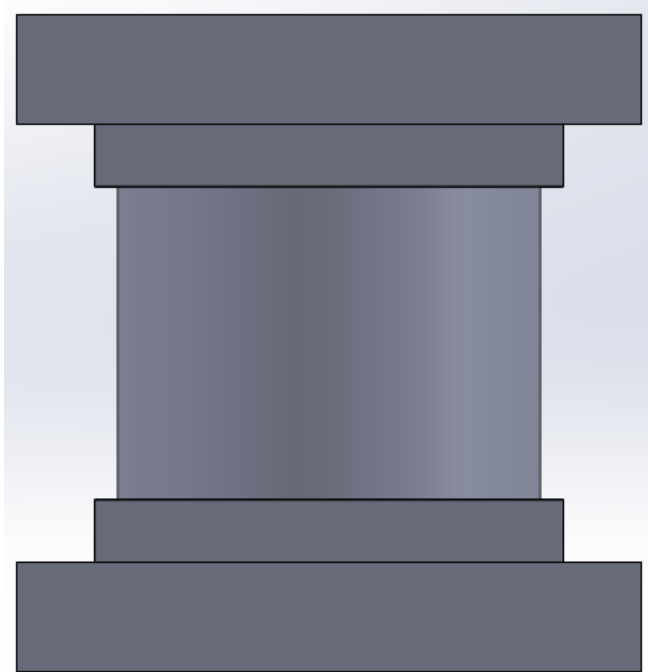


Şekil 4.6 Dikdörtgen kesitli modülün yandan görünüşü

Dairesel kesitli dirseklerin çiziminde bakır bağlantılar ile alümina alt ve üst yüzeyler dikdörtgen kesit ile aynı ölçülerde alınmıştır. Dirseklerin yükseklikleri yine aynı şekilde 2 mm alınmıştır ve dikdörtgen kesit ile aynı kesit alanı ve hacme sahip olmaları için daireesel kesitin çapı 2,708 mm alınmıştır. Şekil 4.7’de daireesel kesitli termoelektrik modülün önden görünüşü; Şekil 4.8’de ise daireesel kesitli termoelektrik modülün sol yandan görünüşü gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Dairesel kesitli modülün önden görünüşü



Şekil 4.8 Dairesel kesitli modülün yandan görünüşü

4.3 Isıl Gerilme Analizleri

Isıl gerilme analizi art arda iki farklı analiz içermektedir. Bu analizler, termoelektrik modül boyunca sıcaklık dağılımını gözlemlemek için yapılan kararlı rejim ısı analiz ve termoelektrik modülün yüzeyleri arasında ki sıcaklık farkından dolayı oluşan ısıl gerilmeleri tespit etmek için yapılan statik yapısal analizdir.

İlk olarak kararlı rejim ısı analiz yapılır. Zamana bağlı analiz yapılmamasının sebebi sıcaklıkların maksimum seviyede olduğu son an olan kararlı rejim halinin gerilmeler açısından en kritik durumu arz etmesidir. Çünkü bu son durumda sıcaklıklar maksimum seviyeye çıkacak, malzemeler maksimum seviyede genişlemek isteyecek ve birbirlerine maksimum düzeyde etki edeceklerdir. Modele sınır şartları girilip ısıl yükleme uygulandıktan sonra çözüm yapılır. Kararlı rejim ısı analizden sonra analizden elde edilen ısıl sonuçlar statik yapısal analize aktarılır. Son olarak statik yapısal analizler yapılarak ısıl gerilmeler elde edilir.

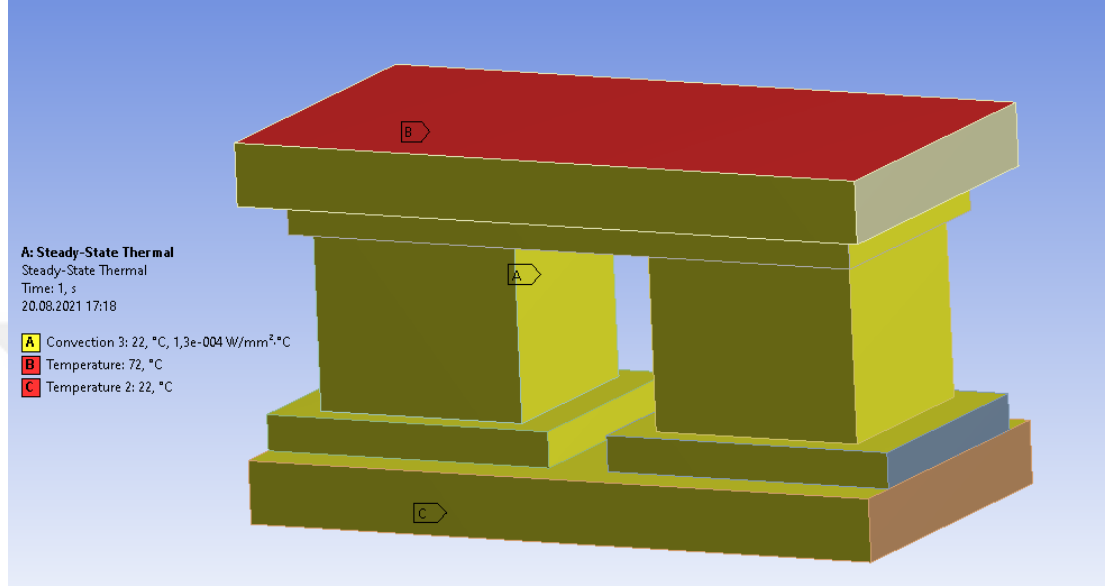
4.3.1 Modelin Kurulması Ve Sınır Şartlarının Uygulanması

Solidworks programı ile çizilen katı modeller ANSYS Workbench programına aktarılarak sonlu elemanlar analizinin ilk adımı atılır. Yapısal sınır şartı olarak modele herhangi bir kısıtlama uygulanmamıştır. Model tamamen uzayda serbest bir biçimde durmaktadır. Bunun yapılmasının sebebi herhangi bir mesnet uygulaması ile gerilmelerde farklılık yaratmamaktır. Oluşan gerilmeler sadece üst ve alt levha arasında ki sıcaklık farkından dolayı meydana gelmektedir.

Modelin hava ile temas eden dış yüzeylerine $130 \text{ W/ (m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C)}$ 'lik ısı taşınım katsayısı uygulanmıştır. Alümina levhaların sıcaklık yükü uygulanan üst ve alt yüzeylerine taşınım katsayısı uygulanmamıştır. Ayrıca termoelektrik modüller yan yana birleştirilerek termoelektrik jeneratörleri oluşturduğundan modüllerin birbirine temas eden yüzeylerinin hava ile temasları olmadığından ısı taşınım katsayısı uygulanmamıştır.

Modelin alt levha yüzeyi soğuk kısım ve üst levha yüzeyi sıcak kısım olarak alınmıştır. Soğuk levha yüzeyi $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta sabit tutulmuştur ve bu sıcaklık

değeri aynı zamanda dış ortam sıcaklığı olarak alınmıştır. Levhalar arası sıcaklık farkı ΔT : 50 °C, 150 °C ve 250 °C olacak şekilde üst levha sıcaklığı sırasıyla 72 °C, 172 °C ve 272 °C alınmıştır. Şekil 4.9’da 35 numaralı analizin dikdörtgen kesit için sınır şartları gösterilmiştir.

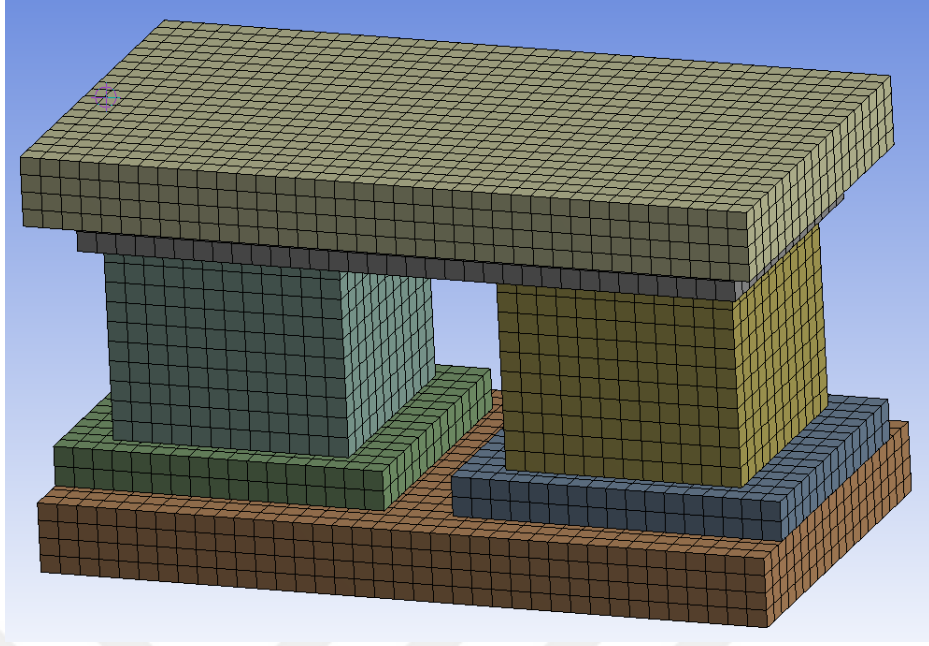


Şekil 4.9 Analizde kullanılan sınır şartları

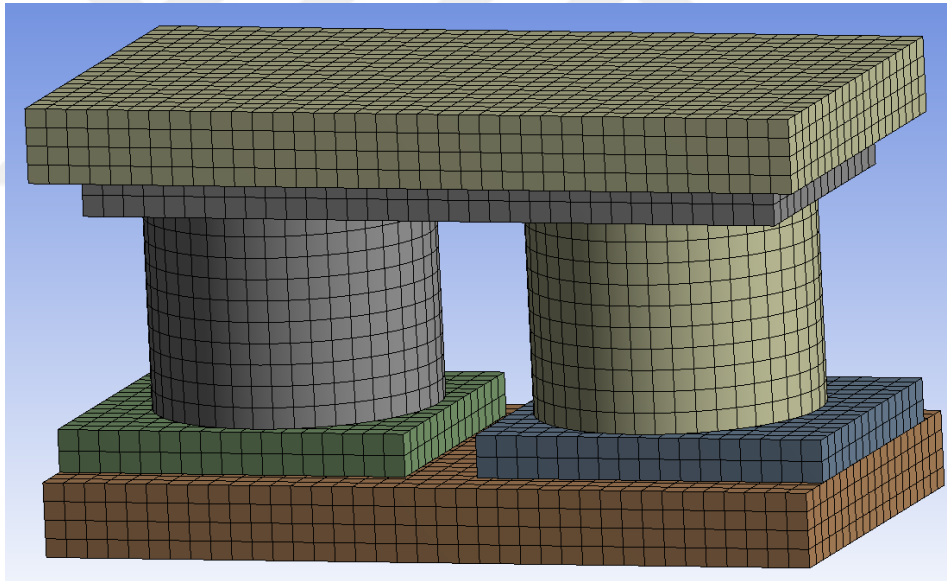
4.3.2 Sonlu Elemanlar Ağı Oluşturma (Meshing)

Model kurulup sınır şartları uygulandıktan sonra çözüm işleminden önce mesh atma yani katı modeli birim elemanlara ayırma işlemi yapılır. Mesh işleminde eleman boyutları ne kadar küçük seçilirse bulunan sonuçlar o kadar gerçeğe yakınsar. Ancak çok küçük eleman boyutları seçmek çözüm süresini çok uzatabilir. Sınır şartlarının uygulanması ve mesh işleminin tamamlanmasının ardından programa otomatik olarak çözüm yaptılır.

Yapılan analizlerde daha gerçekçi sonuçlar alabilmek için hem dikdörtgen, hem dairesel kesit için mesh eleman boyutu 0,2 mm seçilmiştir. Bu mesh işleminde dikdörtgen kesit için düğüm sayısı 55835 ve eleman sayısı 10840; dairesel kesit için ise düğüm sayısı 82477 ve eleman sayısı 17140 bulunmuştur. Şekil 4.10’da dikdörtgen kesit için ve şekil 4.11’de dairesel kesit için sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Dikdörtgensel kesiti için sonlu eleman ağı

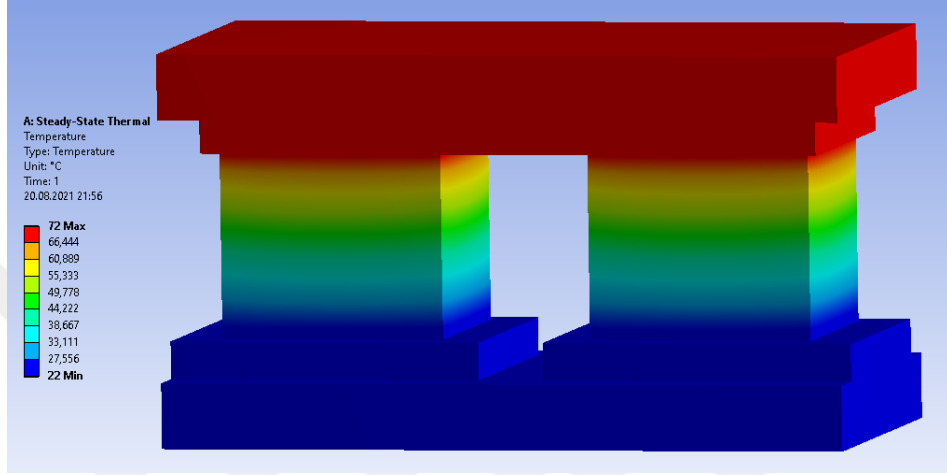


Şekil 4.11 Dairesel kesit için sonlu eleman ağı

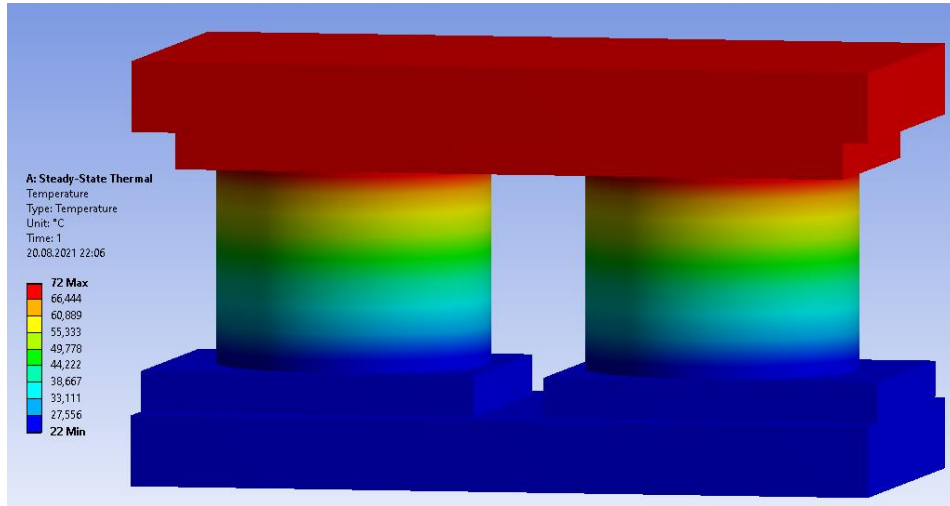
4.4 $\Delta T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ Sıcaklık Farkı ve 35 Numaralı Analiz İçin Analiz Sonuçları

Sınır şartları ve mesh işlemi yapıldıktan sonra çözüm aşamasına geçilmiştir. R programı kullanılarak D-optimal tasarım tekniği ile bulunan 176 analiz sırası ile yapılmıştır. Malzemelerde oluşan Von-mises gerilmeleri, maksimum ve minimum asal gerilmeler bulunmuştur. Bu bölümde 176 analiz arasından sıcaklık farkı $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

olanlar incelenmiştir. Alt levha 22 °C de sabit tutulmuştur ve üst levha sıcaklığı 72 °C alınmıştır. Tablo 3.3'te malzeme özellikleri verilen 35 numaralı analiz öncelikle yapılmış, kararlı rejim ısı analiz çözdürüldükten sonra ortaya çıkan sıcaklık dağılımı yük olarak statik yapısal analize aktarılmıştır. Dikdörtgen ve dairesel kesitli dirseklere sahip modeller için sıcaklık dağılımları Şekil 4.12'de ve 4.13'te sırasıyla gösterilmiştir.



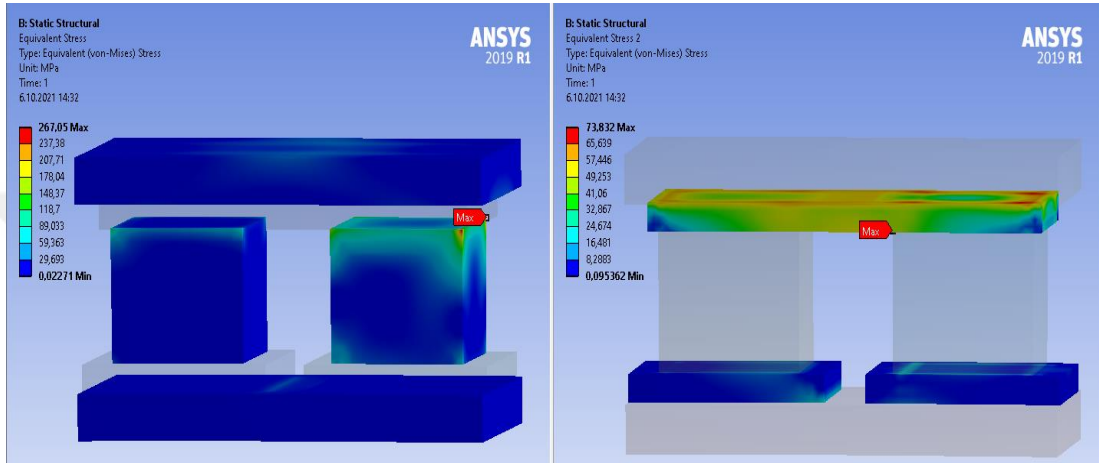
Şekil 4.12 $\Delta T = 50$ °C ve 35 nolu analiz için dikdörtgen kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı



Şekil 4.13 $\Delta T = 50$ °C ve 35 nolu analiz için dairesel kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı

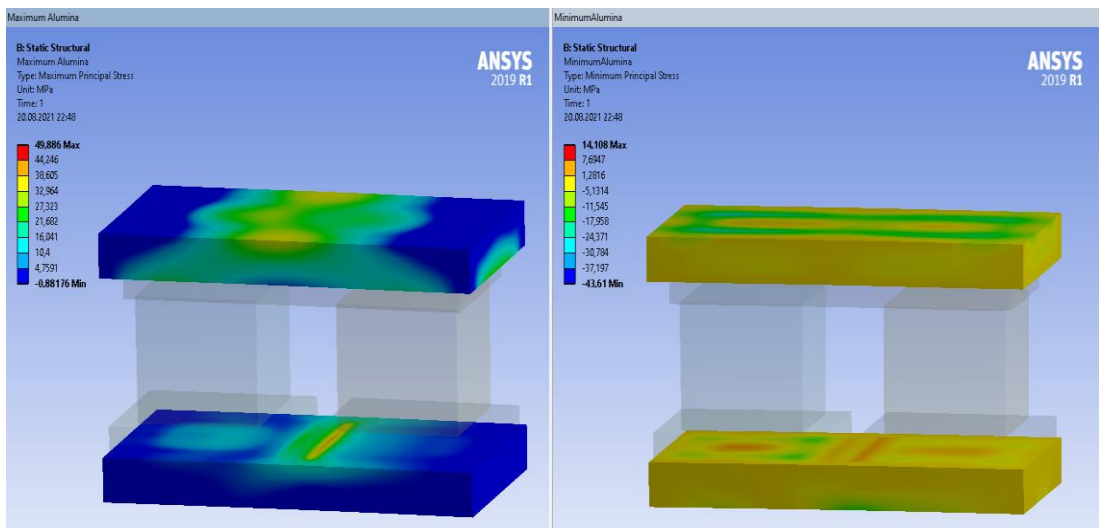
4.4.1 Dikdörtgen Kesitli 35 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları

Dikdörtgen kesitli termoelektrik modül için Tablo 3.3'te girdileri verilen 35 numaralı analizin gerilme sonuçları incelendiğinde; alümina için 63,421, bakır için 73,832 MPa, n tipi dirsek için 267,05 MPa ve p tipi dirsek için 113,22 MPa Von mises gerilmesi bulunmuştur. Şekil 4.14'te her malzeme için gerilmeler gösterilmiştir.



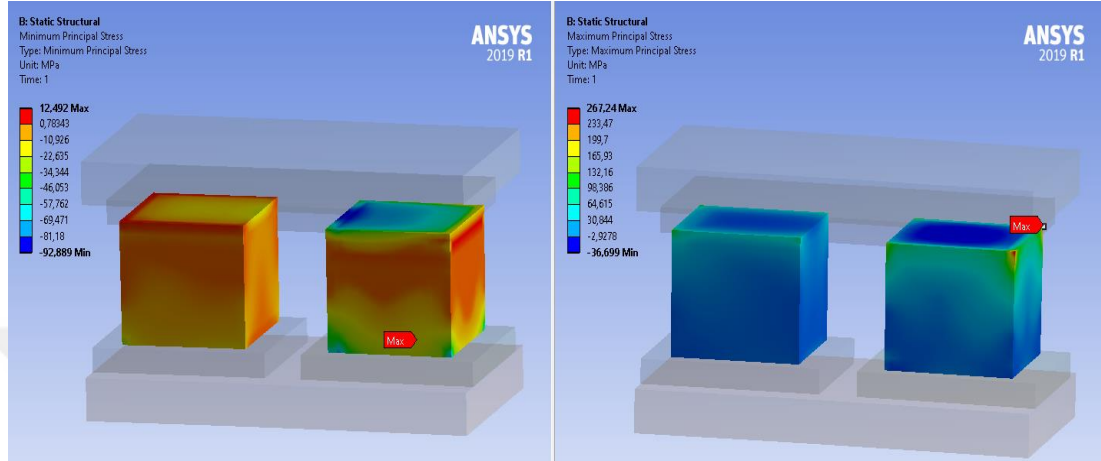
Şekil 4.14 Dikdörtgen kesitli 35 numaralı analizin von mises sonuçları

Alümina için asal gerilmeler incelendiğinde maksimum asal gerilme 49,886 MPa ve minimum asal gerilme -43,61 MPa bulunmuştur. Şekil 4.15'te alümina için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Dikdörtgen kesitli 35 numaralı analizin alümina asal gerilme sonuçları

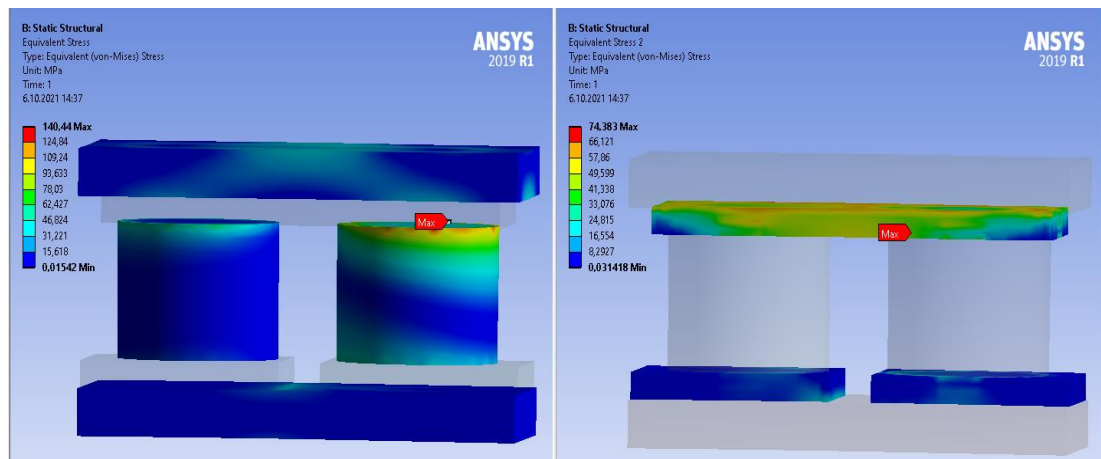
Dirsekler için asal gerilmeler incelendiğinde n tipi dirsek için maksimum asal gerilme 267,24 MPa, minimum asal gerilme -92,889 MPa bulunmuştur. P tipi dirsek için maksimum asal gerilme 121,46 MPa, minimum asal gerilme -32,624 MPa bulunmuştur. Şekil 4.16’da dirsekler için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Dikdörtgen kesitli 35 numaralı analizin dirsekler için asal gerilme sonuçları

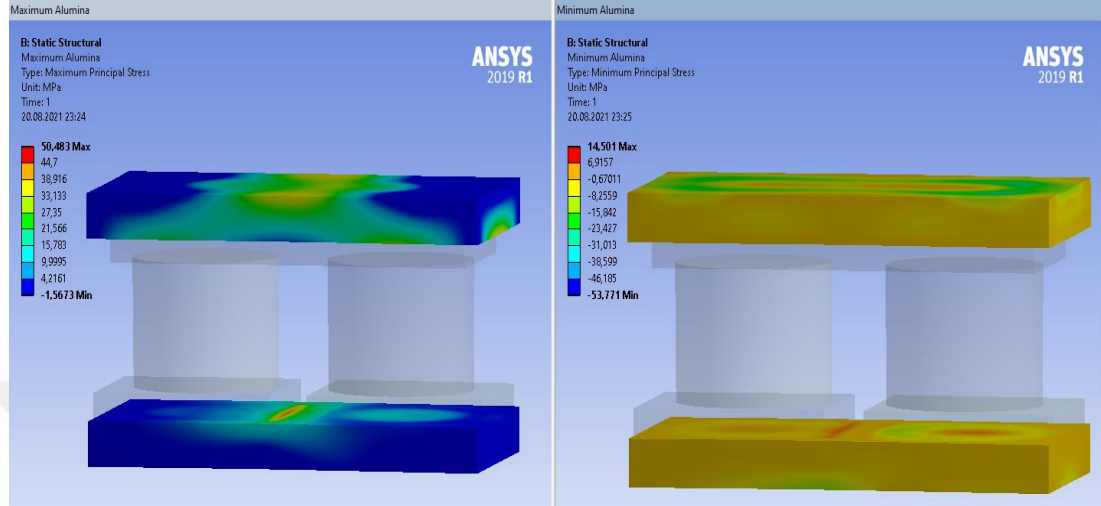
4.4.2 Dairesel Kesitli 35 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları

Dairesel kesitli termoelektrik modül için 35 numaralı analizin gerilme sonuçları incelendiğinde; alümina için 65,425 MPa, bakır için 74,383 MPa, n tipi dirsek için 140,44 MPa ve p tipi dirsek için 67,843 MPa Von mises gerilmesi bulunmuştur. Şekil 4.17’de her malzeme için gerilmeler gösterilmiştir.



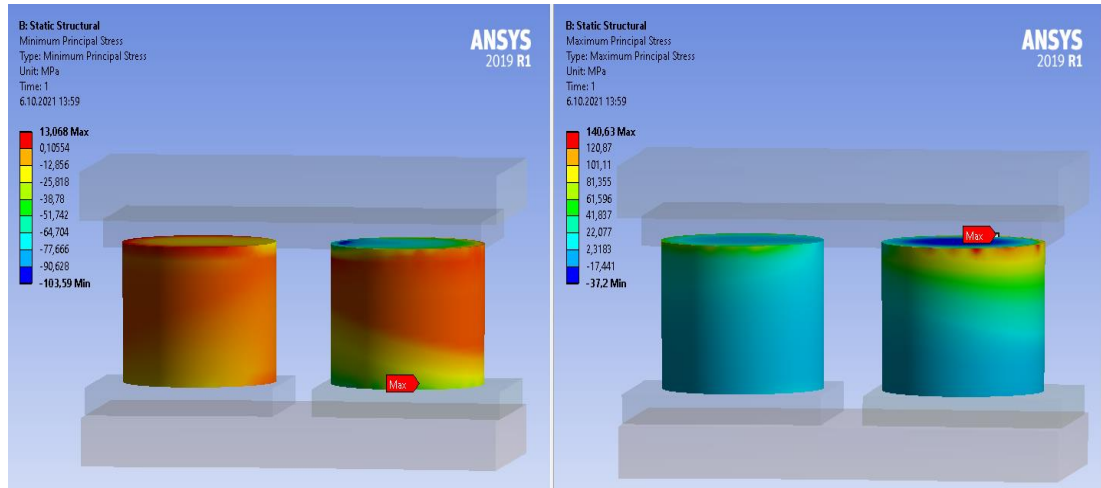
Şekil 4.17 Dairesel kesitli 35 numaralı analizin von mises sonuçları

Alümina için asal gerilmeler incelendiğinde maksimum asal gerilme 50,483 MPa ve minimum asal gerilme -53,771 MPa bulunmuştur. Şekil 4.18’de alümina için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.18 Dairesel kesitli 35 numaralı analizin alümina asal gerilme sonuçları

Dirsekler için asal gerilmeler incelendiğinde n tipi dirsek için maksimum asal gerilme 140,63 MPa, minimum asal gerilme -103,59 MPa bulunmuştur. P tipi dirsek için maksimum asal gerilme 80,338 MPa, minimum asal gerilme -18,974 MPa bulunmuştur. Şekil 4.19’da dirsekler için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Dairesel kesitli 35 numaralı analizin dirsekler için asal gerilme sonuçları

İncelenen 35 numaralı analiz 50°C sıcaklık farkı olan analizlerden sadece bir tanesidir. Dikdörtgen kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında 50°C

sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin Von mises gerilmeleri tablo 4.1’de verilmiştir. Analizlerin tamamı Eklerde gösterilmiştir. Alumina malzemenin E ve α değerleri değişkenler arasında olduğundan bu malzemenin gevrek veya sünek olabilme ihtimaline istinaden Von mises gerilmeleri de tablolara eklenmiştir.

Tablo 4.1 Dikdörtgen kesitli 50⁰C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi)

Analiz No.	Alumina Svm (MPa)	Bakır Svm (MPa)	n-tipi Svm (MPa)	p-tipi Svm (MPa)
35	63,421	73,832	267,05	113,22
53	63,366	80,33	267,22	240,86
55	54,179	72,396	160,25	113,9
69	58,363	77,879	260,38	209,62
70	58,226	78,181	152,25	207
86	61,945	80,756	223,33	121,29
101	53,693	82,787	217,4	227,24
115	75,745	77,375	149,22	110,25
145	77,034	77,132	157,55	208,71
158	83,007	78,887	217,47	300,98
159	82,981	78,665	264,67	301
160	83,068	78,515	147,07	296,78
171	103,45	98,06	361,64	116,95
184	72,315	83,195	141,24	225,06
196	90,124	90,743	143,78	106,59

Dikdörtgen kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında 50⁰C sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin asal gerilmeleri tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 Dikdörtgen kesitli 50⁰C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme)

Analiz No.	Alumina S1(MPa)	Alumina S3(MPa)	n tipi dirsek S1(MPa)	n tipi dirsek S3(MPa)	p tipi dirsek S1(MPa)	p tipi dirsek S3(MPa)
35	49,886	-43,61	267,24	-92,889	121,46	-32,624
53	49,905	-43,588	267,43	-93,194	253,47	-60,561
55	44,924	-43,38	167,15	-25,327	118,73	-61,346
69	47,033	-42,597	271,09	-63,861	215,89	-82,93
70	47,447	-43,677	157,04	-65,764	213,35	-77,538
86	59,515	-47,581	238,35	-55,562	131,47	-19,826
101	55,106	-37,368	231,81	-38,219	241,33	-35,131

Tablo 4.2 Devamı

Analiz No.	Alumina S1(MPa)	Alumina S3(MPa)	n tipi dirsek S1(MPa)	n tipi dirsek S3(MPa)	p tipi dirsek S1(MPa)	p tipi dirsek S3(MPa)
115	67,723	-61,556	153,19	-80,168	118,22	-34,995
145	67,292	-60,434	163,98	-23,173	213,86	-95,578
158	70,007	-61,005	232,69	-56,986	298,2	-99,189
159	70,011	-60,995	275,33	-69,606	298,23	-99,157
160	70,445	-61,523	150,97	-68,905	294,26	-90,908
171	89,667	-75,587	348,45	-114,78	126,82	-25,589
184	69,8	-58,882	152	-45,464	239,61	-36,156
196	84,758	-72,868	147,06	-80,688	114,28	-37,269

Dairesel kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında 50⁰C sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin Von mises gerilmeleri tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3 Dairesel kesitli 50⁰C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi)

Analiz No.	Alumina Svm (MPa)	Bakır Svm (MPa)	n-tipi Svm (MPa)	p-tipi Svm (MPa)
35	65,425	74,383	140,44	67,843
53	65,393	78,154	140,75	116,73
55	58,563	81,299	95,211	67,213
69	60,133	81,135	177,37	112,85
70	59,963	79,058	95,005	112,29
86	71,153	80,772	112,09	77,622
101	65,707	85,332	106,41	104,95
115	78,152	84,7	96,656	68,218
145	79,877	85,332	98,072	116,7
158	86,495	86,991	111,56	156,78
159	86,476	86,985	125,22	156,83
160	86,476	86,895	96,934	155,78
171	108,39	101,86	186,6	77,944
184	80,793	91,59	88,07	106,05
196	93,442	96,887	95,534	67,048

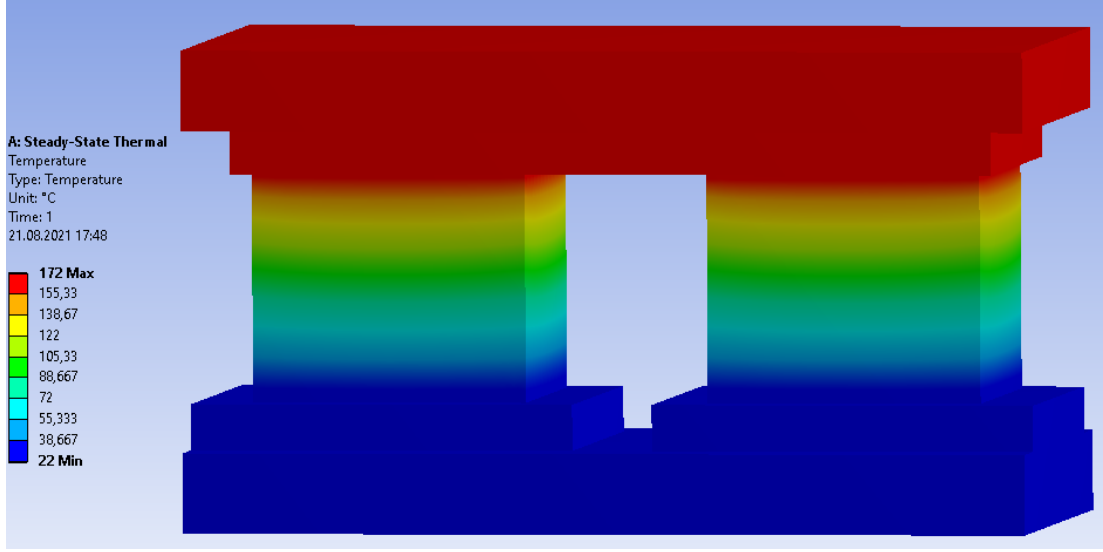
Dairesel kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında 50⁰C sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin asal gerilmeleri tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Dairesel kesitli 50⁰C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme)

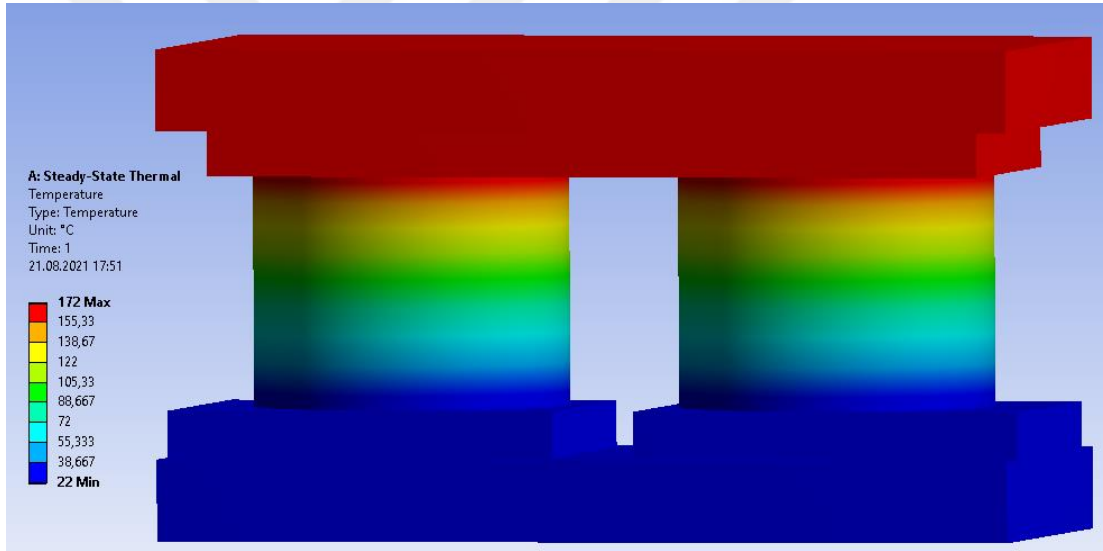
Analiz No.	Alumina S1(MPa)	Alumina S3(MPa)	n tipi dirsek S1(MPa)	n tipi dirsek S3(MPa)	p tipi dirsek S1(MPa)	p tipi dirsek S3(MPa)
35	50,483	-53,771	140,63	-103,59	80,338	-18,974
53	50,508	-53,772	140,89	-103,84	130,65	-41,048
55	49,952	-51,585	112,59	-24,873	71,167	-54,042
69	47,967	-52,732	137,3	-38,63	116,19	-81,572
70	47,999	-52,639	97,636	-70,495	115,91	-79,084
86	58,729	-66,008	131,02	-41,726	93,486	-14,145
101	54,73	-60,608	124,46	-40,959	124,9	-35,48
115	70,162	-7,414	96,993	-76,05	80,368	-22,76
145	69,288	-70,896	116,99	-19,315	117,53	-88,495
158	71,184	-72,265	130,9	-37,575	155,56	-108,24
159	71,195	-72,258	145,77	-46,307	155,6	-108,19
160	70,855	-72,136	97,553	-75,119	154,97	-106,11
171	92,812	-85,663	178,81	-125,08	93,688	-14,703
184	69,762	-75,675	103,44	-36,984	126,91	-26,162
196	88,567	-81,312	94,01	-78,399	78,598	-24,599

4.5 $\Delta T = 150^{\circ}C$ Sıcaklık Farkı ve 734 Numaralı Analiz İçin Analiz Sonuçları

Bu bölümde 176 analiz arasından sıcaklık farkı 150⁰C olanlar incelenmiştir. Alt levha 22⁰C sabit tutulmuştur ve üst levha sıcaklığı 172⁰C alınmıştır. Kararlı rejim ısı analiz çözdürüldükten sonra ortaya çıkan sıcaklık dağılımı yük olarak statik yapısal analize aktarılmıştır. Şekil 4.20’de 150 derece dikdörtgen kesit için sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil 4.21’de dairesel kesit için sıcaklık dağılımı verilmiştir.



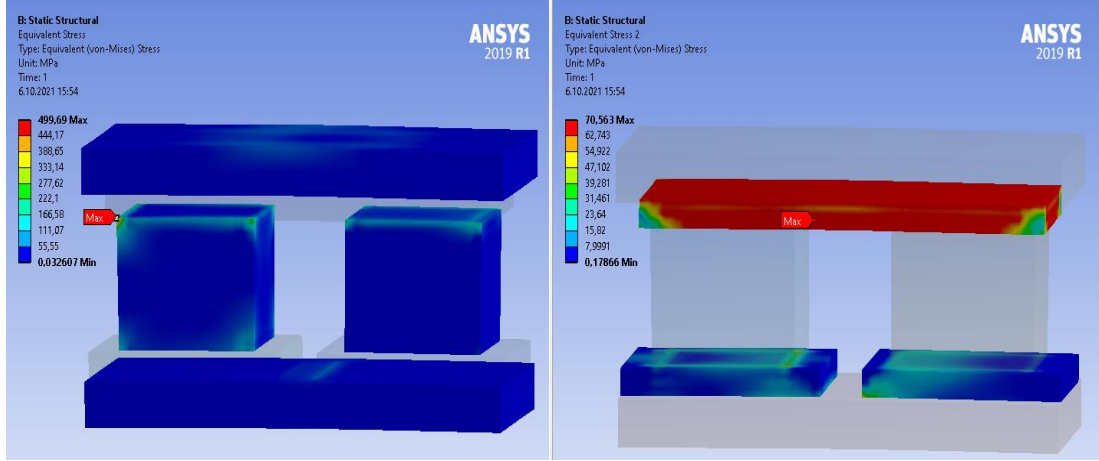
Şekil 4.20 $\Delta T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 734 nolu analiz için dikdörtgen kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı



Şekil 4.21 $\Delta T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 734 nolu analiz için dairesel kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı

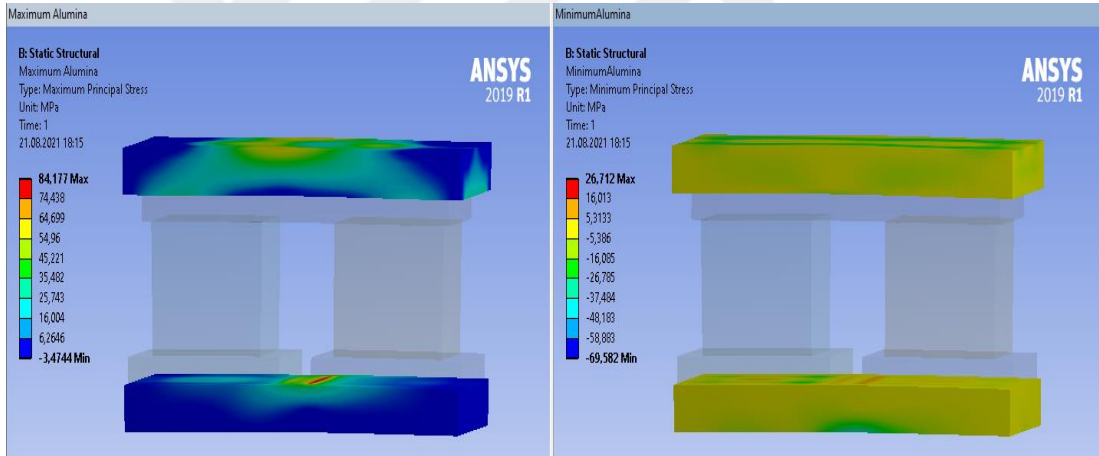
4.5.1 Dikdörtgen Kesitli 734 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları

Dikdörtgen kesitli termoelektrik modül için 734 numaralı analizin gerilme sonuçları incelendiğinde; alümina için 100,55 MPa, bakır için 70,563 MPa, n tipi dirsek için 499,69 MPa ve p tipi dirsek için 216,41 MPa Von mises gerilmesi bulunmuştur. Şekil 4.22’de her malzeme için gerilmeler gösterilmiştir.



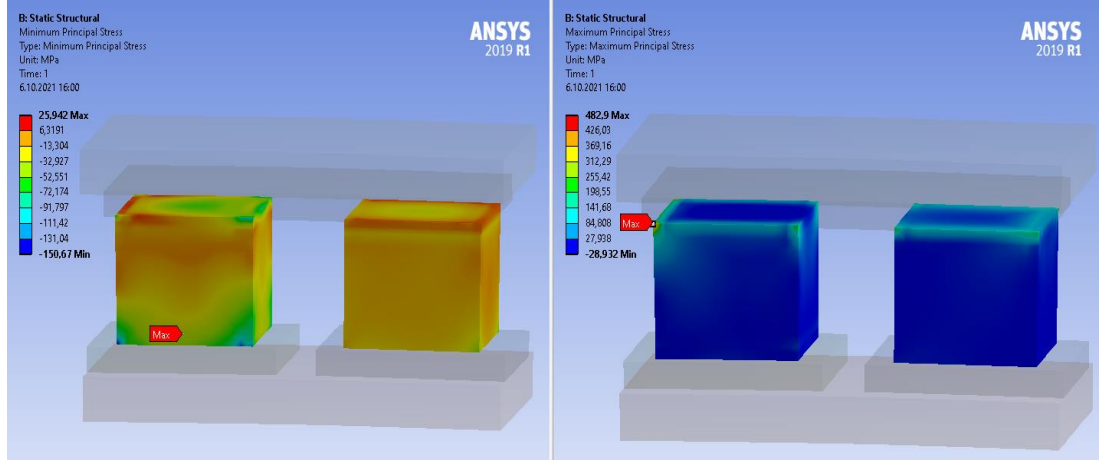
Şekil 4.22 Dikdörtgen kesitli 734 numaralı analiz için von mises sonuçları

Alümina için asal gerilmeler incelendiğinde maksimum asal gerilme 84,177 MPa ve minimum asal gerilme -69,582 MPa bulunmuştur. Şekil 4.23'te alümina için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.23 Dikdörtgen kesitli 734 numaralı analiz için alümina asal gerilme sonuçları

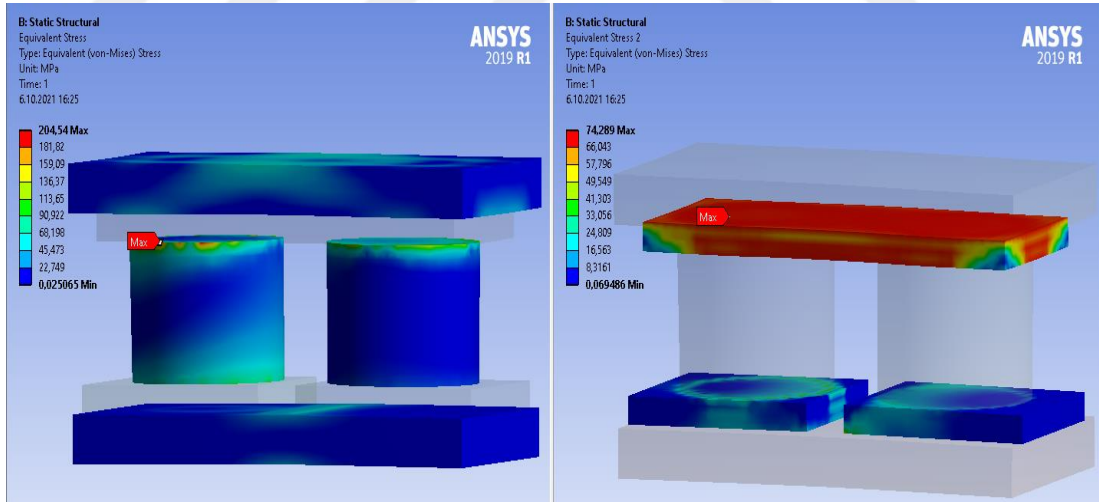
Dirsekler için asal gerilmeler incelendiğinde n tipi dirsek için maksimum asal gerilme 482,9 MPa, minimum asal gerilme -150,67 MPa bulunmuştur. P tipi dirsek için maksimum asal gerilme 217,3 MPa, minimum asal gerilme -51,573 MPa bulunmuştur. Şekil 4.24'te dirsekler için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.24 Dikdörtgen kesitli 734 numaralı analizin dirsekler için asal gerilme sonuçları

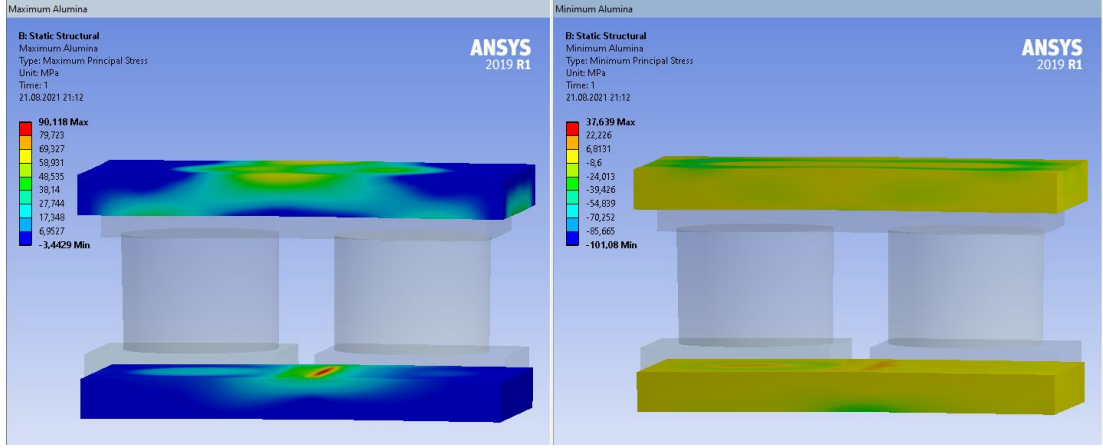
4.5.2 Dairesel Kesitli 734 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları

Dairesel kesitli termoelektrik modül için 734 numaralı analizin gerilme sonuçları incelendiğinde; alümina için 117,42 MPa, bakır için 74,289 MPa, n tipi dirsek için 204,54 MPa ve p tipi dirsek için 141,32 MPa Von mises gerilmesi bulunmuştur. Şekil 4.25'te her malzeme için gerilmeler gösterilmiştir.



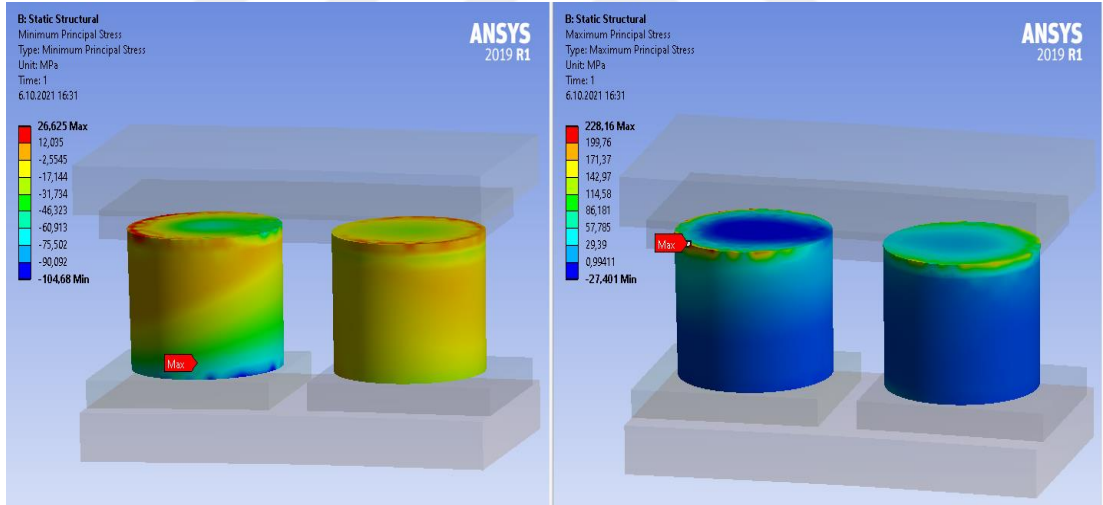
Şekil 4.25 Dairesel kesitli 734 numaralı analizin von mises sonuçları

Alümina için asal gerilmeler incelendiğinde maksimum asal gerilme 90,118 MPa ve minimum asal gerilme -101,08 MPa bulunmuştur. Şekil 4.26'da alümina için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.26 Dairesel kesitli 734 numaralı analizin alümina asal gerilme sonuçları

Dirsekler için asal gerilmeler incelendiğinde n tipi dirsek için maksimum asal gerilme 228,16 MPa, minimum asal gerilme -104,68 MPa bulunmuştur. P tipi dirsek için maksimum asal gerilme 171,15 MPa, minimum asal gerilme -27,315 MPa bulunmuştur. Şekil 4.27’de dirsekler için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.27 Dairesel kesitli 734 numaralı analizin dirsekler için asal gerilme sonuçları

İncelenen 734 numaralı analiz 150⁰C sıcaklık farkı olan analizlerden sadece bir tanesidir. Dikdörtgen kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında 150⁰C sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin Von mises gerilmeleri tablo 4.5’te verilmiştir.

Tablo 4.5 Dikdörtgen kesitli 150⁰C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi)

Analiz No.	Alumina Svm (MPa)	Bakır Svm (MPa)	n-tipi Svm (MPa)	p-tipi Svm (MPa)
734	100,55	70,563	499,69	216,41
750	78,552	70,671	366,77	389,45
753	102,45	77,929	586,94	381,32
761	104,37	70,493	492,19	241,1
770	106,31	70,493	491,1	440,98
773	172,08	73,032	670,92	432,53
776	107,75	70,665	338,38	560,66
788	145,94	70,633	484,82	279,87
792	178,65	74,601	812,17	275,37
793	161,07	74,447	271,47	558,92
816	113,97	75,206	582,7	203,91
837	196,13	72,568	811,43	377,62
856	120,22	72,53	252,08	554,27
857	120,5	72,704	345,13	556,75
872	205,05	72,611	647,55	265,92

Dikdörtgen kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında 150⁰C sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin asal gerilmeleri tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6 Dikdörtgen kesitli 150⁰C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme)

Analiz No.	Alumina S1(MPa)	Alumina S3(MPa)	n tipi dirsek S1(MPa)	n tipi dirsek S3(MPa)	p tipi dirsek S1(MPa)	p tipi dirsek S3(MPa)
734	84,177	-69,582	482,9	-150,67	217,3	-51,573
750	78,521	-59,692	343,1	-69,885	373,21	-87,378
753	88,793	-69,26	545,19	-187,57	366,77	-97,075
761	85,69	-81,996	477,6	-156,95	251,97	-92,294
770	81,662	-72,443	476,88	-157,89	441,01	-138,16
773	136,03	-96,655	606,78	-248,27	434,93	-145,7
776	93,952	-71,628	327,68	-64,784	528,37	-173,66
788	121,74	-96,287	472,38	-163,08	282,86	-147,76
792	138,6	-97,335	703,05	-312,69	279,22	-138,41
793	130,36	-94,17	270,56	-57,004	527,74	-202,87
816	103,93	-78,95	543,84	-203,06	209,16	-57,793
837	184,5	-110,05	692	-320,04	366,33	-116,27
856	113,69	-82,631	248,81	-58,041	524,44	-187,87
857	116,6	-82,402	335,12	-71,838	526,49	-187,75
872	189,34	-110,17	582,49	-272,64	269,09	-148,94

Dairesel kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında 150⁰C sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin Von mises gerilmeleri tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7 Dairesel kesitli 150⁰C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi)

Analiz No.	Alumina Svm (MPa)	Bakır Svm (MPa)	n-tipi Svm (MPa)	p-tipi Svm (MPa)
734	117,42	74,289	204,54	141,32
750	106,84	70,864	194,85	184,96
753	117,31	70,308	221,83	182,92
761	118,43	74,512	205,11	150,32
770	118,17	73,841	204,68	194,75
773	178,42	74,048	333,23	204,04
776	118,29	74,005	189,03	230,46
788	150,02	70,859	205,55	175,49
792	185,66	77,283	384,62	175,64
793	167,02	71,546	175,46	278,21
816	127,93	70,656	227,11	135,07
837	205,88	79,14	363,3	175,76
856	128,84	73,501	170,31	230,26
857	128,79	73,284	184,28	231,57
872	216,07	80,029	322,75	169,88

Dairesel kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında 150⁰C sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin asal gerilmeleri tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8 Dairesel kesitli 150⁰C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme)

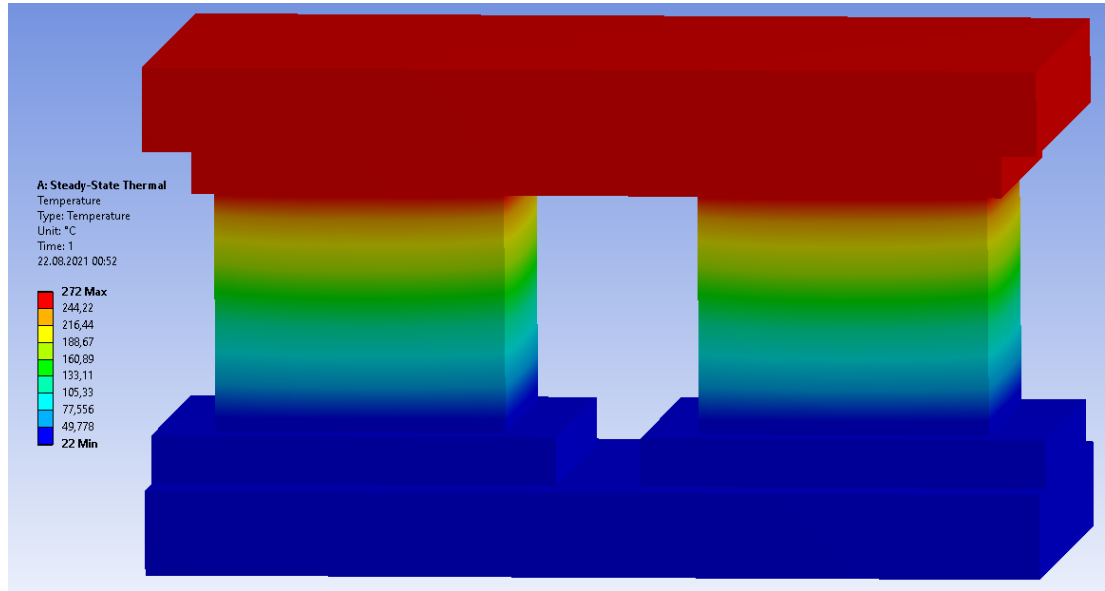
Analiz No.	Alumina S1(MPa)	Alumina S3(MPa)	n tipi dirsek S1(MPa)	n tipi dirsek S3(MPa)	p tipi dirsek S1(MPa)	p tipi dirsek S3(MPa)
734	90,118	-101,08	228,16	-104,68	171,15	-27,315
750	80,612	-90,999	227,36	-65,748	224,39	-56,506
753	96,615	-101,36	242,56	-128,73	219,57	-50,881
761	89,846	-100,81	225,65	-91,279	173,58	-50,345
770	86,687	-101,2	225,48	-90,248	214,49	-82,354
773	138,31	-106,66	304,24	-166,93	217,47	-77,385
776	106,25	-102,06	218,5	-51,311	241,97	-134,59
788	123,52	-103,19	227,09	-86,775	183,8	-96,088
792	141,58	-107,17	341,98	-194,48	182,31	-88,978

Tablo 4.8 Devamı

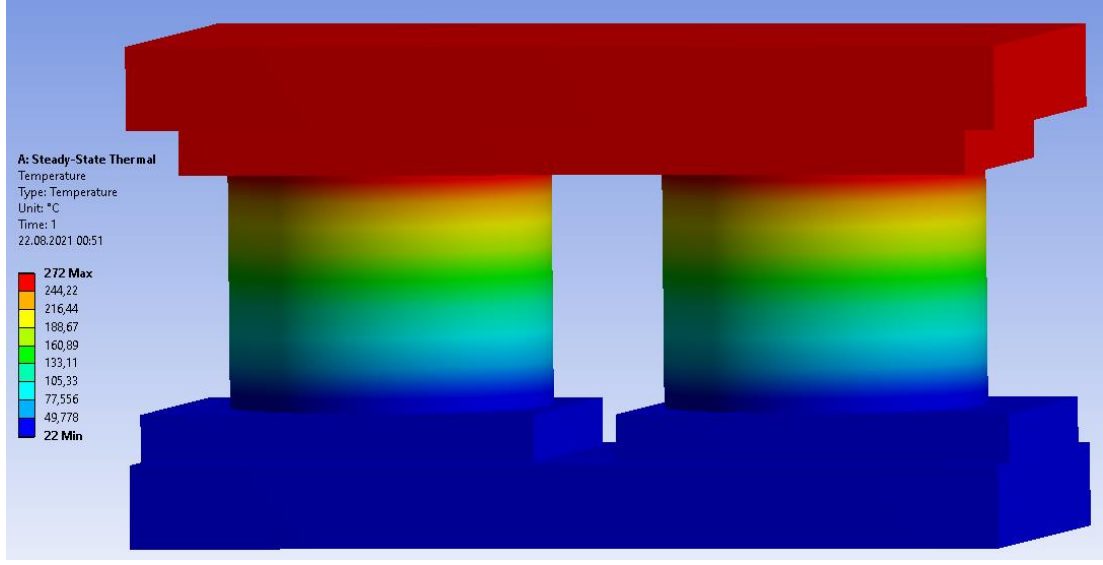
Analiz No.	Alumina S1(MPa)	Alumina S3(MPa)	n tipi dirsek S1(MPa)	n tipi dirsek S3(MPa)	p tipi dirsek S1(MPa)	p tipi dirsek S3(MPa)
793	131,39	-105,99	202,74	-46,308	271,3	-171,69
816	110,98	-108,47	237,17	-126,3	163,48	-29,639
837	189,67	-113,78	307,89	-239,74	211,17	-62,125
856	124,05	-109,27	201,51	-38,784	236,1	-130,03
857	130,47	-109,15	216,33	-48,12	237,3	-131,22
872	193,12	-113,03	285,5	-167,55	169,77	-98,976

4.6 $\Delta T = 250^\circ\text{C}$ Sıcaklık Farkı ve 1470 Numaralı Analiz İçin Analiz Sonuçları

Bu bölümde 176 analiz arasından sıcaklık farkı 250°C olanlar incelenmiştir. Alt levha 22°C sabit tutulmuştur ve üst levha sıcaklığı 272°C alınmıştır. Kararlı rejim ısı analiz çözülürldükten sonra ortaya çıkan sıcaklık dağılımı yük olarak statik yapısal analize aktarılmıştır. Şekil 4.28’de 250°C dikdörtgen kesit için sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil 4.29’da dairesel kesit için sıcaklık dağılımı verilmiştir.



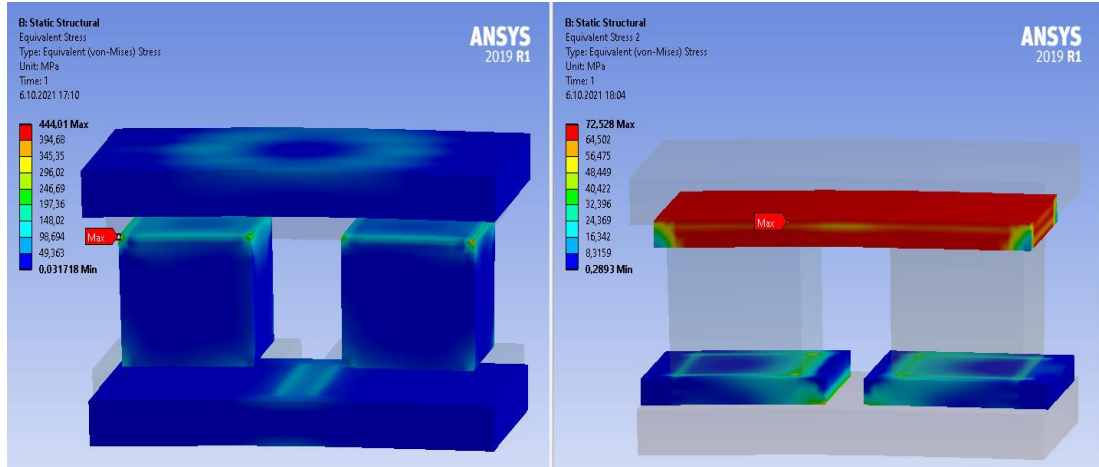
Şekil 4.28 $\Delta T = 250^\circ\text{C}$ ve 1470 nolu analiz için dikdörtgen kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı



Şekil 4.29 $\Delta T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 1470 nolu analiz için dairesel kesitli dirsekli modelde sıcaklık dağılımı

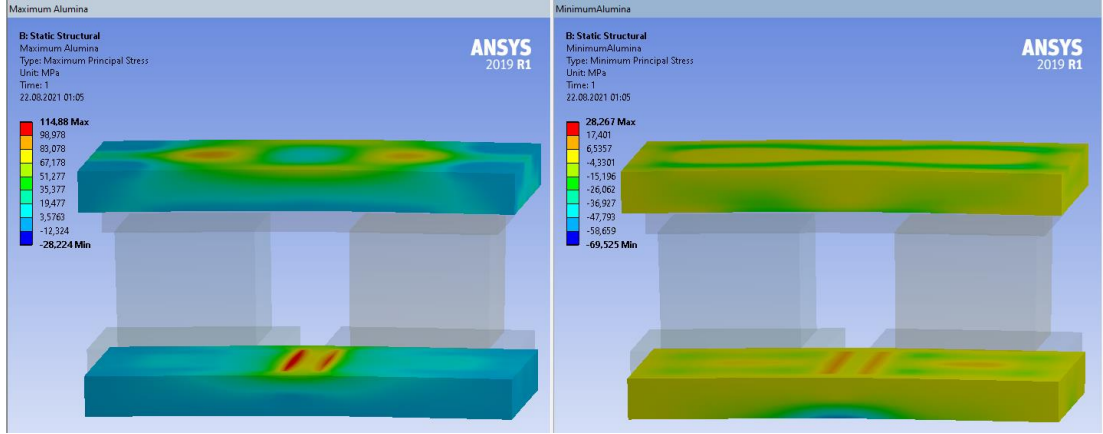
4.6.1 Dikdörtgen Kesitli 1470 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları

Dikdörtgen kesitli termoelektrik modül için 1470 numaralı analizin gerilme sonuçları incelendiğinde; alümina için 94,873 MPa, bakır için 72,528 MPa, n tipi dirsek için 444,01 MPa ve p tipi dirsek için 422,91 MPa Von mises gerilmesi bulunmuştur. Şekil 4.30’da her malzeme için gerilmeler gösterilmiştir.



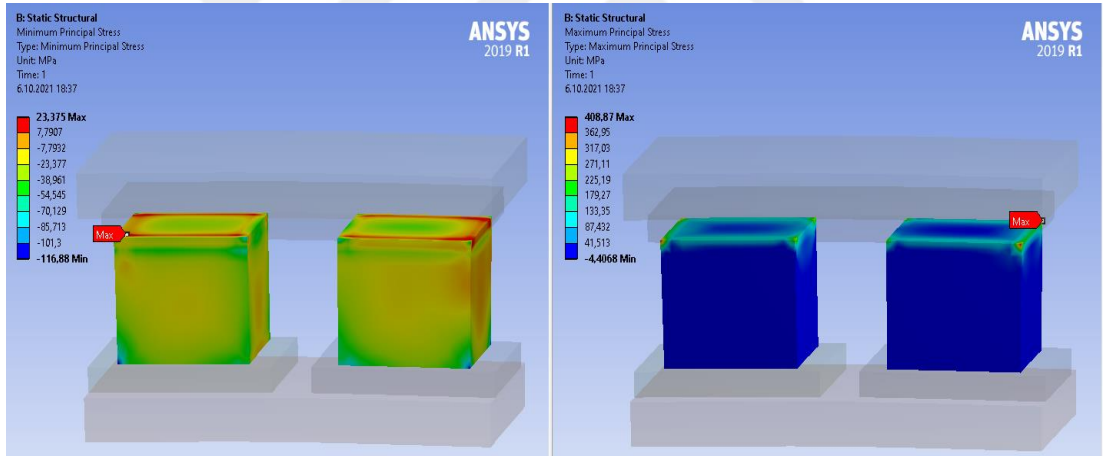
Şekil 4.30 Dikdörtgen kesitli 1470 numaralı analizin von mises sonuçları

Alümina için asal gerilmeler incelendiğinde maksimum asal gerilme 114,88 MPa ve minimum asal gerilme -69,525 MPa bulunmuştur. Şekil 4.31’de alümina için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.31 Dikdörtgen kesitli 1470 numaralı analizin alümina asal gerilme sonuçları

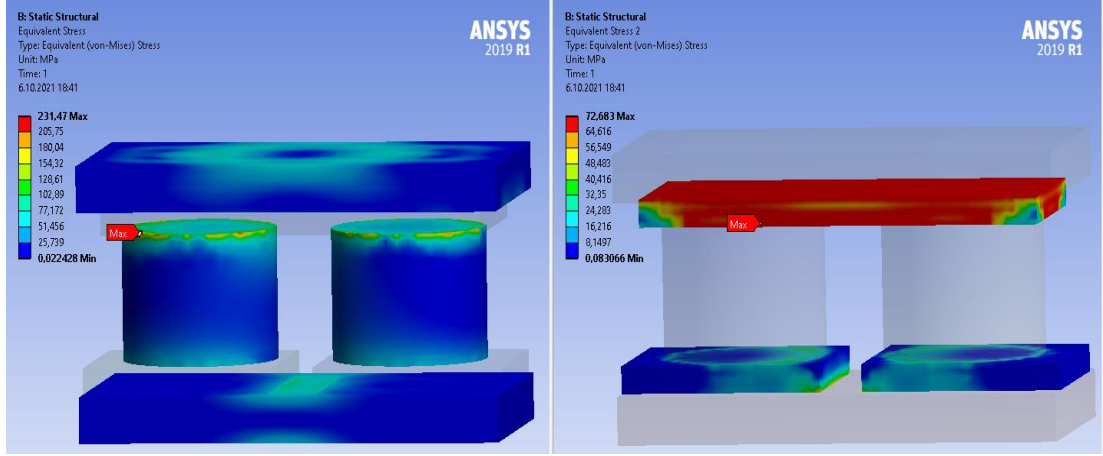
Dirsekler için asal gerilmeler incelendiğinde n tipi dirsek için maksimum asal gerilme 401,61 MPa, minimum asal gerilme -116,88 MPa bulunmuştur. P tipi dirsek için maksimum asal gerilme 408,87 MPa, minimum asal gerilme -112,27 MPa bulunmuştur. Şekil 4.32’de dirsekler için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.32 Dikdörtgen kesitli 1470 numaralı analizin dirsekler için asal gerilme sonuçları

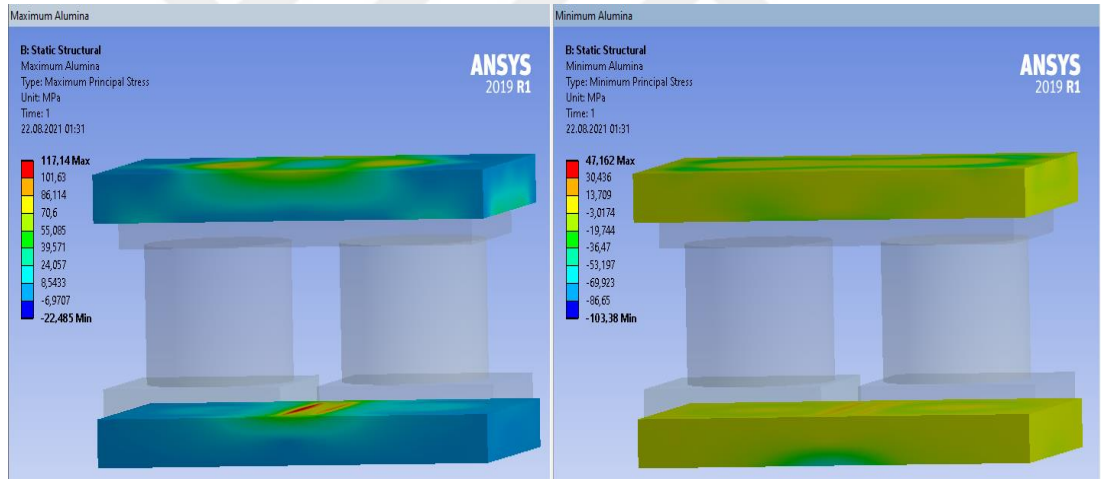
4.6.2 Dairesel Kesitli 1470 Numaralı Analizin Gerilme Sonuçları

Dairesel kesitli termoelektrik modül için 1470 numaralı analizin gerilme sonuçları incelendiğinde; alümina için 128,67 MPa, bakır için 72,683 MPa, n tipi dirsek için 231,47 MPa ve p tipi dirsek için 208,29 MPa Von mises gerilmesi bulunmuştur. Şekil 4.33’te her malzeme için gerilmeler gösterilmiştir.



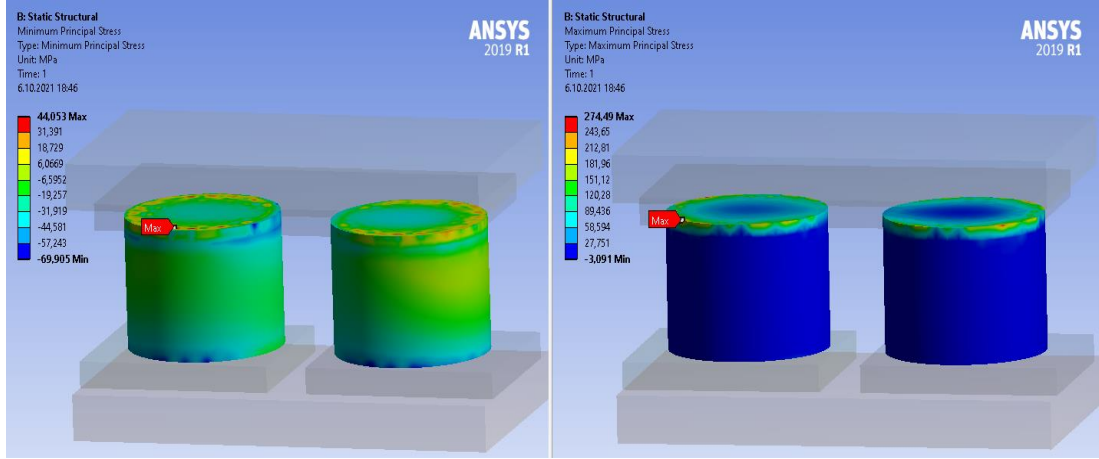
Şekil 4.33 Dairesel kesitli 1470 numaralı analizin von mises sonuçları

Alümina için asal gerilmeler incelendiğinde maksimum asal gerilme 117,14 MPa ve minimum asal gerilme -103,38 MPa bulunmuştur. Şekil 4.34'te alümina için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.34 Dairesel kesitli 1470 numaralı analizin alümina asal gerilme sonuçları

Dirsekler için asal gerilmeler incelendiğinde n tipi dirsek için maksimum asal gerilme 274,49 MPa, minimum asal gerilme -66,346 MPa bulunmuştur. P tipi dirsek için maksimum asal gerilme 255,53 MPa, minimum asal gerilme -69,905 MPa bulunmuştur. Şekil 4.35'te dirsekler için asal gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.35 Dairesel kesitli 1470 numaralı analiz için dirsekler için asal gerilme sonuçları

İncelenen 1470 numaralı analiz 250°C sıcaklık farkı olan analizlerden sadece bir tanesidir. Dikdörtgen kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında 250°C sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin Von mises gerilmeleri tablo 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.9 Dikdörtgen kesitli 250°C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi)

Analiz No.	Alumina Svm (MPa)	Bakır Svm (MPa)	n-tipi Svm (MPa)	p-tipi Svm (MPa)
1470	94,873	72,528	444,01	422,91
1474	200,88	98,666	491,78	404,13
1477	94,567	72,117	295,78	481,93
1503	208,67	83,164	1053,2	559,68
1507	127,7	73,722	339,93	711,95
1527	205,12	76,125	721,09	754,25
1532	198,78	78,6	399,34	968,56
1538	215,18	75,555	882,97	929,93
1554	131,54	75,688	752,76	416,2
1562	134,86	76,53	645,17	473,89
1567	136,38	77,714	304,41	298,4
1570	135,22	83,259	328,39	289,81
1576	137,64	81,866	306,2	583,46
1610	236,51	75,794	857,65	711,34
1612	212,55	100,13	321,3	949,97

Dikdörtgen kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında 250⁰C sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin asal gerilmeleri tablo 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.10 Dikdörtgen kesitli 250⁰C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme)

Analiz No.	Alumina S1(MPa)	Alumina S3(MPa)	n tipi dirsek S1(MPa)	n tipi dirsek S3(MPa)	p tipi dirsek S1(MPa)	p tipi dirsek S3(MPa)
1470	114,88	-69,525	401,61	-116,88	408,87	-112,27
1474	186,26	-115,44	443,22	-373,89	394,45	-132,34
1477	114,43	-68,033	280,13	-74,254	444,61	-147,94
1503	189,75	-111,51	854,45	-442,38	537,94	-244,47
1507	107,71	-89,418	333,09	-207,65	645,12	-307,23
1527	186,68	-109,93	650,29	-334,79	661,93	-325,83
1532	179,6	-109,72	375,12	-114,62	802,8	-391,73
1538	197,04	-111,73	743,92	-385,42	780,15	-405,84
1554	161,88	-90,347	673,71	-336,87	405,43	-135,66
1562	166,16	-92,601	598,56	-277,37	440,74	-176,06
1567	166,21	-98,77	291,58	-90,308	304,84	-167,76
1570	139,89	-98,931	330,19	-223,25	297,47	-167,16
1576	168,44	-95,195	293,67	-92,366	555,52	-241,23
1610	235,29	-114,83	718,94	-403,91	627,52	-346,82
1612	210,89	-133,08	311,88	-101,83	783,9	-409,01

Dairesel kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında 250⁰C sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin Von mises gerilmeleri tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.11 Dairesel kesitli 250⁰C analizlerin von mises gerilme sonuçları (Svm: Von-mises gerilmesi)

Analiz No.	Alumina Svm (MPa)	Bakır Svm (MPa)	n-tipi Svm (MPa)	p-tipi Svm (MPa)
1470	128,67	72,683	231,47	208,29
1474	211,83	94,659	327,75	205,64
1477	127,68	72,171	209,79	218,69
1503	220,29	76,584	474,76	268,73
1507	143,84	73,586	222,29	294,2
1527	216,54	75,223	305,44	359,13
1532	207,38	104,23	225,62	419,7
1538	227,63	75,873	426,84	429,18
1554	146,96	87,04	290,9	201,05
1562	147,14	77,749	263,45	212,87

Tablo 4.11 Devamı

Analiz No.	Alumina Svm (MPa)	Bakır Svm (MPa)	n-tipi Svm (MPa)	p-tipi Svm (MPa)
1567	149,15	81,673	205,36	186,97
1570	150,01	73,076	218,52	181,99
1576	148,2	86,168	205,22	258,96
1610	249,94	76,417	407,39	346,32
1612	226,25	92,332	205,23	402,96

Dairesel kesitli termoelektrik modülün 176 analizi arasında tüm 250⁰C sıcaklık farkı olan analizlerin 15 tanesinin asal gerilmeleri tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.12 Dairesel kesitli 250⁰C derece analizlerin asal gerilme sonuçları (S1: maksimum asal gerilme, S3: minimum asal gerilme)

Analiz No.	Alumina S1(MPa)	Alumina S3(MPa)	n tipi dirsek S1(MPa)	n tipi dirsek S3(MPa)	p tipi dirsek S1(MPa)	p tipi dirsek S3(MPa)
1470	117,14	-103,38	274,49	-66,346	255,53	-69,905
1474	193,24	-118,96	281,41	-218,96	246,95	-71,662
1477	116,26	-102,43	249,73	-51,072	268,27	-90,105
1503	195,11	-118,25	384,87	-289,42	262,23	-127,76
1507	107,92	-116,85	236,52	-103,93	281,71	-174,89
1527	191,51	-118,75	291,77	-173,94	306,89	-212,22
1532	187,14	-118,75	259,83	-63,779	343,53	-294,75
1538	199,1	-118,38	355,88	-227,7	356,34	-241,48
1554	173,23	-117,35	286,4	-205,77	247,3	-73,286
1562	176,87	-117,3	265,15	-170,55	260,05	-92,808
1567	177,91	-117,54	245,8	-45,932	198	-96,907
1570	133,77	-117,33	231,2	-113,55	194,9	-87,361
1576	180,67	-117,74	244,91	-47,261	250,27	-157,34
1610	241,94	-118,59	331,02	-241,4	291,78	-206,89
1612	219,58	-125,2	241,06	-56,033	322,48	-302,32

BÖLÜM BEŞ

REGRESYON ANALİZİ VE OPTİMİZASYON

Bu bölümde sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen gerilmeler çıktı verileri olarak alınarak regresyon analizleri sonuçları verilmiştir. Gerilme parametreleri için regresyon modelleri denenmiş ve en uygunu amaç fonksiyonu seçilmiştir. Amaç fonksiyonu çıktı verilerinin en çok yakınsadığı matematiksel fonksiyondur. Daha sonra dirsekler için seçilen amaç fonksiyonlarının belirli şartlar ve kısıtlamalar altında optimizasyon işlemi yapılmıştır ve bu şekilde olabilecek en düşük gerilme değerleri elde edilmiştir.

5.1 Modelleme

Modelleme aşamasında, tahminlerin doğruluğunu test etmek için regresyon analizi ve yapay sinir ağının (artificial neural network) avantajlarını birleştiren hibrit bir yöntem kullanılmıştır. Yapay sinir ağları, öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri otomatik olarak gerçekleştirebilmek amacı ile geliştirilen bilgisayar yazılımlarıdır. Bu aşamada analizler sonucunda elde edilen tüm veriler iki gruba ayrılır. Verilerin %80'i training ve %20'si testing olarak isimlendirilir ve bu seçimler veri grubu içerisinden rastgele yapılır. Yani 176 deneyin 150 tanesi training grubunu, 26 tanesi testing grubunu rastgele seçilerek oluşturmuştur. Seçilen bu gruplar Mathematica programına sırasıyla tanıtılmıştır.

İlk aşama, regresyon modellerini ve katsayıları ayarlayarak veri grubuna uygun modelin seçilmesidir. R^2_{training} ve R^2_{adjusted} belirleme katsayısı değerleri hesaplanır. Bu değerlerin 0,95'ten daha büyük olması ve mümkün olduğunca birbirine yakın olması hedeflenir. R^2 değerlerinin 1'e yakın olması, örneklem veri noktalarının uzayda dağılma göstermeyip hemen hepsinin regresyon ile elde edilen hiperdüzey üzerinde bulunması anlamına gelir. Daha sonra, regresyon modeli tutarsızlıklarının etkilerini en aza indirerek tahmin sonuçlarını elde etmek için testing aşaması gerçekleştirilir. R^2_{testing} değerleri hesaplanır ve bu değerlerinde 0,85'ten büyük olması beklenir. Bu

şartlar sağlandıktan sonra fonksiyonun minimum ve maksimum değerleri hesaplanır ve bu değerlerin mühendislik sınırları içerisinde olması beklenir. Training ve testing aşamalarında hesaplanan R^2 değerleri istenilen sonuçları vermez ise daha farklı regresyon modelleri üzerinde çalışmalar yapılmalıdır. Eğer training değerleri istenilen sonucu verir, ancak testing değerlerinde istenilen sonuçlar elde edilmezse çalışmada tekrar başa dönülür ve $0,95 R^2_{\text{training}}$ değeri elde edilene kadar regresyon modeli çalışmalarına devam edilir. Tablo 5.1’de kullanılan regresyon modelleri ve bu modellerin Mathematica programında kullanılan kodları daha sade ve anlaşılabilir olması için 3 girdi parametresine göre gösterilmiştir. Bazı fonksiyonel yapıların toplam formülü ile yazılmış versiyonları eklerde verilmiştir. Regresyon modelleri doğrusal ve doğrusal olmayan matematiksel fonksiyonları ifade eder ve Mathematica kodları bu fonksiyonların programa nasıl tanıtılacağını gösterir (Polatoğlu, Aydın, Nevruz ve Özer, 2020).

Tablo 5.1 Regresyon analizinde kullanılan modeller ve program kodları

Regresyon İsimleri	Fonksiyonel Yapı
Multiple Linear	$a_1 + a_2 x_1 + a_3 x_2 + a_4 x_3$
Multiple Linear Rational	Multiple Linear / b_i katsayılı Multiple Linear
Second-Order Multiple Non-Linear	$a_3 x_1^2 + a_5 x_1 x_2 + a_8 x_1 x_3 + a_2 x_1 + a_6 x_2^2 + a_9 x_2 x_3 + a_4 x_2 + a_{10} x_3^2 + a_7 x_3 + a_1$
Second-Order Multiple Non-Linear Rational	Second-Order Multiple Non-Linear / b_i katsayılı Second-Order Multiple Non-Linear
Third Order Multiple Non-Linear	$a_4 x_1^3 + a_7 x_1^2 x_2 + a_{13} x_1^2 x_3 + a_3 x_1^2 + a_9 x_1 x_2^2 + a_{15} x_1 x_2 x_3 + a_6 x_1 x_2 + a_{18} x_1 x_3^2 + a_{12} x_1 x_3 + a_2 x_1 + a_{10} x_2^3 + a_{16} x_2^2 x_3 + a_8 x_2^2 + a_{19} x_2 x_3^2 + a_{14} x_2 x_3 + a_5 x_2 + a_{20} x_3^3 + a_{17} x_3^2 + a_{11} x_3 + a_1$
Third Order Multiple Non-Linear Rational	Third Order Multiple Non-Linear / b_i katsayılı Third Order Multiple Non-Linear
Fourth Order Multiple Non-Linear	$a_5 x_1^4 + a_9 x_1^3 x_2 + a_{19} x_1^3 x_3 + a_4 x_1^3 + a_{12} x_1^2 x_2^2 + a_{22} x_1^2 x_2 x_3 + a_8 x_1^2 x_2 + a_{28} x_1^2 x_3^2 + a_{18} x_1^2 x_3 + a_3 x_1^2 + a_{14} x_1 x_2^3 + a_{24} x_1 x_2^2 x_3 + a_{11} x_1 x_2^2 + a_{30} x_1 x_2 x_3^2 + a_{21} x_1 x_2 x_3 + a_7 x_1 x_2 + a_{33} x_1 x_3^3 + a_{27} x_1 x_3^2 + a_{17} x_1 x_3 + a_2 x_1 + a_{15} x_2^4 + a_{25} x_2^3 x_3 + a_{13} x_2^3 + a_{31} x_2^2 x_3^2 + a_{23} x_2^2 x_3 + a_{10} x_2^2 + a_{34} x_2 x_3^3 + a_{29} x_2 x_3^2 + a_{20} x_2 x_3 + a_6 x_2 + a_{35} x_3^4 + a_{32} x_3^3 + a_{26} x_3^2 + a_{16} x_3 + a_1$
Fourth Order Multiple Non-Linear Rational	Fourth Order Multiple Non-Linear / b_i katsayılı Fourth Order Multiple Non-Linear
Fifth Order Multiple Non-Linear	$a_6 x_1^5 + a_{11} x_1^4 x_2 + a_{26} x_1^4 x_3 + a_5 x_1^4 + a_{15} x_1^3 x_2^2 + a_{20} a_{30} x_1^3 x_2 x_3 + a_{10} x_1^3 x_2 + a_{40} x_1^3 x_3^2 + a_{25} x_1^3 x_3 + a_4 x_1^3 + a_{18} x_1^2 x_2^3 + a_{33} x_1^2 x_2^2 x_3 + a_{14} x_1^2 x_2^2 + a_{30} a_{43} x_1^2 x_2 x_3^2 + a_{29} x_1^2 x_2 x_3 + a_9 x_1^2 x_2 + a_{49} x_1^2 x_3^3 + a_{39} x_1^2 x_3^2 + a_{24} x_1^2 x_3 + a_3 x_1^2 + a_{20} x_1 x_2^4 + a_{35} x_1 x_2^3 x_3 + a_{17} x_1 x_2^3 + a_{45} x_1 x_2^2 x_3^2 + a_{60} a_{32} x_1 x_2^2 x_3 + a_{13} x_1 x_2^2 + a_{51} x_1 x_2 x_3^3 + a_{60} a_{42} x_1 x_2 x_3^2 + a_{28} x_1 x_2 x_3 + a_8 x_1 x_2 + a_{54} x_1 x_3^4 + a_{20} a_{48} x_1$

Tablo 5.1 Devamı

Regresyon İsimleri	Fonksiyonel Yapı
Fifth Order Multiple Non-Linear Devam	$x^3/3+30 a_{38} x^1 x^3/2+20 a_{23} x^1 x^3+5 a_2 x^1+a_{21} x^2/5+5 a_{36} x^2/4 x^3+5 a_{19} x^2/4+10 a_{46} x^2/3 x^3/2+20 a_{34} x^2/3 x^3+10 a_{16} x^2/3+10 a_{52} x^2/2 x^3/3+30 a_{44} x^2/2 x^3/2+30 a_{31} x^2/2 x^3+10 a_{12} x^2/2+5 a_{55} x^2 x^3/4+20 a_{50} x^2 x^3/3+30 a_{41} x^2 x^3/2+20 a_{27} x^2 x^3+5 a_7 x^2+a_{56} x^3/5+5 a_{53} x^3/4+10 a_{47} x^3/3+10 a_{37} x^3/2+5 a_{22} x^3+a_1$
Fifth Order Multiple Non-Linear Rational	Fifth Order Multiple Non-Linear / b_i katsayılı Fifth Order Multiple Non-Linear
First Order Trigonometric Non-Linear	$a_1+a_2 \sin x+a_3 \sin x^2+a_4 \sin x^3+a_5 \cos x+a_6 \cos x^2+a_7 \cos x^3$
First Order Trigonometric Non-Linear Rational	First Order Trigonometric Non-Linear / b_i katsayılı First Order Trigonometric Non-Linear
Second Order Trigonometric Non-Linear	$2 a_{20} \sin x \sin x^2+2 a_5 \cos x \cos x^2+2 a_{17} \cos x \sin x^2+2 a_{13} \sin x \cos x^2+2 a_{26} \sin x \sin x^3+2 a_8 \cos x \cos x^3+2 a_{23} \cos x \sin x^3+2 a_{14} \sin x \cos x^3+a_{15} \sin x^1/2+2 a_{11} \sin x^1+a_3 \cos x^1/2+2 a_2 \cos x^1+2 a_{12} \sin x \cos x^1+2 a_{27} \sin x^2 \sin x^3+2 a_9 \cos x^2 \cos x^3+2 a_{19} \sin x^2 \cos x^3+2 a_{24} \cos x^2 \sin x^3+a_{21} \sin x^2/2+2 a_{16} \sin x^2+a_6 \cos x^2/2+2 a_4 \cos x^2+2 a_{18} \sin x^2 \cos x^2+a_{28} \sin x^3/2+2 a_{22} \sin x^3+a_{10} \cos x^3/2+2 a_7 \cos x^3+2 a_{25} \sin x^3 \cos x^3+a_1$
Second Order Trigonometric Non-Linear Rational	Second Order Trigonometric Non-Linear / b_i katsayılı Second Order Trigonometric Non-Linear
First Order Logarithmic Non-Linear	$a_2 \log x^1+a_3 \log x^2+a_4 \log x^3+a_1$
First Order Logarithmic Non-Linear Rational	First Order Logarithmic Non-Linear / b_i katsayılı First Order Logarithmic Non-Linear
Second Order Logarithmic Non-Linear	$2 a_5 \log x^1 \log x^2+2 a_8 \log x^1 \log x^3+a_3 \log^2 x^1+2 a_2 \log x^1+2 a_9 \log x^2 \log x^3+a_6 \log^2 x^2+2 a_4 \log x^2+a_{10} \log^2 x^3+2 a_7 \log x^3+a_1$
Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	Second Order Logarithmic Non-Linear / b_i katsayılı Second Order Logarithmic Non-Linear
First Order Poly-Log Hybrid	$a_2 x^1+a_5 \log x^1+a_3 x^2+a_6 \log x^2+a_4 x^3+a_7 \log x^3+a_1$
First Order Hybrid Poly-Log Rational	First Order Poly-Log Hybrid / b_i katsayılı First Order Poly-Log Hybrid

5.1.1 Alümina Gerilme Değerlerinin Regresyon Analizi

Alümina malzeme için regresyon analizi yapılırken, dikdörtgen kesit ve dairesel kesit için bulunan gerilme değerleri ayrı ayrı ele alınmış ve regresyon tabloları oluşturularak amaç fonksiyonları seçilmiştir. Her iki kesit için de von Mises gerilmeleri ve maksimum asal gerilmeler için regresyon analizi yapılmıştır. Alümina için maksimum asal gerilmenin incelenmesinin sebebi alüminanın gevrek (kırılgan) olmasıdır. Gevrek malzemeler için kullanılan kırılma kriterleri (Columb veya Rankine Kriteri) nde asal gerilmeler işleme girmektedir. Bununla beraber alt ve üst levhalarda alümina yerine farklı bir malzeme kullanılabilmesi ihtimaline istinaden levhaların E ve α değerleride değişkenler arasında dahil edilmiş, bu malzemenin gevrek veya sünek olma olasılığına karşı levhaların asal gerilmelerinin yanı sıra Von mises gerilmeleri de incelenmiştir.

Tablo 5.2’de dikdörtgen kesit için alümina regresyon modelleri, hesaplanan R^2 değerleri ve fonksiyonun alabileceği sınır değerler gösterilmiştir.

Tablo 5. 2 Dikdörtgen kesit için alümina von mises gerilmesinin regresyon analizi

Regresyon Modelleri	R^2_{Training}	R^2_{Adjusted}	R^2_{Testing}	Min. Değer	Maks.Değer
1. Multiple Linear	0,96855	0,966644	0,796932	-14,4857	305,72
2. Multiple Linear Rational	0,979078	0,976378	0,885697	18,7288	351,1
3. Second-Order Multiple Non-Linear	0,99388	0,991762	0,950444	-15,5856	359,078
4. Second-Order Multiple Non-Linear Rational	0,998895	0,997725	0,982895	13,6142	358,781
5. Third Order Multiple Non-Linear	0,99953	0,996708	0,903961	-45,8209	423,316
6. Third Order Multiple Non-Linear Rational	0,993328	1,00934	0,824682	25,6904	518,167
7. Fourth Order Multiple Non-Linear	1	1	0,929826	-40,1155	363,007
8. Fourth Order Multiple Non-Linear Rational	0,387026	1,16503	-11,5111	6,47858	$3,32993.10^{16}$
9. Fifth Order Multiple Non-Linear	1	1	0,934674	-36,3074	382,449
10. Fifth Order Multiple Non-Linear Rational	0,586925	1,04005	-4,15627	6,58538	$5,08354.10^{13}$
11. First Order Trigonometric Non-Linear	0,972515	0,969217	0,829761	-273,595	1072,55
12. First Order Trigonometric Non-Linear Rational	0,98519	0,981151	0,900263	$-3,39525.10^8$	$2,61183.10^{16}$
13. Second Order Trigonometric Non-Linear	0,998444	0,989109	0,932948	-8609,41	6269,57
14. Second Order Trigonometric Non-Linear Rational	0,639131	1,50522	-7,94558	$-1,01885.10^{14}$	$2,25874.10^6$
15. First Order Logarithmic Non-Linear	0,965816	0,963744	0,814266	-26,0803	284,073
16. First Order Logarithmic Non-Linear Rational	0,979938	0,977349	0,895149	6,03942	342,324
17. Second Order Logarithmic Non-Linear	0,992674	0,990138	0,932321	-22,2398	355,481
18. Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	0,99929	0,998539	0,979772	13,333	354,179
19. First Order Hybrid	0,973478	0,970295	0,824652	-16,8319	314,116
20. First Order Hybrid Rational	0,986036	0,982228	0,904806	30,3851	447,884

Sonuçlar incelendiğinde 1, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 ve 19 numaralı modellerin minimum ve maksimum değerlerinin mühendislik sınırları dışında olduğu görülmüştür. Geriye kalan modeller içerisinde 4 numaralı second-order multiple non-linear rational hem R^2_{training} ve R^2_{Adjusted} değerlerinin 1’e yakın olması hem de R^2_{testing} değerinin 0,85’ten büyük olması sebebiyle amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Tablo 5.3'te dairesel kesit için alümina Von mises gerilmesinin regresyon modelleri, hesaplanan R^2 değerleri ve fonksiyonun alabileceği sınır değerler gösterilmiştir.

Tablo 5.3 Dairesel kesit için alümina von mises gerilmesinin regresyon analizi

Regresyon Modelleri	$R^2_{Training}$	$R^2_{Adjusted}$	$R^2_{Testing}$	Min. Değer	Maks. Değer
1. Multiple Linear	0.970608	0.968826	0.803714	-1.63525	305.699
2. Multiple Linear Rational	0.980238	0.977688	0.884808	26.3967	354.951
3. Second-Order Multiple Non-Linear	0.994587	0.992714	0.944417	-10.9378	361.399
4. Second-Order Multiple Non-Linear Rational	0.998665	0.997252	0.975866	12.7615	370.919
5. Third Order Multiple Non-Linear	0.999615	0.997303	0.913916	-33.8985	421.501
6. Third Order Multiple Non-Linear Rational	0.994594	1.00757	0.8349	28.7496	547.05
7. Fourth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.929989	1.43352	361.087
8. Fourth Order Multiple Non-Linear Rational	0.36929	1.16981	-6.56233	5.38309	$5.57753 \cdot 10^{16}$
9. Fifth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.931705	-7.2452	369.249
10. Fifth Order Multiple Non-Linear Rational	0.521618	1.04638	-63.9368	6.71548	$5.70469 \cdot 10^{14}$
11. First Order Trigonometric Non-Linear	0.975366	0.97241	0.84369	-281.594	1164.21
12. First Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.985624	0.981703	0.917055	$-1.0903 \cdot 10^9$	$1.30675 \cdot 10^9$
13. Second Order Trigonometric Non-Linear	0.998589	0.990122	0.924733	-6705.08	4961.41
14. Second Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.838579	1.22599	-4.37885	-162114	$3.61553 \cdot 10^8$
15. First Order Logarithmic Non-Linear	0.968776	0.966884	0.822175	-13.138	284.773
16. First Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.98046	0.977939	0.895652	15.6192	342.848
17. Second Order Logarithmic Non-Linear	0.993516	0.991272	0.92631	-22.7479	357.685
18. Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.999031	0.998004	0.960087	16.4684	356.299
19. First Order Hybrid	0.976811	0.974028	0.836015	-10.6434	315.182
20. First Order Hybrid Rational	0.986685	0.983053	0.906596	30.3983	358.061

Sonuçlar incelendiğinde 1, 3, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17 ve 19 numaralı modellerin minimum ve maksimum değerlerinin mühendislik sınırları dışında olduğu görülmüştür. Geriye kalan modellerden 7 ve 18 numaralı modelin R^2 değerleri yeterince iyi olmasına rağmen, 4 numaralı model olan second-order multiple non-

linear rational R^2_{testing} değeri daha yüksek olduğu için amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Tablo 5.4'te dikdörtgen kesit için alümina maksimum asal gerilmesinin regresyon hesaplanan R^2 değerleri ve fonksiyonun alabileceği sınır değerler gösterilmiştir. Maksimum asal gerilmenin incelenme sebebi optimizasyon çalışmaları sırasında alümina için bir kısıtlama değeri olarak kullanılacak olmasıdır. Pptimizasyon çalışması yapılırken kopma mukavemeti sınırı bir kısıtlama olarak programa eklenecektir.

Tablo 5.4 Dikdörtgen kesit için alümina maksimum asal gerilmesinin regresyon analizi

Regresyon Modelleri	R^2_{Training}	R^2_{Adjusted}	R^2_{Testing}	Min. Değer	Maks. Değer
1.Multiple Linear	0.976396	0.974966	0.855536	-37.0303	364.857
2.Multiple Linear Rational	0.98845	0.98696	0.935279	22.2424	406.571
3.Second-Order Multiple Non-Linear	0.996585	0.995402	0.975614	17.5733	385.08
4.Second-Order Multiple Non-Linear Rational	0.999248	0.998452	0.991525	32.8782	544.068
5.Third Order Multiple Non-Linear	0.999645	0.997514	0.947389	-18.5383	442.57
6.Third Order Multiple Non-Linear Rational	0.933355	1.0933	0.824423	20.1915	1225.08
7.Fourth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.936167	-33.2136	411.848
8.Fourth Order Multiple Non-Linear Rational	0.878323	1.03276	0.152951	21.2923	891.748
9.Fifth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.939183	-6.29837	406.139
10.Fifth Order Multiple Non-Linear Rational	0.365556	1.06151	-3.29949	4.32232	$3.2364.10^{16}$
11.First Order Trigonometric Non-Linear	0.97857	0.975999	0.86736	-463.654	559.539
12.First Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.952143	0.939092	-0.462145	$-3.6434.10^6$	$6.1346.10^7$
13.Second Order Trigonometric Non-Linear	0.999115	0.993802	0.969942	-6413.51	4536.42
14.Second Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.371674	1.87966	-3.10144	$-6.24727.10^{14}$	$4.10722.10^6$
15.First Order Logarithmic Non-Linear	0.973012	0.971376	0.864644	-50.2354	337.929
16.First Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.990455	0.989224	0.955074	14.9893	420.509
17.Second Order Logarithmic Non-Linear	0.995937	0.99453	0.970633	11.0285	409.371
18.Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.99941	0.998785	0.96558	-874064	404.799
19.First Order Hybrid	0.979461	0.976996	0.862561	-42.1581	348.202
20.First Order Hybrid Rational	0.994262	0.992698	0.965089	27.813	454.303

Sonuçlar incelendiğinde 6, 10, 11, 12, 13 ve 14 numaralı modellerin minimum ve maksimum değerlerinin mühendislik sınırları dışında olduğu görülmüştür. R^2_{testing} değerinin 0,152951 olması sebebiyle 8 numaralı modelde amaç fonksiyonu olmaya uygun değildir. Geriye kalan modeller içerisinde 4 numaralı second-order multiple non-linear rational hem R^2_{training} ve R^2_{Adjusted} değerlerinin bire yakın olması hem de R^2_{testing} değerinin bire çok yakın olması sebebiyle amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Tablo 5.5'te dairesel kesit için alümina maksimum asal gerilmesinin regresyon modelleri, hesaplanan R^2 değerleri ve fonksiyonun alabileceği sınır değerler gösterilmiştir.

Tablo 5.5 Dairesel kesit için alümina maksimum asal gerilmesinin regresyon analizi

Regresyon Modelleri	R^2_{Training}	R^2_{Adjusted}	R^2_{Testing}	Min. Değer	Maks. Değer
1. Multiple Linear	0.975675	0.974201	0.85627	-29.7316	368.597
2. Multiple Linear Rational	0.986738	0.985027	0.930615	25.3225	406.812
3. Second-Order Multiple Non-Linear	0.996707	0.995567	0.974277	15.2296	426.589
4. Second-Order Multiple Non-Linear Rational	0.999068	0.998081	0.968085	23.7013	$5.56692 \cdot 10^{15}$
5. Third Order Multiple Non-Linear	0.999589	0.997124	0.955292	-23.0802	444.073
6. Third Order Multiple Non-Linear Rational	0.992601	1.01036	0.790568	46.8673	696.783
7. Fourth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.931494	-45.1536	422.732
8. Fourth Order Multiple Non-Linear Rational	0.65773	1.09215	-0.550789	10.2007	$3.62591 \cdot 10^{10}$
9. Fifth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.932407	-41.8799	424.515
10. Fifth Order Multiple Non-Linear Rational	0.364843	1.06158	-3.92545	4.49753	$2.08746 \cdot 10^{12}$
11. First Order Trigonometric Non-Linear	0.978623	0.976058	0.869347	-537.42	540.042
12. First Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.992411	0.990342	0.956264	$-1.20981 \cdot 10^{16}$	$1.76253 \cdot 10^{10}$
13. Second Order Trigonometric Non-Linear	0.999137	0.993957	0.966336	-6108.62	4011.18
14. Second Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.612136	1.54301	-4.50255	$-2.3246 \cdot 10^7$	$3.97167 \cdot 10^8$
15. First Order Logarithmic Non-Linear	0.973284	0.971664	0.867516	-43.3812	342.331
16. First Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.988746	0.987294	0.949873	16.8869	431.688
17. Second Order Logarithmic Non-Linear	0.995981	0.99459	0.970854	8.73778	419.624
18. Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.999138	0.998226	0.939988	18.055	431.903
19. First Order Hybrid	0.979642	0.977199	0.864046	-40.4662	372.525
20. First Order Hybrid Rational	0.993292	0.991463	0.958736	27.6288	481.101

Sonuçlar incelendiğinde 4, 6, 8, 10, 12, 13 ve 14 numaralı modellerin minimum ve maksimum değerlerinin mühendislik sınırları dışında olduğu görülmüştür. Geriye kalan modellerden 17 numaralı second order logarithmic non-linear modelin R^2_{testing} değeri 0,970854 ile 20 numaralı first order hybrid rational modelden daha yüksektir. Ancak first order hybrid rational modelin minimum ve maksimum değeri mühendislik sınırlarına daha uygun olduğu için amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Şekil 5.1’de dikdörtgen ve dairesel kesit için alümina Von mises gerilmelerinin amaç fonksiyonları Mathematica formunda gösterilmiştir.

dikdörtgenselalüminavonmises =

$$\begin{aligned} & (2.6291988837351105 \cdot x^6 + 2541.7766384783467 \cdot x_1 - 4.301376553798494 \cdot x_1^2 + 29560.643549111683 \cdot x_2 - 30.67025132529924 \cdot x_1 x_2 + 3286.8124088344575 \cdot x_2^2 - \\ & 3554.723927981631 \cdot x_3 - 1.8811560995494396 \cdot x_1 x_3 - 46.446583199516084 \cdot x_2 x_3 + 14.654637778721545 \cdot x_3^2 - 511.235807212809 \cdot x_4 - 3.656936231676434 \cdot x_1 x_4 - \\ & 3854.8079657373355 \cdot x_2 x_4 + 82.8476302561422 \cdot x_3 x_4 + 2595.387186429476 \cdot x_4^2 - 625.3177569359095 \cdot x_5 - 2.7497044662428585 \cdot x_1 x_5 + 50.96687998129553 \cdot x_2 x_5 - \\ & 2.797150985129746 \cdot x_3 x_5 + 68.01562790340729 \cdot x_4 x_5 + 2.4909316353550053 \cdot x_5^2 - 205894.03327148847 \cdot x_6 + 110.6584848729918 \cdot x_1 x_6 - \\ & 4681.849448484999 \cdot x_2 x_6 - 112.83230043777746 \cdot x_3 x_6 - 5111.8452283006045 \cdot x_4 x_6 + 212.0292326355455 \cdot x_5 x_6 + 8193.180604898189 \cdot x_6^2 - \\ & 18640.752216489098 \cdot x_7 - 0.6147138373559572 \cdot x_1 x_7 - 81.99040049619232 \cdot x_2 x_7 + 0.5265297952565214 \cdot x_3 x_7 + 27.724634370786333 \cdot x_4 x_7 - \\ & 11.721026830820898 \cdot x_5 x_7 + 1342.205087752035 \cdot x_6 x_7 + 22.769785405289017 \cdot x_7^2) / \\ & (40245.01047010847 \cdot x_1 + 17.411845520260872 \cdot x_1^2 - 0.020671655815117658 \cdot x_1^3 - 321.21603779994604 \cdot x_2 - 0.02684894062194681 \cdot x_1 x_2 + 11.229233254971033 \cdot x_2^2 - \\ & 37.31133873965684 \cdot x_3 + 0.0012658532115028453 \cdot x_1 x_3 - 0.5130125010857045 \cdot x_2 x_3 + 0.09983970797080646 \cdot x_3^2 - 367.1434395562359 \cdot x_4 - \\ & 0.428638058930572 \cdot x_1 x_4 - 7.536353226876417 \cdot x_2 x_4 + 0.45213520778362754 \cdot x_3 x_4 + 6.166119175302125 \cdot x_4^2 - 9.866940373070214 \cdot x_5 - \\ & 0.031388710842123746 \cdot x_1 x_5 + 0.39888096051956884 \cdot x_2 x_5 + 0.009016281078991903 \cdot x_3 x_5 + 0.537698713051514 \cdot x_4 x_5 + 0.041568233409333834 \cdot x_5^2 + \\ & 1428.9474001659337 \cdot x_6 + 0.828858880989102 \cdot x_1 x_6 - 9.488188005576209 \cdot x_2 x_6 - 0.7189483199751481 \cdot x_3 x_6 - 14.969487095811095 \cdot x_4 x_6 - \\ & 1.4246921166872584 \cdot x_5 x_6 - 5.922718391001643 \cdot x_6^2 - 376.83937559579977 \cdot x_7 - 0.015846966775540542 \cdot x_1 x_7 + 0.668061617873687 \cdot x_2 x_7 + \\ & 0.027471643088068577 \cdot x_3 x_7 + 1.1087661163747553 \cdot x_4 x_7 - 0.051162497823888126 \cdot x_5 x_7 + 1.6601754084557578 \cdot x_6 x_7 + 0.8234814912827468 \cdot x_7^2) \end{aligned}$$

daireeselalüminavonmises =

$$\begin{aligned} & (3.9617248078214615 \cdot x^6 + 848.1218706067627 \cdot x_1 + 0.2363581025878974 \cdot x_1^2 + 15238.30911715501 \cdot x_2 - 61.36620553234811 \cdot x_1 x_2 + 4726.781924694027 \cdot x_2^2 - \\ & 3031.178109692936 \cdot x_3 - 0.9676880916145669 \cdot x_1 x_3 - 47.14417401000013 \cdot x_2 x_3 + 17.66166493200036 \cdot x_3^2 - 31177.794145267526 \cdot x_4 - 26.567886679040868 \cdot x_1 x_4 - \\ & 5020.731769701816 \cdot x_2 x_4 + 30.07145051088882 \cdot x_3 x_4 + 4026.3411785135145 \cdot x_4^2 - 1168.226581478352 \cdot x_5 - 0.7240104961839857 \cdot x_1 x_5 + \\ & 66.98288692260456 \cdot x_2 x_5 - 3.396280912077243 \cdot x_3 x_5 + 96.40925452927422 \cdot x_4 x_5 + 2.0128038621478104 \cdot x_5^2 - 299539.72592658666 \cdot x_6 + \\ & 157.0114723192104 \cdot x_1 x_6 - 5385.873589331053 \cdot x_2 x_6 - 110.91143849127413 \cdot x_3 x_6 - 4800.38415885714 \cdot x_4 x_6 + 264.0750547585103 \cdot x_5 x_6 + \\ & 10374.638067210997 \cdot x_6^2 - 15526.0865702314 \cdot x_7 - 5.3244072747754725 \cdot x_1 x_7 - 120.44557964561655 \cdot x_2 x_7 - 4.362882478251818 \cdot x_3 x_7 + \\ & 47.56059418247895 \cdot x_4 x_7 - 18.73680204133483 \cdot x_5 x_7 + 1280.3150232657242 \cdot x_6 x_7 + 23.33235285927172 \cdot x_7^2) / \\ & (57876.618430616305 \cdot x_1 + 4.958683864628135 \cdot x_1^2 + 0.006592882304059518 \cdot x_1^3 - 499.06772200923837 \cdot x_2 - 0.0624049784078255 \cdot x_1 x_2 + 14.119801223884412 \cdot x_2^2 - \\ & 34.51794525621771 \cdot x_3 + 0.00741610310061342 \cdot x_1 x_3 - 0.5469063630049191 \cdot x_2 x_3 + 0.11417874939989806 \cdot x_3^2 - 515.6349587504596 \cdot x_4 - \\ & 0.5738895228204485 \cdot x_1 x_4 - 8.670883241132236 \cdot x_2 x_4 + 0.17980254473902935 \cdot x_3 x_4 + 8.9888637266505 \cdot x_4^2 - 24.55946397321133 \cdot x_5 - \\ & 0.02201125237066879 \cdot x_1 x_5 + 0.5942768421200324 \cdot x_2 x_5 + 0.0081133280183424 \cdot x_3 x_5 + 0.6925590006629609 \cdot x_4 x_5 + 0.044505520407157745 \cdot x_5^2 + \\ & 652.973317497015 \cdot x_6 + 1.1795570507936939 \cdot x_1 x_6 - 9.058020227411964 \cdot x_2 x_6 - 0.7471453644755632 \cdot x_3 x_6 - 9.882928308756854 \cdot x_4 x_6 - \\ & 0.9716736607505798 \cdot x_5 x_6 + 8.053749124359673 \cdot x_6^2 - 424.375913432581 \cdot x_7 - 0.04444575447631063 \cdot x_1 x_7 + 0.705781225293066 \cdot x_2 x_7 + \\ & 0.005635215771883787 \cdot x_3 x_7 + 1.2316625235395728 \cdot x_4 x_7 - 0.0635024854106745 \cdot x_5 x_7 + 1.5739190928095868 \cdot x_6 x_7 + 0.95611913078225 \cdot x_7^2) \end{aligned}$$

Şekil 5.1 Alümina von mises gerilmeleri için amaç fonksiyonları

Şekil 5.2’de dikdörtgen ve dairesel kesit için alümina maksimum asal gerilmelerinin amaç fonksiyonları Mathematica formunda gösterilmiştir.

dikdörtgenselalüminmaksimumasal =

$$\begin{aligned} & (7.633145788410103 \cdot x_6 + 21050.329497186583 \cdot x_1 - 62.44122772604812 \cdot x_1^2 + 82631.44304770569 \cdot x_2 + 387.6940233044912 \cdot x_1 x_2 + 28722.085380387776 \cdot x_2^2 + \\ & 14571.245831050494 \cdot x_3 + 20.02990541100722 \cdot x_1 x_3 - 115.69946791877166 \cdot x_2 x_3 - 6.807226421843019 \cdot x_3^2 - 287791.5516380797 \cdot x_4 + 56.896525718282305 \cdot x_1 x_4 - \\ & 27467.676564037203 \cdot x_2 x_4 - 401.6955168259523 \cdot x_3 x_4 + 40295.226815053626 \cdot x_4^2 + 10553.76655153111 \cdot x_5 + 13.617632800252439 \cdot x_1 x_5 + \\ & 225.02274072471997 \cdot x_2 x_5 - 22.552812915609916 \cdot x_3 x_5 + 655.0326796536808 \cdot x_4 x_5 + 11.10668358576505 \cdot x_5^2 + 56942.340923272764 \cdot x_6 + \\ & 65.36479965807338 \cdot x_1 x_6 - 43456.82547690706 \cdot x_2 x_6 + 162.94337636748335 \cdot x_3 x_6 - 39638.330945690985 \cdot x_4 x_6 + 1558.950498689875 \cdot x_5 x_6 + \\ & 18547.586618728426 \cdot x_6^2 - 129414.51669386697 \cdot x_7 + 25.049480216341056 \cdot x_1 x_7 - 1049.195270280778 \cdot x_2 x_7 - 25.020692014174806 \cdot x_3 x_7 + \\ & 544.4172858098725 \cdot x_4 x_7 - 209.72021254902623 \cdot x_5 x_7 + 6552.0666203205565 \cdot x_6 x_7 + 326.534588834388 \cdot x_7^2) / \\ & (391029.90029509546 + 143.39144560849414 \cdot x_1 - 0.10434640966919242 \cdot x_1^2 - 2841.6748167012784 \cdot x_2 + 2.162232057239601 \cdot x_1 x_2 + 69.49551365948004 \cdot x_2^2 + \\ & 24.742629603062003 \cdot x_3 + 0.15837136770602867 \cdot x_1 x_3 - 1.966675835935196 \cdot x_2 x_3 + 0.07339505888751906 \cdot x_3^2 - 1807.3026284587636 \cdot x_4 - \\ & 1.3350582390566048 \cdot x_1 x_4 - 42.134198085925775 \cdot x_2 x_4 - 1.548105721564711 \cdot x_3 x_4 + 126.85740252877899 \cdot x_4^2 - 207.11454420021954 \cdot x_5 - \\ & 0.09575145212119537 \cdot x_1 x_5 + 3.560373182565904 \cdot x_2 x_5 - 0.03225567196705525 \cdot x_3 x_5 + 2.465279194480743 \cdot x_4 x_5 + 0.4368205105516518 \cdot x_5^2 + \\ & 7693.913740686564 \cdot x_6 - 0.2023966570252888 \cdot x_1 x_6 - 88.06905588208477 \cdot x_2 x_6 - 1.6077133287516094 \cdot x_3 x_6 - 125.29008681303588 \cdot x_4 x_6 - \\ & 1.9812682068977296 \cdot x_5 x_6 - 90.74683020120202 \cdot x_6^2 - 3612.546209716749 \cdot x_7 - 0.20764473606951744 \cdot x_1 x_7 + 2.77618490567644 \cdot x_2 x_7 - \\ & 0.045214589118135966 \cdot x_3 x_7 + 3.75084160201035 \cdot x_4 x_7 - 0.785069743097795 \cdot x_5 x_7 + 9.562457642665562 \cdot x_6 x_7 + 8.838074861795434 \cdot x_7^2) \\ & \text{daireeselalüminmaksimumasal =} \\ & (-1.2485987132580103 \cdot x_6 - 776.6519024989175 \cdot x_1 + 16699.733079239297 \cdot x_2 - 588.7857819617757 \cdot x_3 + 13417.364198197276 \cdot x_4 - 135.497598036638 \cdot x_5 - \\ & 11789.882315698494 \cdot x_6 + 333.1500202231408 \cdot x_7 + 153230.51804677828 \cdot \text{Log}[x_1] - 134190.45437455457 \cdot \text{Log}[x_2] + 86291.98553059035 \cdot \text{Log}[x_3] - \\ & 108198.17594580445 \cdot \text{Log}[x_4] + 102622.56333584149 \cdot \text{Log}[x_5] + 184531.95435236 \cdot \text{Log}[x_6] - 46805.453625796436 \cdot \text{Log}[x_7]) / \\ & (8572.075528509813 - 1.5352095517045639 \cdot x_1 + 49.226999357882704 \cdot x_2 - 1.6877426776635716 \cdot x_3 + 20.19498952151627 \cdot x_4 - 1.247032816049785 \cdot x_5 - \\ & 80.08375666017633 \cdot x_6 + 10.691899245769193 \cdot x_7 + 314.7654598714935 \cdot \text{Log}[x_1] - 372.6442645595313 \cdot \text{Log}[x_2] + 246.74488565572744 \cdot \text{Log}[x_3] - \\ & 75.80523218384025 \cdot \text{Log}[x_4] + 209.23520957431833 \cdot \text{Log}[x_5] + 784.8918049585523 \cdot \text{Log}[x_6] - 2588.675713166378 \cdot \text{Log}[x_7]) \end{aligned}$$

Şekil 5.2 Alümina maksimum asal gerilmeleri için amaç fonksiyonları

5.1.2 Bakır Gerilme Değerlerinin Regresyon Analizi

Bakır malzeme için regresyon analizi yapılırken, dikdörtgen kesit ve dairesel kesit için bulunan gerilme değerleri ayrı ayrı ele alınmış ve regresyon tabloları oluşturularak amaç fonksiyonları seçilmiştir. Her iki kesit içinde Von mises gerilmeleri için regresyon analizi yapılmıştır. Bakır için maksimum asal gerilme incelenmemiştir çünkü sünek bir malzeme olduğu için sadece Von mises gerilmesi ele alınmıştır. Tablo 5.6’da dikdörtgen kesit için bakır Von mises gerilmesinin regresyon modelleri, hesaplanan R^2 değerleri ve fonksiyonun alabileceği sınır değerler gösterilmiştir.

Tablo 5.6 Dikdörtgen kesit için bakır von mises gerilmesinin regresyon analizi

Regresyon Modelleri	R^2_{Training}	R^2_{Adjusted}	R^2_{Testing}	Min. Değer	Maks. Değer
1.Multiple Linear	0.987389	0.986624	-0.154369	72.9763	91.9836
2.Multiple Linear Rational	0.991289	0.990165	-0.228811	$-\infty$	∞
3.Second-Order Multiple Non-Linear	0.991229	0.988193	0.136604	62.9019	110.488
4.Second-Order Multiple Non-Linear Rational	0.998264	0.996426	-0.015726	$-7.34008.10^8$	$3.0102.10^{11}$
5.Third Order Multiple Non-Linear	0.998876	0.992129	-0.097430	47.3083	134.588
6.Third Order Multiple Non-Linear Rational	0.802767	1.27613	-1.52708	34.6367	249.822
7.Fourth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.194081	47.3062	147.744
8.Fourth Order Multiple Non-Linear Rational	0.989351	1.00287	0.231656	64.6268	114.321

Tablo 5.6 Devamı

Regresyon Modelleri	R^2_{Training}	R^2_{Adjusted}	R^2_{Testing}	Min. Değer	Maks. Değer
9.Fifth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.282165	24.5061	141.193
10.Fifth Order Multiple Non-Linear Rational	0.980605	1.00188	-0.227156	51.1427	131.171
11.First Order Trigonometric Non-Linear	0.988079	0.986649	-0.175818	25.8536	166.149
12.First Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.99164	0.98936	-0.128115	-6.50728.10 ¹³	3.75051.10 ¹³
13.Second Order Trigonometric Non-Linear	0.997646	0.983523	0.182445	-7230.24	7942.24
14.Second Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.887377	1.15767	-9.2829	-6.79543.10 ⁷	1.72416.10 ⁶
15.First Order Logarithmic Non-Linear	0.987376	0.986611	-0.104223	71.6599	92.1465
16.First Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.991558	0.990469	-0.19632	-1.41849.10 ⁸	3.95124.10 ¹⁴
17.Second Order Logarithmic Non-Linear	0.991527	0.988594	0.292181	61.6656	107.719
18.Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.998177	0.996247	-120.281	-4.11695.10 ⁶	790804
19.First Order Hybrid	0.988085	0.986656	-0.174171	70.9794	95.1708
20.First Order Hybrid Rational	0.994403	0.992877	-1.08135	75.3638	448298

Sonuçlar incelendiğinde 1, 2, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19 ve 20 numaralı modellerin minimum ve maksimum değerlerinin mühendislik sınırları dışında olduğu ve R^2_{testing} değerlerinin kabul edilebilir sınırların altında olduğu görülmüştür. Geriye kalan modellerin de R^2_{testing} değerleri istenilen seviyelerde değildir ancak tüm modeller arasından R^2_{training} , R^2_{Adjusted} ve R^2_{testing} değerleri en yüksek olan fifth order multiple non-linear model amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Tablo 5.7’de dairesel kesit için bakır Von mises gerilmesinin regresyon modelleri, hesaplanan R^2 değerleri ve fonksiyonun alabileceği sınır değerler gösterilmiştir.

Tablo 5.7 Dairesel kesit için bakır von mises gerilmesinin regresyon analizi

Regresyon Modelleri	R^2_{Training}	R^2_{Adjusted}	R^2_{Testing}	Min. Değer	Maks. Değer
1.Multiple Linear	0.985517	0.984639	-0.149645	74.4644	93.9896
2.Multiple Linear Rational	0.987094	0.985429	-0.424044	$-\infty$	∞
3.Second-Order Multiple Non-Linear	0.991242	0.988211	0.176703	66.4982	122.16
4.Second-Order Multiple Non-Linear Rational	0.998134	0.996158	-1.99279	-2.46488.10 ¹²	2.02644.10 ⁹
5.Third Order Multiple Non-Linear	0.999314	0.995198	0.38364	32.4471	144.78

Tablo 5.7 Devamı

Regresyon Modelleri	R^2_{Training}	R^2_{Adjusted}	R^2_{Testing}	Min. Değer	Maks. Değer
6.Third Order Multiple Non-Linear Rational	0.993775	1.00872	0.320668	59.4859	143.53
7.Fourth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.510833	41.4837	120.169
8.Fourth Order Multiple Non-Linear Rational	0.983594	1.00442	-0.189988	62.4363	120.544
9.Fifth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.466968	22.8757	120.056
10.Fifth Order Multiple Non-Linear Rational	0.672666	1.03174	-20.5835	16.27	$4.69176 \cdot 10^{16}$
11.First Order Trigonometric Non-Linear	0.986843	0.985264	-0.131757	-10.3444	132.975
12.First Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.989128	0.986163	-1.02471	$-1.63972 \cdot 10^8$	$1.20572 \cdot 10^{15}$
13.Second Order Trigonometric Non-Linear	0.997742	0.984194	0.228712	-5618.07	2436.85
14.Second Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.960494	1.05531	-21.6147	$-1.06166 \cdot 10^8$	$4.41827 \cdot 10^8$
15.First Order Logarithmic Non-Linear	0.985731	0.984866	-0.112924	72.8051	94.2786
16.First Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.989127	0.987724	0.0392824	-46852	721805
17.Second Order Logarithmic Non-Linear	0.991804	0.988967	0.314947	63.9212	117.641
18.Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.99796	0.9958	-1.60937	$-3.71544 \cdot 10^7$	407441
19.First Order Hybrid	0.986846	0.985267	-0.130628	67.7277	97.1001
20.First Order Hybrid Rational	0.992498	0.990452	-0.40259	79.1057	194440

Sonuçlar incelendiğinde 1, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 ve 20 numaralı modellerin minimum ve maksimum değerlerinin mühendislik sınırları dışında olduğu görülmüştür. Geriye kalan modeller incelendiğinde 7 numaralı modelin R^2_{testing} değeri daha yüksek olmasına rağmen 9 numaralı fifth order multiple non-linear modelin minimum değeri çalışmanın sonuçlarını karşıladığı için amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Bakır için amaç fonksiyonları 5. Dereceden ve 7 bilinmeyenli olduğundan fitted model şeklinde verilmiştir. Şekil 5.3'te dikdörtgen kesit için bakır Von mises gerilmesinin amaç fonksiyonu Mathematica fitted model formunda gösterilmiştir.

$$27.78108778039496^{\circ} + 0.09155617048936751^{\circ} x_1 + 0.00017719907809620215^{\circ} x_1^2 + \ll 1178 \gg + 1.1284023298678532^{\circ} x_1^4 + 7.001966411571537^{\circ} x_1^5 - 2.2040797012754798^{\circ} x_1^6 - 1.0693818726032277^{\circ} x_1^7$$

dikdörtgenselbakırvonmises =

$$\begin{aligned} & 27.78108778039496^{\circ} + 0.09155617048936751^{\circ} x_1 + 0.00017719907809620215^{\circ} x_1^2 + 1.2390965751308918^{\circ} x_1^3 - \\ & 8.648412778544956^{\circ} x_1^4 - 6.136512380162463^{\circ} x_1^5 + 0.06372260946935121^{\circ} x_1^6 - 0.000671746648968246^{\circ} x_1^7 - \\ & 4.040591281722521^{\circ} x_1^8 - 1.486000452297787^{\circ} x_1^9 - 4.724760766237383^{\circ} x_1^{10} - 0.001909433227362061^{\circ} x_1^{11} - \\ & 0.00008963706759068608^{\circ} x_1^{12} - 3.1759704167076724^{\circ} x_1^{13} - 5.039709404805482^{\circ} x_1^{14} - 0.000770877418059606^{\circ} x_1^{15} - \\ & 2.911608304321371^{\circ} x_1^{16} - 1.1303001348636361^{\circ} x_1^{17} - 0.00007722159303327482^{\circ} x_1^{18} - 5.5385584861524493^{\circ} x_1^{19} - \\ & 5.147433717138943^{\circ} x_1^{20} - 0.012699944595599718^{\circ} x_1^{21} + 0.000059576186004604934^{\circ} x_1^{22} + 6.061323291126247^{\circ} x_1^{23} - \\ & 5.202842477471881^{\circ} x_1^{24} - 0.079819789256792^{\circ} x_1^{25} - 12^{\circ} x_1^{26} + 0.0013441886016820487^{\circ} x_1^{27} - 3.912859561128484^{\circ} x_1^{28} - \\ & 5.929978252220932^{\circ} x_1^{29} - 7.390134021858488^{\circ} x_1^{30} - 6.7651126662424605^{\circ} x_1^{31} - 6^{\circ} x_1^{32} - \\ & 3.9398816162914303^{\circ} x_1^{33} + 2.729303791929502^{\circ} x_1^{34} - 11^{\circ} x_1^{35} - 4.048093520226532^{\circ} x_1^{36} - 6^{\circ} x_1^{37} - \\ & 2.414776629684585^{\circ} x_1^{38} - 8^{\circ} x_1^{39} - 3.295125795428197^{\circ} x_1^{40} - 7^{\circ} x_1^{41} - 0.000112424185879374^{\circ} x_1^{42} - 3.5238187475200644^{\circ} x_1^{43} - \\ & 7.165578154156037^{\circ} x_1^{44} - 10^{\circ} x_1^{45} + 1.0560863977516173^{\circ} x_1^{46} - 11^{\circ} x_1^{47} - 2.604808561711567^{\circ} x_1^{48} - 6^{\circ} x_1^{49} - 1.3488230903115748^{\circ} x_1^{50} - \\ & 8^{\circ} x_1^{51} - 1.3228584800794127^{\circ} x_1^{52} - 10^{\circ} x_1^{53} - 1.02994011782486^{\circ} x_1^{54} - 7^{\circ} x_1^{55} - 3.0803166945893596^{\circ} x_1^{56} - 10^{\circ} x_1^{57} - \\ & 2.11510678496047^{\circ} x_1^{58} - 8^{\circ} x_1^{59} - 2.591785795881055^{\circ} x_1^{60} - 7^{\circ} x_1^{61} - 1.4856482039064043^{\circ} x_1^{62} - 9^{\circ} x_1^{63} + 1.0253092559308328^{\circ} x_1^{64} - \\ & 11^{\circ} x_1^{65} - 1.009367436968571^{\circ} x_1^{66} - 8^{\circ} x_1^{67} - 4.0035157659371025^{\circ} x_1^{68} - 11^{\circ} x_1^{69} - 7.803321571743455^{\circ} x_1^{70} - 10^{\circ} x_1^{71} - \\ & 5.460632936535099^{\circ} x_1^{72} - 10^{\circ} x_1^{73} - 3.6464390127283235^{\circ} x_1^{74} - 12^{\circ} x_1^{75} - 1.142508446809755^{\circ} x_1^{76} - 10^{\circ} x_1^{77} - 7.920075241367705^{\circ} x_1^{78} - \\ & 12^{\circ} x_1^{79} + 0.9291706939583294^{\circ} x_1^{80} + 0.0019879070921882615^{\circ} x_1^{81} + 2.0818215143225692^{\circ} x_1^{82} - 6^{\circ} x_1^{83} - 1.2912884624447362^{\circ} x_1^{84} - 9^{\circ} x_1^{85} - \\ & 1.4817566034211283^{\circ} x_1^{86} - 8^{\circ} x_1^{87} - 0.045356335211457426^{\circ} x_1^{88} - 0.00016499276516737408^{\circ} x_1^{89} - 12^{\circ} x_1^{90} - 1.217514462188188^{\circ} x_1^{91} - 7^{\circ} x_1^{92} - \\ & 1.5111746222521999^{\circ} x_1^{93} - 9^{\circ} x_1^{94} - 0.0013981986217465742^{\circ} x_1^{95} - 3.7142621767219602^{\circ} x_1^{96} - 6^{\circ} x_1^{97} - 1.4973300200534012^{\circ} x_1^{98} - \\ & 8^{\circ} x_1^{99} - 0.000040975086591342786^{\circ} x_1^{100} - 2.0411184342437492^{\circ} x_1^{101} - 7^{\circ} x_1^{102} - 6.41422182281184^{\circ} x_1^{103} - 6^{\circ} x_1^{104} - \\ & 0.0016104310120009628^{\circ} x_1^{105} + 4.636038443634452^{\circ} x_1^{106} - 6^{\circ} x_1^{107} - 8.86863724858168^{\circ} x_1^{108} - 9^{\circ} x_1^{109} - 1.3264814521494217^{\circ} x_1^{110} - \\ & 10^{\circ} x_1^{111} - 0.00008834567096816537^{\circ} x_1^{112} - 2^{\circ} x_1^{113} + 3.200901558903511^{\circ} x_1^{114} - 9^{\circ} x_1^{115} - 1.4208789127323304^{\circ} x_1^{116} - 9^{\circ} x_1^{117} - \\ & 0.00008834567096816537^{\circ} x_1^{118} - 2^{\circ} x_1^{119} + 3.200901558903511^{\circ} x_1^{120} - 9^{\circ} x_1^{121} - 1.4208789127323304^{\circ} x_1^{122} - 9^{\circ} x_1^{123} - \\ & 1.239566559118882^{\circ} x_1^{124} - 6^{\circ} x_1^{125} - 3.3843850134920154^{\circ} x_1^{126} - 9^{\circ} x_1^{127} - 8.118213982218867^{\circ} x_1^{128} - 8^{\circ} x_1^{129} - \\ & 3.0666132121426307^{\circ} x_1^{130} - 7^{\circ} x_1^{131} - 3^{\circ} x_1^{132} \dots \end{aligned}$$

Şekil 5.3 Dikdörtgen kesit bakır von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu

Şekil 5.4'te dairesel kesit için bakır Von mises gerilmesinin amaç fonksiyonu Mathematica fitted model formunda gösterilmiştir.

$$34.85416951872459^{\circ} + 0.09095351196114822^{\circ} x_1 + \ll 1202 \gg + 8.136374296012755^{\circ} x_1^4 - 12^{\circ} x_1^5 + 2.402804234813555^{\circ} x_1^6 - 10^{\circ} x_1^7 + 1.3345522055039945^{\circ} x_1^8 - 11^{\circ} x_1^9$$

daireeselbakırvonmises =

$$\begin{aligned} & 4.8542 + 0.09095351196114822^{\circ} x_1 + 0.00010586106734807132^{\circ} x_1^2 - 2.1721914551513982^{\circ} x_1^3 - 7^{\circ} x_1^4 - 2.1003956478413896^{\circ} x_1^5 - 9^{\circ} x_1^6 - \\ & 1.0262518563002337^{\circ} x_1^7 - 11^{\circ} x_1^8 + 0.15902988103146418^{\circ} x_1^9 + 0.0011590011543298664^{\circ} x_1^{10} + 3.618348815923002^{\circ} x_1^{11} - 6^{\circ} x_1^{12} + \\ & 6.8025086694673734^{\circ} x_1^{13} - 9^{\circ} x_1^{14} + 2.5831658602249987^{\circ} x_1^{15} - 12^{\circ} x_1^{16} - 0.011161212843772538^{\circ} x_1^{17} - 0.000050656374322782756^{\circ} x_1^{18} + \\ & 2.305917997592103^{\circ} x_1^{19} - 7^{\circ} x_1^{20} + 2.7168851458114422^{\circ} x_1^{21} - 9^{\circ} x_1^{22} - 0.00011270378528426087^{\circ} x_1^{23} - 4.674315573243463^{\circ} x_1^{24} - 6^{\circ} x_1^{25} + \\ & 1.5669901907279445^{\circ} x_1^{26} - 8^{\circ} x_1^{27} + 0.00002092946833123446^{\circ} x_1^{28} - 2.8018876128597577^{\circ} x_1^{29} - 7^{\circ} x_1^{30} + 1.983811275977405^{\circ} x_1^{31} - 6^{\circ} x_1^{32} + \\ & 0.024198685660257787^{\circ} x_1^{33} - 3.093466782175763^{\circ} x_1^{34} - 6^{\circ} x_1^{35} - 1.726927346793526^{\circ} x_1^{36} - 9^{\circ} x_1^{37} + 7.231778784281575^{\circ} x_1^{38} - 10^{\circ} x_1^{39} + \\ & 5.425119711673573^{\circ} x_1^{40} - 12^{\circ} x_1^{41} + 0.0007074148885857514^{\circ} x_1^{42} - 3^{\circ} x_1^{43} - 4.73998260916112^{\circ} x_1^{44} - 6^{\circ} x_1^{45} - 7.877561690870851^{\circ} x_1^{46} - 9^{\circ} x_1^{47} - \\ & 6.022787791117942^{\circ} x_1^{48} - 11^{\circ} x_1^{49} + 3.4328453709227827^{\circ} x_1^{50} - 6^{\circ} x_1^{51} - 5.563801149745968^{\circ} x_1^{52} - 7^{\circ} x_1^{53} - \\ & 4.3762404377702144^{\circ} x_1^{54} - 10^{\circ} x_1^{55} - 8.047638027365729^{\circ} x_1^{56} - 7^{\circ} x_1^{57} - 3.9512906285545925^{\circ} x_1^{58} - 8^{\circ} x_1^{59} - \\ & 6.894135483643009^{\circ} x_1^{60} - 8^{\circ} x_1^{61} - 0.00009931860508619198^{\circ} x_1^{62} - 4.0749440937714175^{\circ} x_1^{63} - 7^{\circ} x_1^{64} + 5.582000696880881^{\circ} x_1^{65} - 10^{\circ} x_1^{66} + \\ & 1.1655152347064174^{\circ} x_1^{67} - 11^{\circ} x_1^{68} + 1.9751373645513646^{\circ} x_1^{69} - 6^{\circ} x_1^{70} - 2.4715275951984947^{\circ} x_1^{71} - 8^{\circ} x_1^{72} - \\ & 2.7340467492793426^{\circ} x_1^{73} - 11^{\circ} x_1^{74} - 7.209111846424489^{\circ} x_1^{75} - 8^{\circ} x_1^{76} - 2.180913673926074^{\circ} x_1^{77} - 9^{\circ} x_1^{78} - \\ & 1.5973059827464315^{\circ} x_1^{79} - 8^{\circ} x_1^{80} - 1.817770144341363^{\circ} x_1^{81} - 7^{\circ} x_1^{82} - 3.7979991624549464^{\circ} x_1^{83} - 10^{\circ} x_1^{84} + 9.04108090897624^{\circ} x_1^{85} - 12^{\circ} x_1^{86} + \\ & 4.331825828722924^{\circ} x_1^{87} - 9^{\circ} x_1^{88} - 6.092156779981558^{\circ} x_1^{89} - 11^{\circ} x_1^{90} - 1.0825492547530662^{\circ} x_1^{91} - 9^{\circ} x_1^{92} + 1.1251356504468057^{\circ} x_1^{93} - 9^{\circ} x_1^{94} + \\ & 5.495243449816532^{\circ} x_1^{95} - 12^{\circ} x_1^{96} + 6.525165863152236^{\circ} x_1^{97} - 12^{\circ} x_1^{98} + 1.1257976661267284^{\circ} x_1^{99} - 11^{\circ} x_1^{100} + 1.0478977626862669^{\circ} x_1^{101} + \\ & 0.0018156885085562203^{\circ} x_1^{102} + 2.129611099197956^{\circ} x_1^{103} - 7^{\circ} x_1^{104} - 8.458653283522415^{\circ} x_1^{105} - 9^{\circ} x_1^{106} - 3.6233921593701216^{\circ} x_1^{107} - 11^{\circ} x_1^{108} - \\ & 0.05373584508668119^{\circ} x_1^{109} + 9.115472189010469^{\circ} x_1^{110} - 6^{\circ} x_1^{111} - 2.09628591749077^{\circ} x_1^{112} - 7^{\circ} x_1^{113} + 7.986969436857222^{\circ} x_1^{114} - 10^{\circ} x_1^{115} - \\ & 0.001528481051845488^{\circ} x_1^{116} - 3.3239126856600042^{\circ} x_1^{117} - 6^{\circ} x_1^{118} + 5.4155647562642195^{\circ} x_1^{119} - 9^{\circ} x_1^{120} - 0.0005867786533984216^{\circ} x_1^{121} - 3^{\circ} x_1^{122} + \\ & 8.338423229027696^{\circ} x_1^{123} - 8^{\circ} x_1^{124} + 8.21095414145909^{\circ} x_1^{125} - 6^{\circ} x_1^{126} + 0.0008465621898247884^{\circ} x_1^{127} + 3^{\circ} x_1^{128} + 9.137715614030873^{\circ} x_1^{129} - 7^{\circ} x_1^{130} - \\ & 4.0354870425422885^{\circ} x_1^{131} - 9^{\circ} x_1^{132} - 3.004847723307011^{\circ} x_1^{133} - 11^{\circ} x_1^{134} - 0.00004217968286765809^{\circ} x_1^{135} - 2^{\circ} x_1^{136} + \\ & 2.1832522808460475^{\circ} x_1^{137} - 7^{\circ} x_1^{138} - 2.0454924412891792^{\circ} x_1^{139} - 10^{\circ} x_1^{140} + 3.230014179928748^{\circ} x_1^{141} - 6^{\circ} x_1^{142} - \\ & 1.76328385733489^{\circ} x_1^{143} - 8^{\circ} x_1^{144} + 2.1925777299789818^{\circ} x_1^{145} - 7^{\circ} x_1^{146} - 1.905591717873733^{\circ} x_1^{147} - 6^{\circ} x_1^{148} - \\ & 1.3557756410931134^{\circ} x_1^{149} - 8^{\circ} x_1^{150} - 6.344639286736971^{\circ} x_1^{151} - 11^{\circ} x_1^{152} - 6.405455238733986^{\circ} x_1^{153} - 7^{\circ} x_1^{154} - \\ & 3.3197031497087797^{\circ} x_1^{155} - 10^{\circ} x_1^{156} - 1^{\circ} x_1^{157} \dots \end{aligned}$$

Şekil 5.4 Dairesel kesit bakır von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu

5.1.3 N Tipi Dirsek Gerilme Değerlerinin Regresyon Analizi

N tipi dirsek için regresyon analizi yapılırken, dikdörtgen kesit ve dairesel kesit için bulunan gerilme değerleri ayrı ayrı ele alınmış ve regresyon tabloları oluşturularak amaç fonksiyonları seçilmiştir. Her iki kesit içinde Von mises gerilmeleri için regresyon analizi yapılmıştır. Tablo 5.8’de dikdörtgen kesit için n tipi dirsek Von mises gerilmesinin regresyon modelleri, hesaplanan R^2 değerleri ve fonksiyonun alabileceği sınır değerler gösterilmiştir.

Tablo 5. 8 Dikdörtgen kesit için n tipi dirsek von mises gerilmesinin regresyon analizi

Regresyon Modelleri	R^2_{Training}	R^2_{Adjusted}	R^2_{Testing}	Min. Değer	Maks. Değer
1.Multiple Linear	0.942053	0.938541	0.75821	-123.537	829.745
2.Multiple Linear Rational	0.978066	0.975235	0.881402	-85.9348	1265.22
3.Second-Order Multiple Non-Linear	0.990027	0.986574	0.914304	-102.015	1093.69
4.Second-Order Multiple Non-Linear Rational	0.998822	0.997575	0.924108	16.9209	$1.61018.10^{10}$
5.Third Order Multiple Non-Linear	0.999171	0.994198	0.88766	-60.0413	1234.09
6.Third Order Multiple Non-Linear Rational	0.658632	1.47792	-1.18382	4.33059	$2.76261.10^{14}$
7.Fourth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.951609	-54.5755	1203.45
8.Fourth Order Multiple Non-Linear Rational	0.315896	1.18418	-2.03013	6.20096	$1.76406.10^{16}$
9.Fifth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.950238	-49.9611	1218.06
10.Fifth Order Multiple Non-Linear Rational	0.482204	1.0502	-0.732829	14.9317	$2.14118.10^{13}$
11.First Order Trigonometric Non-Linear	0.953184	0.947567	0.771288	-1287.14	1164.93
12.First Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.800132	0.745623	-1.4364	$-5.00559.10^{14}$	$1.43639.10^8$
13.Second Order Trigonometric Non-Linear	0.997623	0.983362	0.907453	-24200.7	15371.6
14.Second Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.717053	1.39613	-122.655	$-9.85889.10^7$	$2.2834.10^8$
15.First Order Logarithmic Non-Linear	0.941353	0.937799	0.744148	-143.432	784.651
16.First Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.982573	0.980324	0.8872	-80.9623	1396.68
17.Second Order Logarithmic Non-Linear	0.988939	0.98511	0.92872	-91.3756	1037.43
18.Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.998995	0.997931	0.96482	23.1141	1121.71
19.First Order Hybrid	0.953402	0.947811	0.77231	-171.616	819.755
20.First Order Hybrid Rational	0.99119	0.988787	0.92741	4.68876	1321.63

Sonuçlar incelendiğinde, 18 ve 20 numaralı modeller dışında kalan modellerin minimum ve maksimum değerleri mühendislik sınırları dışındadır. 18 ve 20 numaralı modeller second order logarithmic non-linear rational modelin R^2_{testing} değeri daha yüksek olduğu için amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Tablo 5.9’da dairesel kesit için n tipi dirsek Von mises gerilmesinin regresyon modelleri, hesaplanan R^2 değerleri ve fonksiyonun alabileceği sınır değerler gösterilmiştir.

Tablo 5.9 Dairesel kesit için n tipi dirsek von mises gerilmesinin regresyon analizi

Regresyon Modelleri	R^2_{Training}	R^2_{Adjusted}	R^2_{Testing}	Min. Değer	Maks. Değer
1.Multiple Linear	0.946831	0.943608	0.729775	0.69338	384.844
2.Multiple Linear Rational	0.97488	0.971639	0.781772	-76.2281	503.764
3.Second-Order Multiple Non-Linear	0.992651	0.990107	0.883616	-83.8909	498.316
4.Second-Order Multiple Non-Linear Rational	0.998993	0.997927	0.917581	-22.6301	$1.79566.10^9$
5.Third Order Multiple Non-Linear	0.999454	0.996179	0.890468	-44.3737	600.583
6.Third Order Multiple Non-Linear Rational	0.796257	1.28524	0.212204	26.5806	1025.65
7.Fourth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.897413	-66.1698	569.486
8.Fourth Order Multiple Non-Linear Rational	0.72777	1.07329	-50.5695	23.8392	$1.38067.10^{17}$
9.Fifth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.904749	-62.4124	569.29
10.Fifth Order Multiple Non-Linear Rational	0.591598	1.0396	-1.44415	17.7681	$1.13881.10^8$
11.First Order Trigonometric Non-Linear	0.964659	0.960418	0.778204	-621.035	554.208
12.First Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.859806	0.821572	-0.508016	$-3.29806.10^9$	$3.16547.10^8$
13.Second Order Trigonometric Non-Linear	0.998637	0.99046	0.891232	-10959.7	7874.07
14.Second Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.861353	1.19411	-58.5076	$-2.8806.10^{13}$	$9.62704.10^6$
15.First Order Logarithmic Non-Linear	0.943364	0.939932	0.727646	-5.76424	363.027
16.First Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.973214	0.969757	0.782516	-62.3154	491.21
17.Second Order Logarithmic Non-Linear	0.990167	0.986764	0.898596	-83.9168	472.858
18.Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.999276	0.99851	0.918726	-191.81	428.231
19.First Order Hybrid	0.964668	0.960429	0.777939	-52.3454	384.62
20.First Order Hybrid Rational	0.98577	0.981889	0.888429	20.5524	578.797

Sonuçlar incelendiğinde 1, 6 ve 20 numaralı modeller dışında kalan modellerin minimum ve maksimum değerlerinin mühendislik sınırları dışında olduğu görülmüştür. Multiple linear modelin R^2_{testing} değeri 0,85'in altında olduğundan uygun görülmemiştir. Third order multiple non-linear rational modelin hem R^2_{training} hem de R^2_{testing} değerleri uygun sınırları sağlamadığı için amaç fonksiyonu olarak seçilmemiştir. Kalan son model olan 20 numaralı first order hybrid rational model tüm kriterleri sağladı için amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Şekil 5.5'te dikdörtgen kesit için n tipi dirsek Von mises gerilmesinin amaç fonksiyonu second order logarithmic non-linear rational, Mathematica formunda gösterilmiştir. Şekil 5.6'da dairesel kesit için n tipi dirsek Von mises gerilmesinin amaç fonksiyonu first order hybrid rational, Mathematica formunda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{dikdörtgenselntipivonmises} = & (-8572.287760755895' + 3821.5602807638093' \text{Log}[x1] + 494.3740786047211' \text{Log}[x1]^2 - 6993.453116125918' \text{Log}[x2] + 923.9306860614979' \text{Log}[x1] \text{Log}[x2] + \\ & 993.4995716560574' \text{Log}[x2]^2 + 803.0996447234099' \text{Log}[x3] + 160.59572752251887' \text{Log}[x1] \text{Log}[x3] - 286.2097507452922' \text{Log}[x2] \text{Log}[x3] - \\ & 170.28381122999352' \text{Log}[x3]^2 + 3723.7712039216526' \text{Log}[x4] - 409.7234312369652' \text{Log}[x1] \text{Log}[x4] + 114.21614954123373' \text{Log}[x2] \text{Log}[x4] - \\ & 124.20668250237557' \text{Log}[x3] \text{Log}[x4] - 205.58647506339247' \text{Log}[x4]^2 + 471.9529588577564' \text{Log}[x5] - 298.65927828638655' \text{Log}[x1] \text{Log}[x5] - \\ & 82.78487053948815' \text{Log}[x2] \text{Log}[x5] + 198.35161867743645' \text{Log}[x3] \text{Log}[x5] - 161.4363918569385' \text{Log}[x4] \text{Log}[x5] + 53.88036259289767' \text{Log}[x5]^2 - \\ & 1596.6832322668558' \text{Log}[x6] - 1428.8603218979022' \text{Log}[x1] \text{Log}[x6] - 532.6565957467034' \text{Log}[x2] \text{Log}[x6] - 125.87256416453384' \text{Log}[x3] \text{Log}[x6] + \\ & 47.66590368045032' \text{Log}[x4] \text{Log}[x6] + 266.97032159685847' \text{Log}[x5] \text{Log}[x6] + 1112.1525294381913' \text{Log}[x6]^2 + 2334.2503511535847' \text{Log}[x7] - \\ & 1311.1205651212051' \text{Log}[x1] \text{Log}[x7] + 70.42308761939307' \text{Log}[x2] \text{Log}[x7] + 111.6910881376121' \text{Log}[x3] \text{Log}[x7] + \\ & 87.60788245077845' \text{Log}[x4] \text{Log}[x7] - 109.63722490995687' \text{Log}[x5] \text{Log}[x7] + 332.9048395335307' \text{Log}[x6] \text{Log}[x7] + 372.59379864704414' \text{Log}[x7]^2) / \\ & (316.79066424660317' - 60.57723032943822' \text{Log}[x1] + 5.392201241843368' \text{Log}[x1]^2 - 26.60610751400471' \text{Log}[x2] + 3.1103194291255707' \text{Log}[x1] \text{Log}[x2] + \\ & 1.0272503349300455' \text{Log}[x2]^2 + 6.7085411993804428' \text{Log}[x3] - 0.3724595452580214' \text{Log}[x1] \text{Log}[x3] - 0.7945494087115953' \text{Log}[x2] \text{Log}[x3] - \\ & 0.18244914378106356' \text{Log}[x3]^2 + 8.460244106092071' \text{Log}[x4] - 1.0725314103404522' \text{Log}[x1] \text{Log}[x4] + 0.6595173318893796' \text{Log}[x2] \text{Log}[x4] - \\ & 0.17277801916595126' \text{Log}[x3] \text{Log}[x4] - 0.3177857537574002' \text{Log}[x4]^2 - 0.23714059382620023' \text{Log}[x5] - 0.16860246881150792' \text{Log}[x1] \text{Log}[x5] + \\ & 0.10285367196339454' \text{Log}[x2] \text{Log}[x5] + 0.36367407553911724' \text{Log}[x3] \text{Log}[x5] - 0.25765455859101155' \text{Log}[x4] \text{Log}[x5] + \\ & 0.10418122610718844' \text{Log}[x5]^2 - 18.597415285897412' \text{Log}[x6] - 1.5772903584274394' \text{Log}[x1] \text{Log}[x6] + 1.5897853454757132' \text{Log}[x2] \text{Log}[x6] + \\ & 0.06358514391033941' \text{Log}[x3] \text{Log}[x6] - 0.6223353626739192' \text{Log}[x4] \text{Log}[x6] - 0.11922402134297981' \text{Log}[x5] \text{Log}[x6] + \\ & 2.558713726929219' \text{Log}[x6]^2 - 37.768148389193236' \text{Log}[x7] - 0.12353957127478661' \text{Log}[x1] \text{Log}[x7] + 0.14843801166234431' \text{Log}[x2] \text{Log}[x7] - \\ & 0.3393099480406515' \text{Log}[x3] \text{Log}[x7] + 0.14349934655095048' \text{Log}[x4] \text{Log}[x7] - 0.24664132618972442' \text{Log}[x5] \text{Log}[x7] + \\ & 1.7575310452420427' \text{Log}[x6] \text{Log}[x7] + 3.316998728471386' \text{Log}[x7]^2) \end{aligned}$$

Şekil 5.5 Dikdörtgen kesit n tipi von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu

$$\begin{aligned} \text{daireseIntipivonmises} = & (296685.3255761422' - 16.320572057302364' x1 + 1230.1540430060863' x2 + 109.36825884165185' x3 - 142.00634220997875' x4 + \\ & 92.09690623819867' x5 + 1334.7954226470408' x6 + 213.27178165145926' x7 + 13953.751981289704' \text{Log}[x1] - 35999.9615304888414' \text{Log}[x2] - \\ & 19251.647611088127' \text{Log}[x3] + 3940.8350670771456' \text{Log}[x4] - 15803.149216423762' \text{Log}[x5] - 31547.10419271094' \text{Log}[x6] - 18964.889845177284' \text{Log}[x7]) / \\ & ((2450.973906200181' - 0.06974038228420472' x1 - 12.303091309517821' x2 + 0.4416595389022594' x3 + 0.032715213581242665' x4 + \\ & 0.23914863675070488' x5 + 14.53864482287131' x6 + 1.6553632224926458' x7 - 5.800210477151703' \text{Log}[x1] - 9.976714645256447' \text{Log}[x2] - \\ & 70.67203180981748' \text{Log}[x3] + 1.5322559594632315' \text{Log}[x4] - 34.68313696550566' \text{Log}[x5] - 188.1542365868451' \text{Log}[x6] - 317.74002969877057' \text{Log}[x7]) \end{aligned}$$

Şekil 5.6 Dairesel kesit n tipi von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu

5.1.4 P Tipi Dirsek Gerilme Değerlerinin Regresyon Analizi

P tipi dirsek için regresyon analizi yapılırken, dikdörtgen kesit ve dairesel kesit için bulunan gerilme değerleri ayrı ayrı ele alınmış ve regresyon tabloları oluşturularak amaç fonksiyonları seçilmiştir. Her iki kesit içinde Von mises gerilmeleri için regresyon analizi yapılmıştır. Tablo 5.10'da dikdörtgen kesit için n tipi dirsek Von mises gerilmesinin regresyon modelleri, hesaplanan R^2 değerleri ve fonksiyonun alabileceği sınır değerler gösterilmiştir.

Tablo 5.10 Dikdörtgen kesit için p tipi dirsek von mises gerilmesinin regresyon analizi

Regresyon Modelleri	R^2_{Training}	R^2_{Adjusted}	R^2_{Testing}	Min. Değer	Max. Değer
1.Multiple Linear	0.948662	0.94555	0.83029	-139.049	740.818
2.Multiple Linear Rational	0.981262	0.978845	0.902609	-3.50343	1181.12
3.Second-Order Multiple Non-Linear	0.992964	0.990529	0.932498	-19.3674	1012.29
4.Second-Order Multiple Non-Linear Rational	0.998844	0.99762	-0.135587	12.4599	1208.19
5.Third Order Multiple Non-Linear	0.999679	0.997754	0.92969	-230.802	988.215
6.Third Order Multiple Non-Linear Rational	0.405508	1.83229	-18.6239	1.98915	1.74585.10 ⁸
7.Fourth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.941993	-52.577	1060.68
8.Fourth Order Multiple Non-Linear Rational	0.337242	1.17843	-2.11438	8.12858	8.70729.10 ⁷
9.Fifth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.936145	-65.6384	1111.41
10.Fifth Order Multiple Non-Linear Rational	0.258902	1.07185	-3.21277	3.7272	1.39156.10 ¹⁶
11.First Order Trigonometric Non-Linear	0.952375	0.94666	0.81603	-910.627	2729.05
12.First Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.9935829	0.991833	0.94534	-8.5132.10 ⁷	1.42902.10 ¹⁵
13.Second Order Trigonometric Non-Linear	0.998187	0.987311	0.915759	-29910.3	22293
14.Second Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.432595	1.79437	-2.47379	-5.43232.10 ¹³	4.86566.10 ⁷
15.First Order Logarithmic Non-Linear	0.94595	0.942675	0.840893	-169.063	706.137
16.First Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.988452	0.986961	0.939824	-19.7751	1141
17.Second Order Logarithmic Non-Linear	0.992528	0.989942	0.949186	12.2942	969.967
18.Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.999161	0.998273	0.974617	16.1082	1014.52
19.First Order Hybrid	0.953845	0.948307	0.811971	-136.423	759.872
20.First Order Hybrid Rational	0.995559	0.994348	0.970084	1.38384	1038.69

Sonuçlar incelendiğinde 4, 17, 18 ve 20 numaralı modeller dışında kalan modellerin minimum ve maksimum değerlerinin mühendislik sınırları dışında olduğu görülmüştür. Second-order multiple non-linear rational modelin R^2_{testing} değeri 0,85'in altında olduğundan uygun görülmemiştir. Geriye kalan modellerden 17 numaralı modelin R^2_{testing} değeri daha düşük olmasına rağmen min. ve maks. değerleri çalışmaya daha uygun görüldüğü için amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Tablo 5.11'de dairesel kesit için p tipi dirsek Von mises gerilmesinin regresyon modelleri, hesaplanan R^2 değerleri ve fonksiyonun alabileceği sınır değerler gösterilmiştir.

Tablo 5.11 Dairesel kesit için p tipi dirsek von mises gerilmesinin regresyon analizi

Regresyon Modelleri	R^2_{Training}	R^2_{Adjusted}	R^2_{Testing}	Min. (MPa)	Max. (MPa)
1. Multiple Linear	0.959193	0.95672	0.78131	-27.9902	349.16
2. Multiple Linear Rational	0.979985	0.977403	0.850526	-8.74351	501.974
3. Second-Order Multiple Non-Linear	0.994238	0.992243	0.904415	-22.1065	455.644
4. Second-Order Multiple Non-Linear Rational	0.998993	0.997927	0.960432	1.8797	88820.1
5. Third Order Multiple Non-Linear	0.999686	0.997804	0.918766	-55.9737	467.681
6. Third Order Multiple Non-Linear Rational	0.949411	1.07082	0.444901	6.60728	1353.78
7. Fourth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.921374	-18.661	487.967
8. Fourth Order Multiple Non-Linear Rational	0.5499	1.12118	-0.651083	17.407	$2.10543 \cdot 10^{17}$
9. Fifth Order Multiple Non-Linear	1	1	0.919756	-19.3559	494.307
10. Fifth Order Multiple Non-Linear Rational	0.846754	1.01486	-27.5339	24.5599	1109.61
11. First Order Trigonometric Non-Linear	0.963108	0.958681	0.738856	-323.73	1080.6
12. First Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.986216	0.982456	0.880147	$-2.76233 \cdot 10^9$	$2.07708 \cdot 10^{16}$
13. Second Order Trigonometric Non-Linear	0.998843	0.991902	0.911225	-9013.06	11169.6
14. Second Order Trigonometric Non-Linear Rational	0.956148	1.06139	-7.27131	$-1.24917 \cdot 10^8$	$4.94381 \cdot 10^{15}$
15. First Order Logarithmic Non-Linear	0.95528	0.95257	0.786247	-36.7536	328.046
16. First Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.982101	0.979792	0.873126	-11.2357	460.992
17. Second Order Logarithmic Non-Linear	0.993204	0.990852	0.923273	7.08708	433.643
18. Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	0.9993496	0.998661	0.945868	4.78807	473.169
19. First Order Hybrid	0.968305	0.964502	0.761899	-36.2844	361.013
20. First Order Hybrid Rational	0.990551	0.987974	0.902849	0.730792	439.592

Sonuçlar incelendiğinde 6, 10, 17, 18 ve 20 numaralı modeller dışında kalan modellerin minimum ve maksimum değerlerinin mühendislik sınırları dışında olduğu görülmüştür. Bu modellerden 6 ve 10 numaralı modelin R^2_{testing} değeri 0,85'in altında olduğundan uygun görülmemiştir. Second order logarithmic non-linear rational model minimum ve maksimum değerlerinin uygunluğu ve aynı zamanda R^2_{testing} değerinin yüksek olması sebebi ile amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Şekil 5.7'de dikdörtgensel kesit için p tipi dirsek Von mises gerilmesinin amaç fonksiyonu second order logarithmic non-linear, Mathematica formunda gösterilmiştir. Şekil 5.8'de dairesel kesit için p tipi dirsek Von mises gerilmesinin amaç fonksiyonu second order logarithmic non-linear rational, Mathematica formunda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{dikdörtgenselptipivonmises} = & 1162.7916555144072 \cdot \log[x1] - 982.7382170028028 \cdot \log[x1]^2 + 225.4961188496763 \cdot \log[x2] - \\ & 6.222329915592761 \cdot \log[x1] \log[x2] - 11.297215951563564 \cdot \log[x2]^2 - 956.7242373112013 \cdot \log[x3] - 1.3073750317335142 \cdot \log[x1] \log[x3] - \\ & 15.387875991358445 \cdot \log[x2] \log[x3] + 49.63728525628836 \cdot \log[x3]^2 - 1171.9030581854042 \cdot \log[x4] + 4.760353858373168 \cdot \log[x1] \log[x4] - \\ & 61.7496637287494 \cdot \log[x2] \log[x4] + 115.53866504308425 \cdot \log[x3] \log[x4] + 102.03615402133514 \cdot \log[x4]^2 - 270.4592224224936 \cdot \log[x5] - \\ & 35.6813510551604 \cdot \log[x1] \log[x5] + 14.2156684929071 \cdot \log[x2] \log[x5] + 36.97249791489689 \cdot \log[x3] \log[x5] + 39.43389954316331 \cdot \log[x4] \log[x5] + \\ & 2.7715946775696003 \cdot \log[x5]^2 + 1755.6779863710804 \cdot \log[x6] - 19.614387285967716 \cdot \log[x1] \log[x6] + 19.07830460380222 \cdot \log[x2] \log[x6] - \\ & 158.78464545742474 \cdot \log[x3] \log[x6] - 158.47912977541145 \cdot \log[x4] \log[x6] + 36.9008080462066875 \cdot \log[x5] \log[x6] - 100.79329917063218 \cdot \log[x6]^2 - \\ & 917.7420568934448 \cdot \log[x7] + 9.491683491320632 \cdot \log[x1] \log[x7] - 7.632822133276303 \cdot \log[x2] \log[x7] + 123.40001879100207 \cdot \log[x3] \log[x7] + \\ & 104.3606838777972 \cdot \log[x4] \log[x7] + 8.06763613707139 \cdot \log[x5] \log[x7] - 83.32174187085158 \cdot \log[x6] \log[x7] + 39.66487430781286 \cdot \log[x7]^2 \end{aligned}$$

Şekil 5.7 Dikdörtgensel kesit p tipi von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu

$$\begin{aligned} \text{daireeselptipivonmises} = & (-20875.03090031595 + 3129.279120426928 \cdot \log[x1] - 239.98873119245408 \cdot \log[x1]^2 + 1941.1566771295134 \cdot \log[x2] - 120.800961538709 \cdot \log[x1] \log[x2] + \\ & 170.13097148081198 \cdot \log[x2]^2 + 678.433304294237 \cdot \log[x3] + 0.8579408323214344 \cdot \log[x1] \log[x3] - 14.83040302041145 \cdot \log[x2] \log[x3] + \\ & 322.03497097619714 \cdot \log[x3]^2 - 5455.450917457189 \cdot \log[x4] - 231.07985963813786 \cdot \log[x1] \log[x4] - 344.09092589116983 \cdot \log[x2] \log[x4] + \\ & 549.0916071806547 \cdot \log[x3] \log[x4] + 590.7426984255499 \cdot \log[x4]^2 + 596.9374450344925 \cdot \log[x5] + 70.28102896396558 \cdot \log[x1] \log[x5] - \\ & 104.2908715026108 \cdot \log[x2] \log[x5] - 353.0937348046794 \cdot \log[x3] \log[x5] + 273.76489855747377 \cdot \log[x4] \log[x5] + 74.26738831768259 \cdot \log[x5]^2 + \\ & 8455.378927516529 \cdot \log[x6] - 814.5071884599096 \cdot \log[x1] \log[x6] + 399.90090912498914 \cdot \log[x2] \log[x6] - 678.3512861234599 \cdot \log[x3] \log[x6] + \\ & 9.028257763661774 \cdot \log[x4] \log[x6] - 337.46563325004814 \cdot \log[x5] \log[x6] + 1137.2712903215033 \cdot \log[x6]^2 + 3025.7579966362637 \cdot \log[x7] + \\ & 508.6521059665388 \cdot \log[x1] \log[x7] - 370.1761403771712 \cdot \log[x2] \log[x7] - 302.0007718280297 \cdot \log[x3] \log[x7] - 88.80466139282591 \cdot \log[x4] \log[x7] + \\ & 135.46023465341125 \cdot \log[x5] \log[x7] - 2213.752204737 \cdot \log[x6] \log[x7] + 353.6611678462792 \cdot \log[x7]^2) / \\ & (286.93078618779936 + 27.56233405970334 \cdot \log[x1] - 0.7868820274379911 \cdot \log[x1]^2 - 0.9971143476819089 \cdot \log[x2] - 0.8766133921735698 \cdot \log[x1] \log[x2] + \\ & 1.132558019403981 \cdot \log[x2]^2 - 48.069941995392234 \cdot \log[x3] - 1.3403762440210916 \cdot \log[x1] \log[x3] + 0.5959205095792458 \cdot \log[x2] \log[x3] + \\ & 4.906042852403644 \cdot \log[x3]^2 - 12.368919028884378 \cdot \log[x4] - 1.1287922786194744 \cdot \log[x1] \log[x4] - 0.5195959547934758 \cdot \log[x2] \log[x4] + \\ & 0.20597286542091214 \cdot \log[x3] \log[x4] - 7.733841743825562 \cdot \log[x4]^2 + 17.250562958733056 \cdot \log[x5] - 0.1966973654770389 \cdot \log[x1] \log[x5] + \\ & 0.3204892355987223 \cdot \log[x2] \log[x5] - 3.090512645002029 \cdot \log[x3] \log[x5] + 1.5184275239191811 \cdot \log[x4] \log[x5] - 0.24559538147178234 \cdot \log[x5]^2 - \\ & 73.97421227717012 \cdot \log[x6] - 3.028608682920874 \cdot \log[x1] \log[x6] + 0.2181330507802007 \cdot \log[x2] \log[x6] + 3.791080225135309 \cdot \log[x3] \log[x6] + \\ & 15.906692449267777 \cdot \log[x4] \log[x6] - 2.6534979769544016 \cdot \log[x5] \log[x6] + 4.288800236159178 \cdot \log[x6]^2 - 38.321487683484726 \cdot \log[x7] + \\ & 0.9333921930188191 \cdot \log[x1] \log[x7] - 0.9547329618334627 \cdot \log[x2] \log[x7] + 0.8038159974756843 \cdot \log[x3] \log[x7] - 0.5894847836863667 \cdot \log[x4] \log[x7] + \\ & 1.044014770181391 \cdot \log[x5] \log[x7] + 0.060074484323182915 \cdot \log[x6] \log[x7] + 2.3962340308461862 \cdot \log[x7]^2) \end{aligned}$$

Şekil 5.8 Dairesel kesit p tipi von mises gerilmesi için amaç fonksiyonu

5.2 Optimizasyon Algoritmaları

Esasen, bir yapının optimizasyonu, tüm kısıtlamalara karşılık gelen, belirtilen bir veya birden fazla amacı en aza indirerek en iyi tasarımların elde edilmesi olarak tanımlanabilir. Optimizasyon teknikleri geleneksel ve geleneksel olmayan olarak sınıflandırılabilir. Geleneksel optimizasyon teknikleri, kısıtlı varyasyon ve Lagrange çarpanları gibi yalnızca sürekli ve türevlenebilir fonksiyonlar için çalışır. Mühendislik tasarım problemlerinin doğarı gereği geleneksel optimizasyon teknikleri kullanılamaz. Bu durumlarda, genetic algorithms (GA), particle swarm (PS) ve simulated annealing (SA) gibi stokastik optimizasyon yöntemleri kullanılır. Stokastik yöntemlerin doğası gereği kesin çözüm elde edilememekte ve aynı optimizasyon problemi için farklı fenomenolojik temelli birden fazla yöntemin kullanılması çözümün güvenilirliğini arttırmaktadır (Aydın ve Artem, 2011).

Çalışmada bazı stokastik optimizasyon yöntemleri kullanılarak hem dikdörtgensel kesitli hem de dairesel kesitli dirseklerin gerilmeleri üzerinde belirli kısıtlamalar altında optimizasyon çalışması yapılmıştır. Kullanılan optimizasyon yöntemlerinin matematiksel alt yapıları sırasıyla açıklanmıştır.

5.2.1 Değiştirilmiş Nelder –Mead Algoritması

Basit doğrudan arama yöntemlerinden biri Nelder – Mead (NM) optimizasyon algoritmasıdır. Bu nedenle herhangi bir türev bilgisi gerektirmez ve fonksiyonun minimizasyonu için simpleks ile başlar. Simplekse kadar sürdürülen iterasyon düz hale gelir. Bu, fonksiyonun sonuç değerinin neredeyse tüm köşelerde aynı olduğu anlamına gelir. Nelder-Mead algoritmasının iterasyon adımları sıralama, ağırlık merkezi ve dönüşümdür.

Algoritmanın mevcut versiyonunda, öngörülen kısıtlanmış minimizasyon problemini çözmek için akışa bir penaltı fonksiyonu eklenir. İlk çalışmanın kurgulanmasında simplex S ilk adımdır. İkinci adımda, fonksiyonu minimize etmek arama noktasını zirve noktasından uzaklaştırır ki bu en kötü fonksiyon değeridir. Bu adım, yansıtılan ve iyileştirilmiş bir nokta vererek elde edilir (Öztürk, Aydın ve Çelik, 2018).

5.2.2 Değiştirilmiş Differential Evolution Algoritması

DE, stokastik optimizasyon yaklaşımının en uygun yollarından biridir. Optimum sonucu bulmak için karmaşık yapıli kompozit tasarım problemlerinde kullanılabilir. DE algoritmasının üretken parametreleri, popülasyon boyutu, geçiş ve ölçeklendirme faktörüdür. Çözümleri iterasyon yapmak yerine bir dizi çözümü ele alır. DE algoritmasının, tüm optimizasyon problemleri için global optimum noktaları karşılamasa bile, literatürde sağlam ve verimli olduğu görölmektedir (Savran ve Aydın, 2018).

5.2.3 Değiştirilmiş Simulated Annealing Algoritması

Metalin fiziksel tavlama sürecine dayanan bir başka standart arama yöntemi SA'dır. Malzeme, eritme süreci boyunca daha düşük bir enerji durumuna geçer ve daha sert hale gelir. Algoritmanın içsel yapısı nedeniyle, global optimumun bulunmasında daha iyidir. Sürekli, karışık tamsayı veya ayrık optimizasyon problemlerini çözebilir. Mathematica'daki SA algoritması bir ilk tahmin θ_{in} ile başlar, ardından θ_{in} 'in çevresinde yeni bir nokta, θ_{new} , üretilir. Ana fikir iterasyonlarla komşu civarların yarıçapını azaltmaktır. $f(\theta_{best}) \geq f(\theta_{new})$ durumunda θ_{new} , θ_{best} ve θ 'nın yerini alır. Boltzmann'ın olasılık dağılım fonksiyonu, şimdiki ve yeni noktalar arasındaki mesafeyi hesaplamak için kullanılır (Akçair ve diğer., 2019; Savran ve Aydın, 2019).

5.2.4 Değiştirilmiş Random Search Algoritması

Geleneksel random search algoritmasında ilk adım, rastgele başlangıç noktalarından oluşan bir popülasyon oluşturmaktır. Bu aşamada yerel bir uç noktaya yaklaşmak için her başlangıç noktasından yerel bir optimizasyon yöntemi kullanılır. Çözüm olarak, en iyi yerel minimum seçilir.

Algoritmanın önerilen versiyonunda, amaç fonksiyonu için tüm değişkenlerin değerlerinin yerelleştirilmesinde conjugate gradient, principal axis, Levenberg-Marquardt, Newton, QuasiNewton ve nonlinear interior-point yöntemi gibi bazı güçlendirici alt programlar kullanılmaktadır. Bu adımda, fitnes fonksiyonu değişkenler ile sembolik olarak değerlendirilir ve ardından süreç tekrar tekrar devam

eder. Karışık tamsayı, sürekli küresel optimizasyon problemlerini çözmek de mümkündür (Aydın ve Savran, 2019).

5.3 Optimizasyon Senaryoları

Optimizasyon çalışmaları dikdörtgen ve dairesel kesitli dirseklerin Von mises gerilmeleri için yapılmıştır. Belirli kısıtlamalar altında dirseklerde oluşabilecek en düşük gerilme değerleri bulunmaya çalışılmıştır. Bakır malzemede akma sınırı aşılsa bile, herhangi bir çatlak oluşmadıktan sonra elektrik üretiminde bir sorun olmadığı gözlemlerle sabittir. Bu sebeple bakırın kopma mukavemeti optimizasyonda göze alınabilir. Ancak optimizasyon çalışması yapıldığından temel senaryolarda bakırın akma mukavemeti kısıtlama olarak seçilmiştir.

1. Senaryo: Bu senaryoda fazladan bir kısıtlama olmadan sadece girdi parametreleri kısıtlamaları ile optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu senaryoda şu sorunun cevabını bulmamız mümkündür: Hiçbir mukavemet sınırı bir kısıt olarak belirlenmediği takdirde, seçilen girdi parametreleri aralığında n ve p tipi dirseklerin minimum gerilme değeri ne olabilir ve bunun için hangi girdi parametreleri seçilmelidir?

2. Senaryo: Bu senaryoda şu sorunun cevabını bulabiliriz: 250⁰C sıcaklıkta bakırda akma olmaması ve alümina da kırılma olmaması için n ve p tipi dirseklerin minimum mukavemet sınırları ne olmalıdır ve bunun için hangi girdi parametreleri seçilmelidir?

Bu senaryoda bakır malzemenin akma sınırı ve alümina malzemenin kırılma mukavemeti göz önüne alınmış ve sıcaklık değeri de bir kısıtlama olarak eklenmiştir. Gerçek çalışma koşullarına en uygun düşünülen senaryolardan birisi 2. senaryodur.

3. Senaryo: Bu senaryoda şu sorunun cevabını bulabiliriz: Girdi parametreleri belirli aralıklarda değil belirlenmiş değerlerde seçildiğinde, bakırda akma olmaması ve alüminada kırılma olmaması için n tipi ve p tipi dirseklerin minimum mukavemet sınırları ne olmalıdır ve bunun için hangi girdi parametreleri seçilmelidir?

Yapılan bu 3 temel senaryo optimizasyon çalışmalarında ve literatürde en genel olarak kullanılan senaryolardır. Oluşturulan optimizasyon tabloları için bu senaryolar kullanılmıştır.

5.3.1 Dikdörtgen Kesitli n Tipi Dirsek Optimizasyon Sonuçları

Şekil 5.9’da dikdörtgen kesitli n tipi dirsek için optimizasyon sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde;

1. senaryo için tüm optimizasyon algoritmalarında 15,6768 MPa sonucu bulunmuş ve bu sonuç için önerilen girdi parametreleri verilmiştir. Yani bakır literatürdeki değerinde alınmak üzere, n tipi dirseğin en düşük gerilme değeri 15,6768 MPa’dır ve bu girdi parametreleri için TEM’in sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için n tipi dirseğin mukavemet sınırının 15,6768 MPa’nın altına düşmeyecek şekilde üretilmesi gerekmektedir.

2. Senaryo için de tüm optimizasyon algoritmalarında n tipi dirsekte maksimum Von mises gerilmesi 233,785 MPa bulunmuştur. Bu durumda, bakır malzeme akma sınırına ulaşmadan ve alümina malzeme hasara uğramadan 250⁰C sıcaklıkta 233,785 MPa gerilme değerine kadar termoelektrik modül sağlıklı bir şekilde çalışabilecektir. Bir başka ifadeyle, bakır gerçek değerinde alındığında, 250⁰C sıcaklık farkı için TEM’in hasara uğramadan çalışabilmesi için n tipi dirseğin mukavemet sınırı 233,785 MPa olacak şekilde üretilmesi gerekmektedir.

3. Senaryo için sadece seçmiş olduğumuz girdi parametrelerinin faktör seviyelerinin kullanılabildiği bir senaryodur ve tüm optimizasyon algoritmaları için 40,6291 MPa değeri bulunmuştur. Yani bakır malzeme akma sınırına ulaşmadan ve alümina malzeme hasara uğramadan belirlenen girdi parametreleri değerleri seçilerek n tipi dirseğin minimum Von mises gerilmesi 40,6291 MPa bulunmuştur. TEM’in belirlenen değerlerde sağlıklı çalışabilmesi için n tipi dirseğin mukavemet sınırı 40,6291 MPa’nın altına düşmeyecek şekilde üretilmesi gerekmektedir.

Objective Function/Amaç Fonksiyonu	Constraints/Kısıtlamalar	Senaryo No.	Optimizasyon Algoritması	Optimum Değer	Önerilen Dizayn Parametreleri
Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	110<x1<290, 4<x2<20, 70<x3<240, 6<x4<19.2, 150<x5<390, 7.6<x6<19.6, 50<x7<250	1	DE	15.6768	x1=110, x2=17.477, x3=240, x4=6, x5=150, x6=19.6, x7=50
			SA	15.6768	
			RS	15.6768	
			NM	15.6768	
	110<x1<290, 4<x2<20, 70<x3<240, 6<x4<19.2, 150<x5<390, 7.6<x6<19.6, 50<x7<250, σ_1 Alumina<300, σ_2 Bakır<70, x7=250	2	DE	233.785	x1=110, x2=10.2022, x3=240, x4=6, x5=150, x6=19.6, x7=250
			SA	233.785	
			RS	233.785	
			NM	233.785	
	x1=110, x1=200, x1=290, x2=4, x2=12, x2=20, x=70, x3=150, x3=240, x=6, x4=12.6, x4=19.2, x5=150, x5=270, x5=390, x6=7.6, x6=13.6, x6=19.6, x7=50, x7=150, x7=250, σ_1 Alumina<300, σ_2 Bakır<70	3	DE	40.6291	x1=110, x2=12, x3=150, x4=19.2, x5=150, x6=19.6, x7=50
			SA	40.6291	
			RS	40.6291	
			NM	40.6291	

Şekil 5.9 Dikdörtgen kesitli n tipi dirsek optimizasyon sonuçları

5.3.2 Dairesel Kesitli n Tipi Dirsek Optimizasyon Sonuçları

Şekil 5.10'da dairesel kesitli n tipi dirsek için minimum optimizasyon sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde;

1. senaryo için tüm optimizasyon algoritmalarında 20,5524 MPa sonucu bulunmuş ve bu sonuç için önerilen girdi parametreleri verilmiştir. Yani bakır gerçek değerinde alınmak üzere, n tipi dirseğin en düşük gerilme değeri 20,5524 MPa'dır ve bu girdi parametreleri için TEM'in sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için n tipi dirseğin mukavemet sınırının 20,5524 MPa'nın altına düşmeyecek şekilde üretilmesi gerekmektedir.

2. Senaryo için de tüm optimizasyon algoritmalarında n tipi dirsekte maksimum Von mises gerilmesi 131,106 MPa bulunmuştur. Bu durumda, bakır malzeme akma sınırına ulaşmadan ve alümina malzeme hasara uğramadan 250⁰C sıcaklıkta 131,106 MPa gerilme değerine kadar termoelektrik modül sağlıklı bir şekilde çalışabilecektir. Bir başka ifadeyle, bakır gerçek değerinde alındığında, 250⁰C sıcaklık farkı için TEM'in hasara uğramadan çalışabilmesi için n tipi dirseğin mukavemet sınırı 131,106 MPa olacak şekilde üretilmesi gerekmektedir.

3. Senaryo için sadece seçmiş olduğumuz girdi parametrelerinin faktör seviyelerinin kullanılabildiği bir senaryodur ve tüm optimizasyon algoritmaları için 30,9379 MPa değeri bulunmuştur. Yani bakır malzeme akma sınırına ulaşmadan ve alümina malzeme hasara uğramadan belirlenen girdi parametreleri değerleri seçilerek n tipi dirseğin minimum Von mises gerilmesi 30,9379 MPa bulunmuştur. TEM'in belirlenen değerlerde sağlıklı çalışabilmesi için n tipi dirseğin mukavemet sınırı 30,9379 MPa'nın altına düşmeyecek şekilde üretilmesi gerekmektedir.

Objective Function/Amaç Fonksiyonu	Constraints/Kısıtlamalar	Senaryo No.	Optimizasyon Algoritması	Optimum Değer	Önerilen Dizayn Parametreleri
First Order Hybrid Rational	110<x1<290, 4<x2<20, 70<x3<240, 6<x4<19.2, 150<x5<390, 7.6<x6<19.6, 50<x7<250	1	DE	20.5524	x1=110, x2=20, x3=177.477, x4=6, x5=173.097, x6=19.6, x7=69.3699
			SA	20.5524	
			RS	20.5524	
			NM	20.5524	
	110<x1<290, 4<x2<20, 70<x3<240, 6<x4<19.2, 150<x5<390, 7.6<x6<19.6, 50<x7<250, σ_1 Alumina<300, σ Bakır<70, x7=250	2	DE	131.106	x1=110, x2=12.2019, x3=194.041, x4=6, x5=185.305, x6=19.6, x7=250
			SA	131.106	
			RS	131.106	
			NM	131.106	
	x1=110, x1=200, x1=290, x2=4, x2=12, x2=20, x=70, x3=150, x3=240, x=6, x4=12.6, x4=19.2, x5=150, x5=270, x5=390, x6=7.6, x6=13.6, x6=19.6, x7=50, x7=150, x7=250, σ_1 Alumina<300, σ Bakır<70	3	DE	30.9379	x1=110, x2=20, x3=150, x4=12.6, x5=150, x6=19.6, x7=50
			SA	30.9379	
			RS	30.9379	
			NM	30.9379	

Şekil 5.10 Dairesel kesitli n tipi dirsek optimizasyon sonuçları

5.3.3 Dikdörtgen Kesitli p Tipi Dirsek Optimizasyon Sonuçları

Şekil 5.11'de dikdörtgen kesitli p tipi dirsek için optimizasyon sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde;

1. senaryo için DE ve SA algoritmalarında 1,78908 MPa sonucu bulunmuştur. RS algoritması için 2,00372 MPa bulunurken NM algoritması için 12,2942 MPa bulunmuştur. Bu farklı sonuçlar içerisinden çalışmaya ve mühendislik sınırlarına uygun sonuç seçilebilir. Yani bakır gerçek değerinde alınmak üzere RS algoritmasını göz önüne alırsak, p tipi dirseğin en düşük gerilme değeri 2,00372 MPa'dır ve bu

girdi parametreleri için TEM'in sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için p tipi dirseğin mukavemet sınırının 2,00372 MPa'nın altına düşmeyecek şekilde üretilmesi gerekmektedir.

2. Senaryo için DE ve NM algoritmalarında 181,538 MPa sonucu bulunurken SA ve RS algoritmaları için 213,013 MPa bulunmuştur. Bu farklı sonuçlar içerisinde çalışmaya ve mühendislik sınırlarına uygun sonuç seçilebilir. Bu durumda DE ve NM algoritmalarını göz önüne alırsak, bakır malzeme akma sınırına ulaşmadan ve alümina malzeme hasara uğramadan 250⁰C sıcaklıkta 181,538 MPa gerilme değerine kadar termoelektrik modül sağlıklı bir şekilde çalışabilecektir. Bir başka ifadeyle, bakır gerçek değerinde alındığında, 250⁰C sıcaklık farkı için TEM'in hasara uğramadan çalışabilmesi için p tipi dirseğin mukavemet sınırı 181,538 MPa olacak şekilde üretilmesi gerekmektedir.

3. Senaryo için sonuçlar incelendiğinde tüm optimizasyon algoritmaları için 4,93657 MPa değeri bulunmuştur. Yani bakır malzeme akma sınırına ulaşmadan ve alümina malzeme hasara uğramadan belirlenen girdi parametreleri değerleri seçilerek p tipi dirseğin minimum Von mises gerilmesi 4,93657 MPa bulunmuştur. TEM'in belirlenen değerlerde sağlıklı çalışabilmesi için p tipi dirseğin mukavemet sınırı 4,93657 MPa'nın altına düşmeyecek şekilde üretilmesi gerekmektedir.

Objective Function/Amaç Fonksiyonu	Constraints/Kısıtlamalar	Senaryo No.	Optimizasyon Algoritması	Optimum Değer	Önerilen Dizayn Parametreleri
Second Order	110<x1<290, 4<x2<20, 70<x3<240, 6<x4<19.2,	1	DE	1.78908	x1=110, x2=20, x3=116.14, x4=19.2, x5=150, x6=19.6, x7=50
Logarithmic Non-Linear	150<x5<390, 7.6<x6<19.6, 50<x7<250		SA	1.78908	
			RS	2.00372	x1=290, x2=20, x3=117.632, x4=19.2, x5=150, x6=19.6, x7=50
			NM	12.2942	x1=110, x2=4, x3=132.308, x4=13.8539, x5=150, x6=19.6, x7=50
	110<x1<290, 4<x2<20, 70<x3<240, 6<x4<19.2,	2	DE	181.538	x1=110, x2=4, x3=70, x4=6.66498, x5=390, x6=13.0816, x7=250
	150<x5<390, 7.6<x6<19.6, 50<x7<250,		SA	213.013	x1=110, x2=20, x3=70, x4=15.8332, x5=289.989, x6=19.1929, x7=250
	$\sigma_{Alumina}<300$, $\sigma_{Bakır}<70$, $x7=250$		RS	213.013	
			NM	181.538	
	x1=110, x1=200, x1=290, x2=4, x2=12, x2=20, x=70,	3	DE	4.93657	x1=290, x2=20, x3=150, x4=19.2, x5=150, x6=19.6, x7=50
	x3=150, x3=240, x=6, x4=12.6, x4=19.2, x5=150,		SA	4.93657	
	x5=270, x5=390, x6=7.6, x6=13.6, x6=19.6, x7=50,		RS	4.93657	
	x7=150, x7=250, $\sigma_{Alumina}<300$, $\sigma_{Bakır}<70$		NM	4.93657	

Şekil 5.11 Dikdörtgen kesitli p tipi dirsek optimizasyon sonuçları

5.3.3 Dairesel Kesitli p Tipi Dirsek Optimizasyon Sonuçları

Şekil 5.12’de dairesel kesitli p tipi dirsek için optimizasyon sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde;

1. senaryo için tüm optimizasyon algoritmalarında 4,78807 MPa değeri bulunmuş ve bu sonuç için önerilen girdi parametreleri verilmiştir. Yani bakır gerçek değerinde alınmak üzere, p tipi dirseğin en düşük gerilme değeri 4,78807 MPa’dır ve bu girdi parametreleri için TEM’in sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için p tipi dirseğin mukavemet sınırının 4,78807 MPa’nın altına düşmeyecek şekilde üretilmesi gerekmektedir.

2. Senaryo için tüm optimizasyon algoritmalarında 116,821 MPa değeri bulunmuştur. Bu durumda, bakır malzeme akma sınırına ulaşmadan ve alümina malzeme hasara uğramadan 250⁰C sıcaklıkta 116,821 MPa gerilme değerine kadar termoelektrik modül sağlıklı bir şekilde çalışabilecektir. Bir başka ifadeyle, bakır gerçek değerinde alındığında, 250⁰C sıcaklık farkı için TEM’in hasara uğramadan çalışabilmesi için p tipi dirseğin mukavemet sınırı 116,821 MPa olacak şekilde üretilmesi gerekmektedir.

3. Senaryo için tüm optimizasyon algoritmalarında 5,63931 MPa değeri bulunmuştur. Yani bakır malzeme akma sınırına ulaşmadan ve alümina malzeme hasara uğramadan belirlenen girdi parametreleri değerleri seçilerek p tipi dirseğin minimum Von mises gerilmesi 5,63931 MPa bulunmuştur. TEM'in belirlenen değerlerde sağlıklı çalışabilmesi için p tipi dirseğin mukavemet sınırı 5,63931 MPa'nın altına düşmeyecek şekilde üretilmesi gerekmektedir.

Objective Function/Amaç Fonksiyonu	Constraints/Kısıtlamalar	Senaryo No.	Optimizasyon Algoritması	Optimum Değer	Önerilen Dizayn Parametreleri
Second Order Logarithmic Non-Linear Rational	110<x1<290, 4<x2<20, 70<x3<240, 6<x4<19.2, 150<x5<390, 7.6<x6<19.6, 50<x7<250	1	DE	4.78807	x1=290, x2=5.7016, x3=70, x4=19.2, x5=150, x6=19.6, x7=50
			SA	4.78807	
			RS	4.78807	
			NM	4.78807	
	110<x1<290, 4<x2<20, 70<x3<240, 6<x4<19.2, 150<x5<390, 7.6<x6<19.6, 50<x7<250, $\sigma_{Alumina}<300$, $\sigma_{Bakır}<70$, x7=250	2	DE	116.821	x1=110, x2=19.2376, x3=70, x4=14.8484, x5=259.396, x6=19.6, x7=250
			SA	116.821	
			RS	116.821	
			NM	116.821	
	x1=110, x1=200, x1=290, x2=4, x2=12, x2=20, x3 =70, x3=150, x3=240, x4=6, x4=12.6, x4=19.2, x5=150, x5=270, x5=390, x6=7.6, x6=13.6, x6=19.6, x7=50, x7=150, x7=250, $\sigma_{Alumina}<300$, $\sigma_{Bakır}<70$	3	DE	5.63931	x1=290, x2=4, x3=70, x4=19.2, x5=150, x6=19.6, x7=50
			SA	5.63931	
			RS	5.63931	
			NM	5.63931	

Şekil 5.12 Dairesel kesitli p tipi dirsek optimizasyon sonuçları

Optimizasyon tablolarında genel senaryolar için sonuçlar verilmiştir. Ancak bu senaryolar dışında amaç fonksiyonları farklı kısıtlar getirilerek optimize edilebilir.

Amaç fonksiyonları ne işe yarar? Bunu bir örnekle açıklayacağız. Yapılan çalışmamızda incelenen sınırlar içerisinde aşağıdaki örnek soruya benzer tüm soruların cevabı amaç fonksiyonları yardımıyla bulunabilir:

Örnek soru: alümina ve bakır kullanarak üreteceğimiz dikdörtgen kesitli aynı geometrideki bir TEM' i $\Delta T = 120$ °C de kullanmak istiyoruz. Bu durumda p ve n tipi dirseklerinin özellikleri; $E_p=70$ GPa, $E_n=120$ GPa, $\alpha_p=14 \times 10^{-6}$ 1/°C, $\alpha_n=10 \times 10^{-6}$ 1/°C. Akma sınırları ise $S_{akma-p} = 110$ MPa, $S_{akma-n} = 150$ MPa şeklinde ölçülmüştür. Kopma mukavemetleri ise $S_{kopma-p} = 200$ MPa, $S_{kopma-n} = 230$ MPa olacak şekilde bir imalat yapılmıştır. Bu TEM, $\Delta T = 120$ °C de kullanılabilir mi?

Cevap: n tipi dirsek için second order logarithmic non-linear rational ve p tipi dirsek için second order logarithmic non-linear amaç fonksiyonu olarak bulunmuştur. n ve p tipindeki maksimum von-mises gerilmeleri sırasıyla 228,703 MPa, 199,055 MPa elde edilmiştir. Dirseklerin akma mukavemetleri bu değerlerin altındadır. Ancak kopma muakevmetleri bu değerlerin üstündedir. Akma esas alınırsa bu TEM bu sıcaklık farkında kullanılamaz. Fakat akma olmasına rağmen kopma olmuyorsa elektriksel verimlilikte bir düşüş p ve n tipi dirsekler içinde yaşanmadığı gözlemlenmiştir. Bu bakış açısından düşünürsek bu TEM bu sıcaklıkta kullanılabilir.



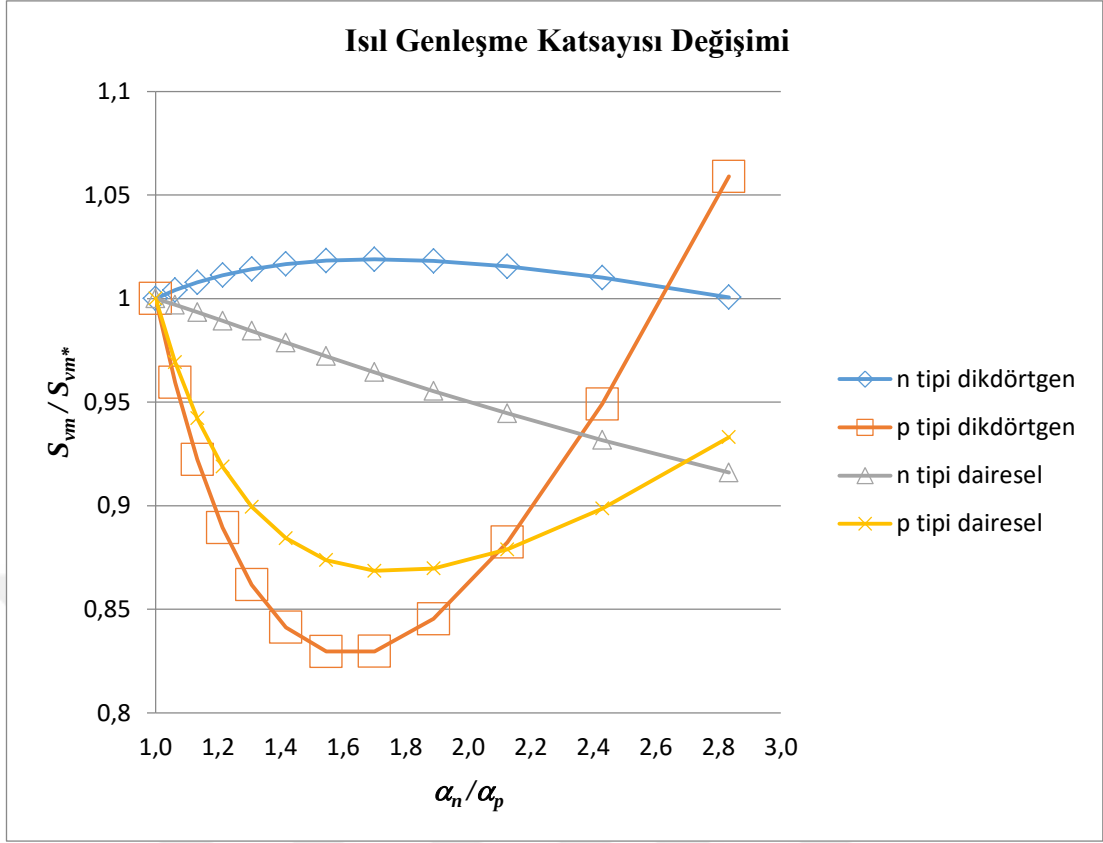
BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Bu çalışmada termoelektrik jeneratörün mekanik verimliliği üzerinde farklı parametrelerin etkileri sonlu elemanlar analizleri ve regresyon analizleri ile belirlenmiştir. Isıl genleşme katsayıları, Elastiklik modülleri, sıcaklık etkisi ve dirsek kesitlerinin geometrik farklılıkları değişken parametreler olarak belirlenmiştir. Daha sonra dirseklerde oluşan gerilmeler tespit edilmiş ve Mathematica programı ile optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Isıl genleşme katsayısı ve elastiklik modülü malzeme özellikleri arasından seçilen girdi parametreleridir. Bu girdi parametrelerinin etkilerini daha iyi gözlemlemek için bazı oransal grafikler oluşturulmuştur. Termoelektrik modülde alümina ve bakır gerçek malzeme özelliklerinde alınmış ve dirsekler bakır malzeme seçilerek sistemde oluşabilecek 50 °C sıcaklık farkı için gerilme durumu elde edilmiştir. Bu gerilme hali için bulunan Von-Mises gerilmeleri S_{vm}^* ile sembolize edilmiştir. Dikdörtgen kesit için S_{vm}^* değeri her bir dirsekte 138,053 MPa, dairesel kesit için ise 84,2895 MPa bulunmuştur. Daha sonra n tipi ve p tipi dirseklerin Isıl genleşme katsayıları arasındaki farkın, dirseklerde oluşan gerilmeleri nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu amaçla dirseklerin özellikleri bakırla yine aynı alınmış, sadece α_p değeri değiştirilmiş ve analizler tekrarlanmıştır. Dirseklerde oluşan gerilmeler ise S_{vm}^* değerine oranlanmıştır (S_{vm}/S_{vm}^*). Aynı analizler ve oransal grafikler dirseklerin elastiklik modülü için de yapılmıştır. Dirseklerin elastiklik modülleri arasındaki farkın dirseklerde oluşan gerilmeleri nasıl etkilediği incelenmiştir. Dirseklerin özellikleri bakırla aynı alınarak sadece E_p değeri değiştirilmiştir. Dirseklerde oluşan gerilmeler S_{vm}^* değerine oranlanmıştır.

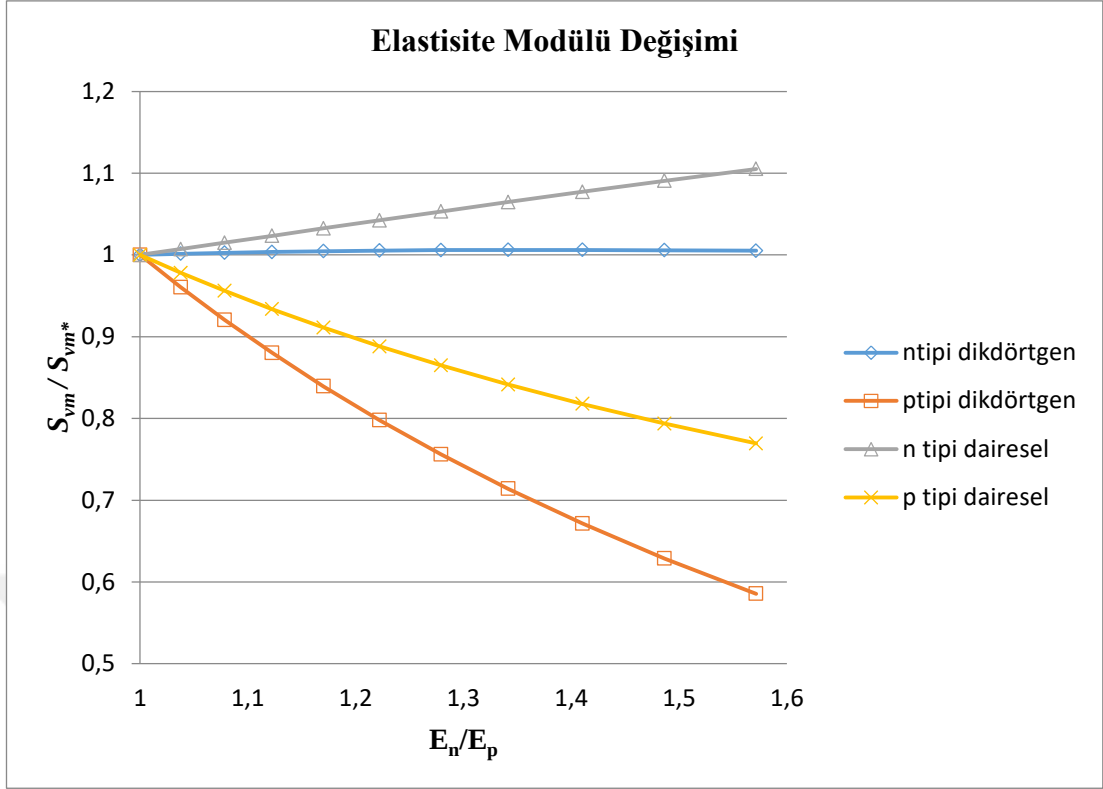
Şekil 6.1’de dirseklerin ısı genleşme katsayılarının oranının, dirseklerde oluşan gerilmelere etkisi gösterilmiştir. Şekil 6.2’de dirseklerin Elastiklik modüllerinin oranının, dirseklerde oluşan gerilmelere etkisi gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Isıl genleşme katsayısı değişiminin gerilmelere etkisi

Şekil 6.1'deki grafikler incelendiğinde, α_n / α_p oranının 1'den uzaklaşması, başka bir ifadeyle p ve n tipi dirseklerin α değerleri farkının artması ile S_{vm} gerilmeleri her iki dirsekte S_{vm}^* değerinden uzaklaşmakta, dolayısıyla S_{vm} / S_{vm}^* değeri 1'den farklı değerler almaktadır. n tipi dikdörtgen kestili dirsekte S_{vm} değerlerinin S_{vm}^* 'a göre çok az bir artış gösterdiği görülmektedir. p tipi dikdörtgen kesitli dirsekte S_{vm} değerleri S_{vm}^* 'a göre ilk başta azalmasına rağmen daha sonra bir miktar artış gösterdiği görülmektedir. Diğer dirseklerde S_{vm} 'in daha düşük değerler aldığını görmekteyiz.

Şekil 6.2'deki grafikler ise E_n / E_p değerinin 1'den farklı değerler alması, yani p ve n dirseklerinin E değerlerinin birbirlerinden uzaklaşmasının, S_{vm} değerlerinin S_{vm}^* 'a göre n tipi dirsek için dikdörtgen kesitte aynı kalmasına, dairesel kesitli dirsekte artışa; p tipi dirsek için ise hem dikdörtgen hem dairesel kesitte azalmaya sebep olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.2 Elastiklik modüllerinin değişiminin gerilmelere etkisi

Yapılan optimizasyon çalışmalarında üç ana senaryo üzerinde durulmuştur. Bu senaryolar literatürde yapılan çalışmalarda genel olarak kullanılan temel senaryolardır. Ancak yapılan regresyon analizleri sonucu elde edilen amaç fonksiyonları kullanılarak çok çeşitli kısıtlamalar getirilerek kullanım alanına uygun optimizasyon çalışmaları yapılabilmektedir. Gerilmeler açısından minimum değerler bulunabildiği gibi aynı zamanda maksimum değerler üzerine de optimizasyon çalışmaları yapılabilmektedir.

Tablo 6.1’de farklı optimizasyon senaryoları için kısıtlamalar ve bulunan gerilme değerleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, 1. ve 2. Senaryoda alümina malzeme gerçek değerlerinde alınıp hasara uğradığı anda ki minimum gerilme değerleri incelenmiştir. 1. Senaryoda bakır akma sınırının altında incelenirken 2. Senaryoda kopma sınırının altında incelenmiştir. 1. Senaryoda dikdörtgen kesitli p tipi dirsek dışında tüm gerilmeler 2. Senaryoya göre daha yüksek çıkmıştır.

3. ve 4. Senaryolarda alümina gerçek değerlerinde alınmış ve kopma mukavemetinin altında incelenmiştir. 3. Senaryoda bakırın akmaya uğradığı andaki

minimum gerilme değeri incelenirken 4. Senaryoda kopma sınırının altında incelenmiştir. Dikdörtgen kesit n tipi dirsek için aynı gerilme sonuçları bulunurken p tipi dirsek için 4. Senaryoda daha düşük bir gerilme değeri bulunmuştur. Dairesel kesitli dirsekler için gerilme değerleri birbirine çok yakındır.

5., 6. ve 7. Senaryolarda alümina gerçek değerlerinde alınmış ve kopma mukavemetinin altında incelenmiş, farklı sıcaklık değerleri için bakırın akmaya uğradığı anda dirseklerdeki minimum gerilme değerleri bulunmuştur. Sıcaklık farkıyla orantılı olarak dirseklerde ki gerilme değerlerinin arttığı görülmüştür.

8., 9. Ve 10. Senaryolarda alümina gerçek değerlerinde alınmış, ve bakır ile birlikte kopma mukavemetinin altında incelenmiştir. Farklı sıcaklık değerleri için dirseklerdeki minimum gerilme değerleri bulunmuştur. Sıcaklık farkıyla orantılı olarak dirseklerdeki gerilme değerlerinin arttığı görülmüştür. Bakırın akmaya uğradığı anda ki gerilme değerleri ile karşılaştırıldığında (5., 6. Ve 7. senaryolar) daha düşük gerilmeler bulunmuştur.

11. Senaryoda alümina ve bakır kopma mukavemetinin altında incelenmiştir. Bu senaryoda sıcaklık farkı dışında ki tüm girdi parametreleri kısıtlanmadan serbest bırakılmıştır. Sıcaklık farkı, seçtiğimiz girdi parametresi aralığında en yüksek değer olan 250⁰C seçilmiştir. Böylelikle belirlenen en yüksek sıcaklık değerinde, bakır ve alümina malzeme hasara uğramadan dirseklerde oluşan minimum gerilme değerleri bulunmuştur. Bu koşullarda TEM'in sağlıklı çalışabilmesi için mukavemet sınırları dikdörtgen kesitli n ve p tipi dirsekte sırasıyla 236,459 MPa, 148,393 MPa'nın altında olmamalıdır. Dairesel kesitte ise mukavemet sınırları n ve p tip dirsekte sırasıyla 131,106 MPa, 116,404 MPa'nın altında olmamalıdır.

Tablo 6.1 Farklı optimizasyon senaryoları için kısıtlamalar ve dirseklerdeki minimum gerilme değerleri

Senaryo	Kısıtlamalar	Dikdörtgen kesit n-tipi Svm (MPa)	Dikdörtgen kesit p-tipi Svm (MPa)	Dairesel kesit n-tipi Svm (MPa)	Dairesel kesit p-tipi Svm (MPa)
1	$\sigma_{1Alumina}=300, \sigma_{Bakır}<70, x_5=300, x_6=8,1$	295,182	199,614	245,838	191,63
2	$\sigma_{1Alumina}=300, \sigma_{Bakır}<190, x_5=300, x_6=8,1$	259,022	269,456	230,456	171,387
3	$\sigma_{1Alumina}<300, \sigma_{Bakır}=70, x_5=300, x_6=8,1$	114,153	57,5906	72,8137	61,8912
4	$\sigma_{1Alumina}<300, \sigma_{Bakır}<190, x_5=300, x_6=8,1$	114,153	44,1249	72,5829	61,3992
5	$\sigma_{1Alumina}<300, \sigma_{Bakır}=70, x_5=300, x_6=8,1, x_7=50$	114,153	57,275	72,7517	61,9687
6	$\sigma_{1Alumina}<300, \sigma_{Bakır}=70, x_5=300, x_6=8,1, x_7=150$	226,002	129,985	146,404	135,603
7	$\sigma_{1Alumina}<300, \sigma_{Bakır}=70, x_5=300, x_6=8,1, x_7=250$	282,958	369,544	199,935	175,442
8	$\sigma_{1Alumina}<300, \sigma_{Bakır}<190, x_5=300, x_6=8,1, x_7=50$	114,153	44,3634	72,5829	61,3992
9	$\sigma_{1Alumina}<300, \sigma_{Bakır}<190, x_5=300, x_6=8,1, x_7=150$	226,002	117,295	144,843	130,078
10	$\sigma_{1Alumina}<300, \sigma_{Bakır}<190, x_5=300, x_6=8,1, x_7=250$	282,958	177,599	191,422	166,65
11	$\sigma_{1Alumina}<300, \sigma_{Bakır}<190, x_7=250$	236,459	148,393	131,106	116,404

Tablo 6.2’de farklı optimizasyon senaryoları için önerilen dizayn parametreleri verilmiştir. Tablo 6.1’de bulunan gerilme değerlerini sağlamak için üretilen termoelektrik modüllerde tablo 6.2’deki malzeme özellikleri kullanılmalıdır.

Tablo 6.2 Farklı optimizasyon senaryoları için önerilen dizayn parametreleri

Senaryo	Dikdörtgen kesit n tipi dizayn parametreleri	Dikdörtgen kesit p tipi dizayn parametreleri	Dairesel kesit n tipi dizayn parametreleri	Dairesel kesit p tipi dizayn parametreleri
1	$x_1=119,84, x_2=4,16231, x_3=70, x_4=19,2, x_5=300, x_6=8,1, x_7=234,175$	$x_1=110, x_2=8,74888, x_3=70, x_4=6,00027, x_5=300, x_6=8,1, x_7=206,647$	$x_1=178,381, x_2=4, x_3=150,222, x_4=6, x_5=300, x_6=8,1, x_7=250$	$x_1=188,63, x_2=19,9975, x_3=113,026, x_4=6,00749, x_5=300, x_6=8,1, x_7=249,287$
2	$x_1=110, x_2=5,5162, x_3=70, x_4=19,2, x_5=300, x_6=8,1, x_7=189,332$	$x_1=110, x_2=142112, x_3=70, x_4=142115, x_5=300, x_6=8,1, x_7=184,731$	$x_1=110, x_2=400005, x_3=129,403, x_4=19,2, x_5=300, x_6=8,1, x_7=249,999$	$x_1=182,611, x_2=20, x_3=70, x_4=6, x_5=300, x_6=8,1, x_7=250$
3	$x_1=110, x_2=9,08458, x_3=70, x_4=6, x_5=300, x_6=8,1, x_7=50$	$x_1=139,671, x_2=4, x_3=70, x_4=9,18712, x_5=300, x_6=8,1, x_7=50$	$x_1=110, x_2=17,3678, x_3=169,214, x_4=6, x_5=300, x_6=8,1, x_7=50$	$x_1=110, x_2=423486, x_3=70, x_4=8,66172, x_5=300, x_6=8,1, x_7=50$
4	$x_1=110, x_2=9,08458, x_3=70, x_4=6, x_5=300, x_6=8,1, x_7=50$	$x_1=289,891, x_2=4, x_3=70, x_4=8,65677, x_5=300, x_6=8,1, x_7=50$	$x_1=110, x_2=16,6149, x_3=182,665, x_4=6, x_5=300, x_6=8,1, x_7=50$	$x_1=110, x_2=6,44082, x_3=70, x_4=10,2468, x_5=300, x_6=8,1, x_7=50$

Tablo 6.2 Devamı

Senaryo	Dikdörtgen kesit n tipi dizayn parametreleri	Dikdörtgen kesit p tipi dizayn parametreleri	Dairesel kesit n tipi dizayn parametreleri	Dairesel kesit p tipi dizayn parametreleri
5	x1=110, x2=9, 08458, x3=70, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =50	x1=138, 394, x2=4, x3=70, x4=9,20882, x5=300, x6=8,1, x7 =50	x1=110, x2=17, 2507, x3=170969, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =50	x1=110, x2=408613, x3=70, x4=8, 55269, x5=300, x6=8,1, x7 =50
6	x1=110, x2=6, 05816, x3=70, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =150	x1=133, 208, x2=4, x3=70, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =150	x1=110, x2=11, 7208, x3=149, 569, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =150	x1=110, x2=15, 4627, x3=70, x4=11, 6243, x5=300, x6=8,1, x7 =150
7	x1=110, x2=47357, x3=70, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =250	x1=172, 338, x2=4, x3=70, x4=148993, x5=300, x6=8,1, x7 =250	x1=110, x2=10, 5594, x3=240, , x4=13, 7208, x5=300, x6=8,1, x7 =250	x1=110, x2=18, 4671, x3=70, x4=11, 1969, x5=300, x6=8,1, x7 =250
8	x1=110, x2=9, 08458, x3=70, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =50	x1=110, x2=4, x3=70, x4=8, 74803, x5=300, x6=8,1, x7 =50	x1=110, x2=16, 6149, x3=182, 665, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =50	x1=110, x2=6, 44082, x3=70, x4=10, 2468, x5=300, x6=8,1, x7 =50
9	x1=110, x2=6, 05816, x3=70, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =150	x1=110, x2=4, x3=70, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =150	x1=110, x2=11, 4718, x3=198, 588, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =150	x1=110, x2=20, , x3=70, x4=8, 37588, x5=300, x6=8,1, x7 =150
10	x1=110, x2=47357, x3=70, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =250	x1=110126, x2=401775, x3=700297, x4=6, 00286, x5=300, x6=8,1, x7 =250	x1=110, x2=9, 50848, x3=230, 554, x4=6, x5=300, x6=8,1, x7 =250	x1=110, x2=20, , x3=70, x4=7, 42546, x5=300, x6=8,1, x7 =250
11	x1=110, x2=9, 33894, x3=70, x4=6, x5=150, x6=19, 6, x7 =250	x1=290, , x2=4, x3=70, x4=7, 64981, x5=248, 962, x6=19, 6, x7 =250	x1=110, x2=12, 2019, x3=194041, x4=6, x5=185, 305, x6=19, 6, x7 =250	x1=110, x2=20, , x3=70, x4=15, 4998, x5=221, 869, x6=19, 6, x7 =250

BÖLÜM YEDİ

DEĞERLENDİRMELER VE YARGILAR

Bu çalışmanın sonucunda daha yüksek sıcaklıklar için dirseklerde oluşan gerilmelerin arttığı; dairesel kesitli dirseklerde oluşan gerilmelerin genel olarak dikdörtgensel kesitli dirseklere göre daha düşük olduğu ve dolayısıyla daha emniyetli durumlar arz ettiği görülmüştür. En yüksek gerilme değerleri özellikle dikdörtgensel kesitli dirseklerin keskin köşelerinde bulunmuştur. Yüksek sıcaklık farklarında elektrik üretim verimliliği daha yüksek olduğundan bu sıcaklıklar hedeflenir, ancak ısı gerilmelerin de bir taraftan artması, sıcaklık artışını engelleyici en önemli faktördür. Regresyon analizi sonucu bulunan amaç fonksiyonları sayesinde incelenen sınırlar içerisindeki herhangi bir çalışma koşulunda uygun ve verimli çalışan termoelektrik jeneratörlerin tasarlanabileceği ve üretilebileceği görülmüştür.

Bir sistemde iki malzeme olması halinde E ve α değerlerin birbirine ne kadar yakın olursa malzemelerin aynı oranda genleşme meyli artacak, malzemeler birbirlerini daha az seviyede etkileyecek ve ısı gerilmeleri o oranda düşük olacaktır. Fakat TEM sisteminde p ve n tipi dirsekler haricinde alümina levhalar ve bakır bağlantılar da mevcuttur. Bu sebeple incelediğimiz TEM sisteminde sadece p ve n tipi dirseklerin değil, sistemdeki bu dört farklı malzemenin genleşme eğilimleri arasındaki fark aslında gerilmelerin bütünsel nedenidir. Şekil 6.1 ve 6.2 deki grafikler bize göstermişti ki, p ve n dirseklerinin E ve α değerleri arasındaki fark artsa bile, alümina ve bakır malzemelerin özelliklerine yakınlaşılma sözkonusu da olabildiğinden S_{vm} gerilmeleri S_{vm}^* gerilmelerine göre daha düşük seviyelerde çıkabilmektedir. Bu sebeple dirsekler arasındaki özellik farklarının artması ile gerilmeler artacağını söylemek tam olarak mümkün değildir. Hatta gerilmeleri düşürücü rol oynadığını söylememiz mümkündür.

Bu çalışmanın sonuçları çok farklı şekillerde değerlendirilebilir. En başta belirlenen girdi parametreleri çeşitlendirilebilir veya tanımlanan faktör seviye aralıkları arttırılabilir. Çalışmada kullanılan D-optimal tasarım yerine farklı tasarım teknikleri kullanılabilir. Tam faktöriyel tasarım seçilerek yaklaşık çözüm yerine çok

küçük hata paylarıyla gerçek çözümler elde edilebilir ve böylece yapılan regresyon ve optimizasyon çalışmaları gerçek üretim yapılan firmalarca kullanılabilir. Yapılan dikdörtgensel ve dairesel kesit çalışması daha farklı geometrik kesitlere uygulanabilir. Dikdörtgensel kesitlerin keskin köşelerinde oluşan tekillik noktaları belirli radyuslar yapılarak azaltılabilir ve böylece daha düşük seviyede gerilme değerleri elde edilebilir. Radyus çapları girdi parametresi olarak seçilerek farklı bir regresyon analizi ve optimizasyon çalışması seçilebilir. Böylelikle bu çalışmanın ilerletilmesiyle veya şartlara uygun benzer çalışmalar yapılmasıyla elde edilecek amaç fonksiyonları üretim firmalarında kullanılarak istenilen çalışma koşullarında verimli bir şekilde çalışabilecek termoelektrik jeneratörler tasarlanabilir ve üretilebilir.

KAYNAKLAR

- Abid, M., Somdalen, R. ve Rodrigo, M. S. (2018). design optimization of a thermoelectric cooling module using finite element simulations. *Journal of Electronic Materials*, 47(8), 4845–4854.
- Akçair M, Savran M, Aydın L, Ayakdaş O, Öztürk S, Küçükdoğan N. (2019). Optimum design of anti-buckling behavior of graphite/epoxy laminated composites by differential evolution and simulated annealing method. *Journal of Research on Engineering Structures and Materials.*, 5(2), 175-188.
- Aydın, L., Artem, H. S. ve Oterkus, S. (2020). *Designing Engineering Structures Using Stochastic Optimization Methods*. Florida: CRC Press.
- Aydın, L. ve Artem, H. S. (2011). Comparison of stochastic search optimization algorithms for the laminated composites under mechanical and hygrothermal loadings. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(14), 1197–1212.
- Aydın, L. ve Savran, M. (2019). Geliştirilmiş benzetilmiş tavlama algoritması kullanılarak minimum fiyat, minimum ağırlık ve maksimum doğal frekans açısından hibrit grafit-keten/epoksi tabakalı kompozitlerin optimum tasarımı. *Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik*, 21(63), 833–844.
- Baday, Ç. (2014). *Optimization of peltier elements in terms of mechanical behaviours and developing new peltier materials*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Baday, C., Yurddaskal, M., Ozgul, M., Zor, M. ve Celik, E. (2017). Production, characterization and optimization of thermoelectric module and investigation of doping effects on thermoelectric performances. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(23), 17468–17481.

- Belovski, I. R., Aleksandrova, I. S. ve Aleksandrov, A. T. (2019). Regression models of a thermoelectric cooling system based on multi-stage peltier module. *2019 28th International Scientific Conference Electronics, ET 2019 - Proceedings*, V(L), Bulgaristan, 48–52.
- Heghmans, A. ve Beitelschmidt, M. (2015). Parameter optimization of thermoelectric modules using a genetic algorithm. *Applied Energy*, 155, 447–454.
- Hori, Y., Kusano, D., Ito, T. ve Izumi, K. (1999). Analysis on thermo-mechanical stress of thermoelectric module. *International Conference on Thermoelectrics, ICT, Proceedings*, (1999), 328–331.
- Karri, N. K. ve Mo, C. (2018). Structural reliability evaluation of thermoelectric generator modules: influence of end conditions, leg geometry, metallization, and processing temperatures. *Journal of Electronic Materials*, 47(10), 6101–6120.
- Li, S. L., Liu, C. K., Hsu, C. Y., Hsieh, M. C., Dai, M. J. ve Wu, S. T. (2010). Thermo-mechanical analysis of thermoelectric modules. *International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference, IMPACT 2010 and International 3D IC Conference, Proceedings*, Tayvan, 1–4.
- Luo, D., Wang, R., Yu, W. ve Zhou, W. (2020). Parametric study of a thermoelectric module used for both power generation and cooling. *Renewable Energy*, 154, 542–552.
- Miao, Z., Meng, X., Zhou, S. ve Zhu, M. (2020). Thermo-mechanical analysis on thermoelectric legs arrangement of thermoelectric modules. *Renewable Energy*, 147, 2272–2278.
- Ozturk, S., Aydin, L. ve Celik, E. (2018). A comprehensive study on slicing processes optimization of silicon ingot for photovoltaic applications. *Solar Energy*, 161(December 2017), 109–124.

- Polatoğlu, İ., Aydın, L., Nevruz, B. Ç. ve Özer, S. (2020). A novel approach for the optimal design of a biosensor. *Analytical Letters*, 53(9), 1428–1445.
- Ring, T. A., Feeney, P., Boldridge, D., Kasthurirangan, J., Li, S. ve Dirksen, J. A. (2007). Brittle and ductile fracture mechanics analysis of surface damage caused during CMP. *Journal of The Electrochemical Society*, 154(3), H239.
- Sarhadi, A., Bjørk, R. ve Pryds, N. (2015). Optimization of the mechanical and electrical performance of a thermoelectric module. *Journal of Electronic Materials*, 44(11), 4465–4472.
- Savran, M. ve Aydın, L. (2018). Stochastic optimization of graphite-flax/epoxy hybrid laminated composite for maximum fundamental frequency and minimum cost. *Engineering Structures*, 174(August), 675–687.
- Wang, J., Li, Y., Zhao, C., Cai, Y., Zhu, L., Zhang, C., Cao, P. (2018). An optimization study of structural size of parameterized thermoelectric generator module on performance. *Energy Conversion and Management*, 160(October 2017), 176–181.

EKLER

Tablo A.1 Tüm dikdörtgen kesit analizler için bulunan von mises gerilme değerleri

Analiz No.	Alumina Svm (MPa)	Bakır Svm (MPa)	n-tipi Svm (MPa)	p-tipi Svm (MPa)
35	63,421	73,832	267,05	113,22
53	63,366	80,33	267,22	240,86
55	54,179	72,396	160,25	113,9
69	58,363	77,879	260,38	209,62
70	58,226	78,181	152,25	207
86	61,945	80,756	223,33	121,29
101	53,693	82,787	217,4	227,24
115	75,745	77,375	149,22	110,25
145	77,034	77,132	157,55	208,71
158	83,007	78,887	217,47	300,98
159	82,981	78,665	264,67	301
160	83,068	78,515	147,07	296,78
171	103,45	98,06	361,64	116,95
184	72,315	83,195	141,24	225,06
196	90,124	90,743	143,78	106,59
197	97,883	94,426	259,6	106,44
208	71,412	83,308	144,08	249,5
254	45,52	91,85	153,78	141,2
274	36,341	48,516	91,1	72,207
278	33,375	65,588	178,11	70,566
306	34,849	73,427	242,33	70,597
308	45,52	91,85	153,78	141,2
318	47,477	84,261	179,17	205,71
346	50,179	90,993	98,244	156,82
350	58,898	90,344	187,11	155,02
352	50,068	74,263	130,27	79,516
354	52,31	82,235	178,59	79,483
366	45,207	64,936	166,33	127,42
378	52,611	82,73	251,93	153,72
407	56,377	84,466	170,23	93,372
435	62,987	80,673	178,53	80,79
442	61,547	73,653	131,36	133,35
480	72,562	80,15	177,22	213,49
481	60,042	75,04	96,247	208,38
501	41,351	73,445	69,469	105,82
513	50,657	95,442	137,43	143,48
514	43,006	76,823	106,99	38,35
533	44,534	98,869	151,7	66,233

Tablo A.1 Devamı

534	46,594	92,856	192,74	66,281
547	36,2	24,76	67,301	47,39
589	61,076	95,133	54,524	148,89
594	69,335	88,413	148,17	149,64
630	52,634	40,955	139,91	51,969
637	53,535	26,971	73,296	74,24
649	71,705	79,435	115,73	72,103
651	92,144	90,166	200,4	70,978
662	73,843	80,496	89,366	116,98
686	84,208	86,355	162,17	82,167
692	74,25	43,896	109,8	77,561
699	71,138	52,842	92,703	89,319
704	83,564	89,597	162,49	50,079
725	76,098	49,425	85,638	121,53
734	100,55	70,563	499,69	216,41
750	78,552	70,671	366,77	389,45
753	102,45	77,929	586,94	381,32
761	104,37	70,493	492,19	241,1
770	106,31	70,493	491,1	440,98
773	172,08	73,032	670,92	432,53
776	107,75	70,665	338,38	560,66
788	145,94	70,633	484,82	279,87
792	178,65	74,601	812,17	275,37
793	161,07	74,447	271,47	558,92
816	113,97	75,206	582,7	203,91
837	196,13	72,568	811,43	377,62
856	120,22	72,53	252,08	554,27
857	120,5	72,704	345,13	556,75
872	205,05	72,611	647,55	265,92
875	186,58	77,162	340,63	549,12
877	191,4	71,686	266,96	535,12
902	99,877	70,497	353,95	353,16
906	119,95	78,684	580,74	345,43
908	208,13	72,262	659,42	338,58
916	202,11	72,381	360,85	382,21
922	127,99	70,543	263,65	230,9
935	213,29	76,939	642,2	408
953	219,94	75,106	633,1	257,91
957	199,09	79,686	366,29	537,27
959	205,47	71,822	463,49	520,92
961	212,07	74,023	345,4	505,72

Tablo A.1 Devamı

979	113,4	91,103	286,7	227,51
993	95,66	88,545	328,03	299,49
1025	109,46	79,803	527,21	380,19
1037	126,29	85,028	307,58	415,69
1068	141,16	85,353	428,5	285,24
1071	153,27	97,298	706,21	282,85
1079	159,2	100,43	553,19	304,19
1081	143,47	78,124	246,13	200,61
1102	128,95	81,977	215,87	409,34
1107	142,37	95,274	694,81	395,96
1165	152,98	72,205	215,58	199,16
1171	173,97	80,601	248,48	356,25
1184	159,35	85,423	378,59	418,78
1201	166,79	98,342	239,56	424,32
1202	170,91	98,331	369,43	424,59
1208	188,72	102,48	311,36	609,42
1228	122,09	87,097	133,48	278,3
1241	144,81	85,594	290,43	345,69
1255	110,81	91,091	158,13	176,12
1257	114,66	91,809	210,43	176,18
1267	131,12	95,326	196,2	205,14
1273	124,22	86,286	187,57	136,31
1287	113,91	87,431	388,89	207,25
1296	115,98	87,694	389,18	298,63
1326	182,85	98,05	411,47	134,5
1330	166,38	97,749	214,77	148,18
1335	184,11	88,48	411,92	210,65
1338	167,08	88,801	229,73	206,15
1352	192,58	92,503	361,05	148,77
1366	160,24	81,385	222,25	224,74
1373	181,62	88,771	214,92	337,63
1377	166,27	90,813	416,5	325,64
1393	229,1	93,958	218,06	284,71
1403	237,21	99,453	335,39	336,49
1405	214,33	105,51	264,13	177,24
1409	205,32	83,343	238,93	142,75
1435	212,22	91,14	218,87	158,27
1444	216,26	96,803	217,48	243,45
1470	94,873	72,528	444,01	422,91
1474	200,88	98,666	491,78	404,13
1477	94,567	72,117	295,78	481,93

Tablo A.1 Devamı

1503	208,67	83,164	1053,2	559,68
1507	127,7	73,722	339,93	711,95
1527	205,12	76,125	721,09	754,25
1532	198,78	78,6	399,34	968,56
1538	215,18	75,555	882,97	929,93
1554	131,54	75,688	752,76	416,2
1562	134,86	76,53	645,17	473,89
1567	136,38	77,714	304,41	298,4
1570	135,22	83,259	328,39	289,81
1576	137,64	81,866	306,2	583,46
1610	236,51	75,794	857,65	711,34
1612	212,55	100,13	321,3	949,97
1619	236,29	78,041	857,27	903,78
1648	161,44	75,735	302,43	295,62
1668	171,1	84,925	445,29	724,67
1674	233,64	78,091	1016,3	670,63
1683	244,1	79,637	996,99	352,57
1698	233,05	75,666	704,49	916,4
1701	245,75	79,836	994,41	888,41
1718	172,1	75,152	803,03	332,39
1739	167,67	74,686	379,03	445,22
1740	169,92	80,05	407,98	445,43
1757	177,69	74,82	381,88	314,05
1763	136,28	84,218	774,26	298,43
1788	206,69	75,109	557,09	258,54
1804	216,32	87,467	259,33	368,89
1816	200,36	75,426	418,88	260,49
1868	250,58	75,562	496,93	258,55
1869	250,84	77,019	567,13	258,71
1870	252,13	78,189	430,16	277,43
1883	256,09	92,122	377,58	378,1
1903	243,88	94,888	284,52	454,17
1907	250,8	74,307	792,67	438,94
1918	266,51	75,474	299,85	323,21
1940	254,86	77,64	468,52	842,21
1961	204,09	100,71	487,33	395,78
1964	186,76	98,919	500,5	456,66
1987	195,73	81,14	319,99	255,84
1995	184,84	84,079	337,12	316,34
2001	207,99	113,59	592,67	250,49
2054	270,01	83,187	477,29	174,73

Tablo A.1 Devamı

2069	268,97	90,644	511,24	278,27
2080	275,56	84,382	342,48	238,16
2084	268,34	91,405	310,31	247,43
2088	247,38	84,166	668,39	260,99
2094	273,89	87,874	369,03	372,99
2095	251,15	79,765	348,24	358,68
2101	267,65	88,517	271,72	541,33
2131	343,64	82,126	345,63	430,62
2136	335,17	91,583	510,48	188,2
2143	331,36	88,047	346,51	293,51
2148	324,11	101,17	369,84	287,81
2171	343,4	86,653	467,1	408,49
2176	313,87	79,195	362,78	385,37
2182	331,59	87,642	282,59	565,73
2187	317,92	85,999	687,38	549,57

Tablo A.2 Tüm dikdörtgen kesit analizler için bulunan asal gerilme değerleri

Analiz No.	Alumina S1(MPa)	Alumina S3(MPa)	n tipi dirsek S1(MPa)	n tipi dirsek S3(MPa)	p tipi dirsek S1(MPa)	p tipi dirsek S3(MPa)
35	-43,61	49,886	-92,889	267,24	-32,624	121,46
53	-43,588	49,905	-93,194	267,43	-60,561	253,47
55	-43,38	44,924	-25,327	167,15	-61,346	118,73
69	-42,597	47,033	-63,861	271,09	-82,93	215,89
70	-43,677	47,447	-65,764	157,04	-77,538	213,35
86	-47,581	59,515	-55,562	238,35	-19,826	131,47
101	-37,368	55,106	-38,219	231,81	-35,131	241,33
115	-61,556	67,723	-80,168	153,19	-34,995	118,22
145	-60,434	67,292	-23,173	163,98	-95,578	213,86
158	-61,005	70,007	-56,986	232,69	-99,189	298,2
159	-60,995	70,011	-69,606	275,33	-99,157	298,23
160	-61,523	70,445	-68,905	150,97	-90,908	294,26
171	-75,587	89,667	-114,78	348,45	-25,589	126,82
184	-58,882	69,8	-45,464	152	-36,156	239,61
196	-72,868	84,758	-80,688	147,06	-37,269	114,28
197	-74,359	87,466	-103,33	257,75	-38,197	114,12
208	-57,447	69,416	-22,75	156,4	-66,132	261,41
254	-27,775	55,438	-71,998	151,93	-70,896	143,5
274	-21,29	44,308	-44,524	98,435	-46,164	74,611
278	-19,157	40,85	-83,807	175,67	-47,157	72,904
306	-19,204	41,323	-103,58	233,2	-47,297	72,938
308	-27,775	55,438	-71,998	151,93	-70,896	143,5
318	-29,343	57,947	-101,73	170,45	-89,651	202,16
346	-34,784	60,685	-43,479	106,46	-52,123	162,58
350	-40,785	72,03	-85,62	183,95	-54,507	159,96
352	-34,807	60,197	-31,438	134,88	-32,168	85,597
354	-36,791	63,088	-89,782	177,42	-32,6	85,571
366	-31,423	55,127	-72,975	175,92	-51,81	139,73
378	-34,476	64,844	-108,33	241,88	-72,838	164,17
407	-44,969	66,85	-63,445	176,11	-21,231	101,02
435	-49,123	75,475	-83,744	180,06	-34,202	86,939
442	-45,268	73,748	-29,106	136,26	-50,699	146,07
480	-55,37	88,197	-87,684	178,9	-95,317	209,34
481	-42,638	73,355	-53,59	104,37	-98,487	204,56
501	-35,373	50,146	-70,853	68,632	-70,437	97,57
513	-38,714	61,991	-103,65	127,1	-111,73	130,12
514	-36,066	52,036	-63,283	106	-31,903	41,401
533	-41,273	54,062	-115,94	131,27	-64,691	69,104
534	-44,312	55,45	-158,29	151,91	-64,459	69,174

Tablo A.2 Devamı

547	-25,904	44,281	-69,87	46,206	-49,357	30,805
589	-63,983	73,846	-47,439	58,978	-104,94	132,13
594	-63,476	84,702	-111,81	138,45	-108,16	140,13
630	-40,963	64,931	-120,29	130,95	-54,11	36,296
637	-41,337	65,798	-76,057	52,149	-80,02	72,018
649	-80,978	82,598	-55,049	116,16	-25,344	73,81
651	-96,902	87,588	-141,42	174,81	-25,963	72,516
662	-79,672	88,433	-65,953	95,705	-63,448	115,39
686	-90,962	93,648	-107,52	149,67	-56,07	89,937
692	-58,959	90,294	-98,901	105,42	-64,992	84,63
699	-64,339	86,136	-85,672	96,286	-79,184	95,122
704	-90,217	99,284	-109,35	148,85	-52,083	44,918
725	-61,134	92,654	-73,876	91,18	-106,05	117,83
734	-69,582	84,177	-150,67	482,9	-51,573	217,3
750	-59,692	78,521	-69,885	343,1	-87,378	373,21
753	-69,26	88,793	-187,57	545,19	-97,075	366,77
761	-81,996	85,69	-156,95	477,6	-92,294	251,97
770	-72,443	81,662	-157,89	476,88	-138,16	441,01
773	-96,655	136,03	-248,27	606,78	-145,7	434,93
776	-71,628	93,952	-64,784	327,68	-173,66	528,37
788	-96,287	121,74	-163,08	472,38	-147,76	282,86
792	-97,335	138,6	-312,69	703,05	-138,41	279,22
793	-94,17	130,36	-57,004	270,56	-202,87	527,74
816	-78,95	103,93	-203,06	543,84	-57,793	209,16
837	-110,05	184,5	-320,04	692	-116,27	366,33
856	-82,631	113,69	-58,041	248,81	-187,87	524,44
857	-82,402	116,6	-71,838	335,12	-187,75	526,49
872	-110,17	189,34	-272,64	582,49	-148,94	269,09
875	-108,25	170,92	-78,667	331,21	-207,64	515,97
877	-108,09	174,85	-139,89	270,59	-214,86	506,34
902	-72,934	119,77	-67,594	343,35	-77,802	356,53
906	-83,069	127,16	-213,58	543,59	-87,943	350,01
908	-114,82	206,97	-271,34	585,12	-96,624	344,14
916	-116,63	202,23	-258,61	343,15	-121,16	370,91
922	-96,808	119,64	-139,47	272,23	-105,18	241,79
935	-114,93	210,9	-278,9	573,89	-166,49	416,58
953	-114,78	216,19	-284,77	567,84	-156,61	260,79
957	-113,14	194,96	-100,45	345,25	-216,44	504,21
959	-113,11	200,78	-188,03	457,65	-225,93	492,84
961	-115,94	210,45	-225,04	331,34	-234,02	481,97
979	-68,679	138,16	-246,68	284,87	-65,13	234,42

Tablo A.2 Devamı

993	-77,478	115,11	-139,45	317,14	-109,95	278,67
1025	-64,492	134,46	-250,94	490,85	-201,66	374,66
1037	-78,603	154,04	-126,05	293,48	-202,67	406,42
1068	-99,633	170,98	-212,35	407,68	-93,685	279,05
1071	-107,82	187,57	-321,52	619,93	-104,2	276,81
1079	-112,95	194,92	-261,14	508,8	-131,01	281,74
1081	-101,58	172,71	-76,266	247,26	-98,393	212,59
1102	-91,685	157,04	-142,1	224,07	-206,94	398,35
1107	-96,686	175,96	-329,05	612,7	-220,26	388,47
1165	-115,87	184,7	-149,9	227,85	-114,21	211,17
1171	-130,67	208,67	-74,695	250,35	-156,49	361,69
1184	-120,79	193,8	-191,75	374,86	-219,2	406,33
1201	-122,08	203,79	-160,07	242,08	-230,95	412,99
1202	-125,33	209,44	-201,47	367,82	-230,99	413,24
1208	-145,83	229,01	-104,86	294,58	-290,56	552,17
1228	-103	147,89	-133,09	138,96	-162,23	264,24
1241	-106,17	176,86	-254,61	271,96	-217,75	312,4
1255	-82,831	134,63	-139,87	164,42	-157,73	188,82
1257	-84,614	139,77	-223,78	192,31	-157,32	188,92
1267	-89,683	160,84	-203,76	143,01	-218,86	203,93
1273	-85,739	151,71	-146,7	196,31	-142	96,335
1287	-80,21	140,02	-328,8	356,63	-223,26	189,92
1296	-80,909	142,83	-328,82	356,87	-291,57	284,02
1326	-168,32	220,13	-234,43	367,56	-107,51	145,1
1330	-125,72	202,45	-222,91	159,5	-124,35	156
1335	-168,47	222,02	-234,91	367,45	-162,58	225,56
1338	-138,67	203,46	-244,09	227,91	-171,88	220,99
1352	-165,51	232,66	-204,98	337,12	-154,93	118,46
1366	-123,63	197,03	-230,6	154,47	-242,21	213,34
1373	-138,58	222,24	-209,46	221,42	-300,78	232,98
1377	-127,44	205,35	-346,23	385,1	-312,81	313,44
1393	-207,13	275,66	-226,41	181,74	-138,24	280,57
1403	-206,81	285,54	-285,73	320,18	-177,14	327,09
1405	-210,09	255,49	-121,08	265,98	-117,18	188,09
1409	-184,14	247,56	-210,87	244,79	-124,23	153,9
1435	-169,96	256,28	-173,34	229,84	-164,82	126,37
1444	-173,08	261,86	-174,85	228,25	-244,19	242,73
1470	-69,525	114,88	-116,88	401,61	-112,27	408,87
1474	-115,44	186,26	-373,89	443,22	-132,34	394,45
1477	-68,033	114,43	-74,254	280,13	-147,94	444,61
1503	-111,51	189,75	-442,38	854,45	-244,47	537,94

Tablo A.2 Devamı

1507	-89,418	107,71	-207,65	333,09	-307,23	645,12
1527	-109,93	186,68	-334,79	650,29	-325,83	661,93
1532	-109,72	179,6	-114,62	375,12	-391,73	802,8
1538	-111,73	197,04	-385,42	743,92	-405,84	780,15
1554	-90,347	161,88	-336,87	673,71	-135,66	405,43
1562	-92,601	166,16	-277,37	598,56	-176,06	440,74
1567	-98,77	166,21	-90,308	291,58	-167,76	304,84
1570	-98,931	139,89	-223,25	330,19	-167,16	297,47
1576	-95,195	168,44	-92,366	293,67	-241,23	555,52
1610	-114,83	235,29	-403,91	718,94	-346,82	627,52
1612	-133,08	210,89	-101,83	311,88	-409,01	783,9
1619	-115,72	235,15	-403,97	718,73	-426,67	755,88
1648	-120,05	195,57	-97,78	289,4	-166,47	302,05
1668	-127,18	209,32	-150,55	403,95	-327,11	656,41
1674	-154,8	241,49	-478,39	819,84	-344,33	619,12
1683	-153,41	260,76	-485,29	807,67	-263,08	340,04
1698	-151,29	242,21	-360,58	641,66	-430,56	760,79
1701	-154,62	250,31	-486,14	806,21	-440,09	743,24
1718	-113,8	209,85	-374,48	696,21	-148,5	307,52
1739	-112,93	203,22	-143,67	346,19	-231,08	430,11
1740	-114,2	206,1	-161,42	365,18	-230,93	430,26
1757	-120,08	215,62	-149,99	347,14	-276,18	310,44
1763	-87,67	168,5	-387,96	678,3	-239,86	297,64
1788	-151,91	249,5	-345,23	499,34	-107,4	261,35
1804	-160,84	261,67	-225,49	267,21	-191,87	324,51
1816	-143,35	245,36	-341,22	389,59	-190,13	260,16
1868	-194,83	300,04	-301,54	459,61	-117,16	261,51
1869	-195,1	300,56	-354,21	506,03	-117,64	261,71
1870	-197,09	302,69	-362,55	397,06	-127,82	282,98
1883	-207,29	304,6	-129,49	335,85	-188,42	329,93
1903	-192,01	295,46	-252,62	278,64	-277,42	437,22
1907	-194,17	305,58	-412,77	683,85	-291,33	426,91
1918	-213,41	317,68	-125,91	299,87	-261,48	316,81
1940	-198,29	309,95	-321,79	440,29	-433,9	722,34
1961	-153,78	246,47	-381,66	439,43	-217,32	352,08
1964	-163,02	224,34	-270,01	400,2	-247,66	386,4
1987	-142,63	238,12	-331,09	234,06	-274,72	259,9
1995	-139,94	224,95	-353,33	259,1	-334,6	262,52
2001	-159,34	250,77	-316,83	431,05	-261,38	166,94
2054	-232,55	320,05	-239,84	396,75	-181,69	182,49
2069	-216,95	321,51	-407,99	464,41	-296,82	272,55

Tablo A.2 Devamı

2080	-227,13	327,07	-171,29	341,11	-248,13	194,13
2084	-218,33	320,73	-326,66	267,4	-257,72	186,77
2088	-198,29	300,47	-486,5	581,41	-271,69	177,95
2094	-222,95	326,73	-379,61	270,3	-350,42	361,29
2095	-201,2	305,48	-356,27	253,31	-363,59	350,34
2101	-216,01	320,9	-269,38	284,49	-430,27	491,21
2131	-302,35	404,57	-351,69	282,51	-245,64	379,81
2136	-289,14	392,98	-242,56	410,92	-195,72	191,47
2143	-293,76	388,45	-149,23	341,65	-285,75	289,82
2148	-296,52	383,28	-380,64	286,65	-296,52	285,75
2171	-303,48	404,29	-226,51	393,62	-353,74	390,92
2176	-262,71	375,19	-369,74	270,16	-377,58	375,79
2182	-278,47	391,8	-286,48	295,8	-444,64	512,66
2187	-266,6	379,8	-501,15	600,09	-458,59	501

Tablo A.3 Tüm dairesel kesit analizler için bulunan von mises gerilme değerleri

Analiz No.	Alumina Svm (MPa)	Bakır Svm (MPa)	n-tipi Svm (MPa)	p-tipi Svm (MPa)
35	65,425	74,383	140,44	67,843
53	65,393	78,154	140,75	116,73
55	58,563	81,299	95,211	67,213
69	60,133	81,135	177,37	112,85
70	59,963	79,058	95,005	112,29
86	71,153	80,772	112,09	77,622
101	65,707	85,332	106,41	104,95
115	78,152	84,7	96,656	68,218
145	79,877	85,332	98,072	116,7
158	86,495	86,991	111,56	156,78
159	86,476	86,985	125,22	156,83
160	86,476	86,895	96,934	155,78
171	108,39	101,86	186,6	77,944
184	80,793	91,59	88,07	106,05
196	93,442	96,887	95,534	67,048
197	102,16	99,596	146,21	67,388
208	81,111	93,054	97,805	121,79
254	51,539	85,727	112,61	73,66
274	37,234	48,545	54,773	42,159
278	33,594	71,82	94,13	42,418
306	36,616	81,46	119,71	42,547
308	51,539	85,727	112,61	73,66
318	54,631	91,592	130,15	100,1
346	52,695	89,592	57,151	101,73
350	65,938	89,19	99,685	102,3
352	52,139	80,083	84,814	45,081
354	55,68	84,242	130,58	45,248
366	44,756	59,032	72,638	62,472
378	56,267	77,697	127,43	76,414
407	57,615	81,469	114,41	59,981
435	66,959	85,154	131,56	46,566
442	64,396	77,334	85,383	64,757
480	81,635	83,982	133,08	108,04
481	62,747	83,444	59,949	107,73
501	43,086	71,775	48,554	85,218
513	56,987	90,871	72,102	109,02
514	44,494	72,325	85,043	23,414
533	47,788	87,889	121,27	38,634
534	49,159	94,508	144,34	38,626
547	35,375	26,329	32,652	22,785

Tablo A.3 Devamı

589	63,841	90,332	36,287	113,55
594	76,812	90,804	76,124	114,8
630	52,117	41,666	71,003	25,368
637	52,798	28,203	35,609	41,846
649	72,769	73,376	91,29	57,357
651	94,678	84,063	151,44	57,329
662	76,877	75,633	48,937	93,434
686	86,12	90,763	128,88	41,831
692	77,482	38,645	59,431	39,832
699	71,447	50,965	58,449	47,365
704	89,655	85,679	129,6	30,047
725	79,686	45,025	50,768	61,552
734	117,42	74,289	204,54	141,32
750	106,84	70,864	194,85	184,96
753	117,31	70,308	221,83	182,92
761	118,43	74,512	205,11	150,32
770	118,17	73,841	204,68	194,75
773	178,42	74,048	333,23	204,04
776	118,29	74,005	189,03	230,46
788	150,02	70,859	205,55	175,49
792	185,66	77,283	384,62	175,64
793	167,02	71,546	175,46	278,21
816	127,93	70,656	227,11	135,07
837	205,88	79,14	363,3	175,76
856	128,84	73,501	170,31	230,26
857	128,79	73,284	184,28	231,57
872	216,07	80,029	322,75	169,88
875	195,53	83,175	184,37	271,7
877	200,15	73,623	174,01	267,21
902	118,45	70,66	181,65	166,17
906	132,62	70,908	224,84	163,97
908	217,88	80,001	305,63	165,85
916	212,87	78,268	226,08	174,16
922	135,71	73,073	169,63	139,85
935	224,3	75,205	309,02	199,6
953	231,2	75,734	310,93	162,43
957	209,09	89,793	187,37	264,59
959	215,91	78,769	209,17	257,79
961	223,07	76,26	229,64	260,07
979	123,65	84,82	182,04	142,78
993	95,365	75,214	227,17	192,14

Tablo A.3 Devamı

1025	115,18	77,613	273,51	163,18
1037	138,94	98,227	201,9	215,83
1068	149,23	83,064	169,71	175,1
1071	164,61	103,66	337	175,73
1079	170,31	101,8	280,33	186,6
1081	149,35	85,202	180,51	128,98
1102	128,51	82,101	145,87	168,43
1107	149,66	103,37	338,13	173,76
1165	151,86	95,663	148,42	126,83
1171	181,02	92,093	180,46	166,6
1184	160,3	90,281	164,59	173,24
1201	171,37	91,602	148,47	224,69
1202	178,07	88,347	164,36	224,55
1208	199,42	93,71	199,41	290,29
1228	125,93	81,862	92,691	196,42
1241	154,34	93,052	167,2	224,65
1255	107,58	83,91	93,301	95,728
1257	112,2	83,918	138,95	95,718
1267	136,55	91,17	103,66	120,71
1273	126,47	86,611	97,612	73,275
1287	111,72	95,113	201,38	115,97
1296	113,29	95,177	201,61	153,6
1326	188,13	109,43	256,8	83,508
1330	169,75	85,775	111,38	79,243
1335	189,72	109,22	257,37	109,87
1338	166,29	80,314	143,99	107,28
1352	199,78	107,44	239,62	85,095
1366	157,99	85,01	107,76	126,66
1373	187,29	98,778	135,21	176,39
1377	164,4	92,894	212,68	168,3
1393	236,62	108,42	123,22	206,2
1403	244,91	111,96	183,03	223,62
1405	218,29	98,591	210,63	94,203
1409	205,33	90,66	135,5	92,005
1435	214,13	87,66	115,85	82,106
1444	181,5580729	92,086	116	139,75
1470	128,67	72,683	231,47	208,29
1474	211,83	94,659	327,75	205,64
1477	127,68	72,171	209,79	218,69
1503	220,29	76,584	474,76	268,73
1507	143,84	73,586	222,29	294,2

Tablo A.3 Devamı

1527	216,54	75,223	305,44	359,13
1532	207,38	104,23	225,62	419,7
1538	227,63	75,873	426,84	429,18
1554	146,96	87,04	290,9	201,05
1562	147,14	77,749	263,45	212,87
1567	149,15	81,673	205,36	186,97
1570	150,01	73,076	218,52	181,99
1576	148,2	86,168	205,22	258,96
1610	249,94	76,417	407,39	346,32
1612	226,25	92,332	205,23	402,96
1619	249,56	76,417	407,14	409,21
1648	169,04	87,351	202,93	186,61
1668	181,9	79,782	224,79	299,85
1674	244,98	79,835	438,12	303,23
1683	256,49	77,165	440,11	222,48
1698	244,83	83,049	301,75	395,32
1701	258,23	77,236	439,97	396,9
1718	180,57	85,73	394,26	217,36
1739	174,03	81,004	247,86	202,93
1740	175,85	80,513	259,21	203,01
1757	187,58	81,519	250,44	200,18
1763	141,14	85,952	398,84	195,38
1788	209,08	71,494	224,07	178,15
1804	220,74	73,184	192,09	226,71
1816	203,57	74,788	287,53	160,5
1868	252,13	85,921	217,86	178,67
1869	252,61	74,949	229,53	178,6
1870	257,2	75,468	282,59	178,5
1883	256,71	100,08	249,96	233,52
1903	242,36	93,993	189,43	203,41
1907	252,49	83,668	391,86	211,26
1918	273,14	82,374	235,15	207,32
1940	256,93	79,235	215,19	392,89
1961	212,43	102,7	270,81	263,78
1964	186,37	90,791	320,93	303,62
1987	199,72	93,175	169,72	156,85
1995	180,17	94,718	184,98	178,03
2001	216,93	85,267	341,55	129,15
2054	275,9	91,981	316,23	134,59
2069	271,34	93,934	280,69	168,06
2080	280,51	88,646	281,52	138,11

Tablo A.3 Devamı

2084	271,83	100,91	187,6	132,13
2088	242,9	83,366	349,03	127,6
2094	276,72	105,36	209,09	214,11
2095	247,04	83,382	177,01	203,16
2101	268,33	92,45	164,15	283,77
2131	353,82	85,638	195,79	293,48
2136	341,97	82,975	334,77	147,92
2143	332,91	83,262	284,53	170,15
2148	319,74	84,297	215,79	167,56
2171	352,41	87,911	312,39	229,52
2176	309,42	84,638	187,75	213,58
2182	330,7	93,418	169,48	299,73
2187	312,42	83,924	364,42	287,84

Tablo A.4 Tüm dairesel kesit analizler için bulunan asal gerilme değerleri

Analiz No.	Alumina S1(MPa)	Alumina S3(MPa)	n tipi dirsek S1(MPa)	n tipi dirsek S3(MPa)	p tipi dirsek S1(MPa)	p tipi dirsek S3(MPa)
35	-53,771	50,483	-103,59	140,63	-18,974	80,338
53	-53,772	50,508	-103,84	140,89	-41,048	130,65
55	-51,585	49,952	-24,873	112,59	-54,042	71,167
69	-52,732	47,967	-38,63	137,3	-81,572	116,19
70	-52,639	47,999	-70,495	97,636	-79,084	115,91
86	-66,008	58,729	-41,726	131,02	-14,145	93,486
101	-60,608	54,73	-40,959	124,46	-35,48	124,9
115	-7,414	70,162	-76,05	96,993	-22,76	80,368
145	-70,896	69,288	-19,315	116,99	-88,495	117,53
158	-72,265	71,184	-37,575	130,9	-108,24	155,56
159	-72,258	71,195	-46,307	145,77	-108,19	155,6
160	-72,136	70,855	-75,119	97,553	-106,11	154,97
171	-85,663	92,812	-125,08	178,81	-14,703	93,688
184	-75,675	69,762	-36,984	103,44	-26,162	126,91
196	-81,312	88,567	-78,399	94,01	-24,599	78,598
197	-83,679	89,866	-108,27	141,44	-24,384	78,994
208	-76,829	70,245	-21,025	117,54	-54,634	138,95
254	-31,051	63,877	-54,107	108,94	-60,105	73,417
274	-21,255	45,491	-22,338	65,658	-32,365	43,148
278	-21,066	40,764	-76,055	90,614	-31,898	43,615
306	-21,774	41,654	-96,367	114,22	-32,257	43,754
308	-31,051	63,877	-54,107	108,94	-60,105	73,417
318	-33,256	67,847	-72,937	129,83	-79,217	97,576
346	-35,971	64,679	-26,632	69,519	-44,105	100,94
350	-45,075	82,124	-85,495	94,587	-44,515	102,71
352	-35,839	63,786	-30,243	88,507	-21,19	54,532
354	-38,726	68,457	-66,966	130,35	-21,562	54,725
366	-30,468	54,442	-41,466	88,722	-30,88	75,589
378	-35,479	69,755	-106,38	120,45	-38,888	87,921
407	-45,265	69,628	-54,201	109,24	-19,163	70,142
435	-49,717	82,011	-64,775	132,01	-22,329	56,296
442	-46,742	78,744	-27,935	92,3	-35,934	78,056
480	-61,651	101,6	-68,012	132,6	-89,401	104,47
481	-43,462	77,401	-27,139	72,697	-87,965	103,98
501	-35,846	53,037	-40,007	48,536	-48,587	82,422
513	-39,369	70,952	-77,223	60,827	-73,855	112,21
514	-36,715	54,772	-45,281	79,69	-19,314	27,899
533	-42,113	59,122	-76,854	119,78	-39,882	38,199
534	-45,338	60,923	-100,92	145,74	-40,144	38,194

Tablo A.4 Devamı

547	-24,903	43,066	-35,112	25,847	-25,192	17,103
589	-65,126	78,727	-26,503	42,567	-70,477	113,26
594	-64,812	95,841	-76,626	66,947	-73,781	117,15
630	-39,802	63,793	-65,767	61,705	-28,1	20,917
637	-40,226	64,778	-38,85	29,814	-44,097	36,336
649	-82,042	84,556	-41,101	81,853	-21,313	56,376
651	-99,098	92,303	-94,162	149,29	-21,571	56,16
662	-80,387	94,1	-38,488	53,706	-46,268	86,387
686	-92,745	101,89	-74,469	125,76	-36,156	50,418
692	-60,593	95,624	-59,836	53,535	-35,936	46,887
699	-64,619	87,382	-46,06	58,596	-42,697	51,359
704	-92,253	110,65	-76,35	128,04	-33,371	26,354
725	-62,408	98,486	-39,907	50,991	-64,753	57,637
734	-101,08	90,118	-104,68	228,16	-27,315	171,15
750	-90,999	80,612	-65,748	227,36	-56,506	224,39
753	-101,36	96,615	-128,73	242,56	-50,881	219,57
761	-100,81	89,846	-91,279	225,65	-50,345	173,58
770	-101,2	86,687	-90,248	225,48	-82,354	214,49
773	-106,66	138,31	-166,93	304,24	-77,385	217,47
776	-102,06	106,25	-51,311	218,5	-134,59	241,97
788	-103,19	123,52	-86,775	227,09	-96,088	183,8
792	-107,17	141,58	-194,48	341,98	-88,978	182,31
793	-105,99	131,39	-46,308	202,74	-171,69	271,3
816	-108,47	110,98	-126,3	237,17	-29,639	163,48
837	-113,78	189,67	-239,74	307,89	-62,125	211,17
856	-109,27	124,05	-38,784	201,51	-130,03	236,1
857	-109,15	130,47	-48,12	216,33	-131,22	237,3
872	-113,03	193,12	-167,55	285,5	-98,976	169,77
875	-112,87	175,72	-54,189	213,47	-173,16	253,24
877	-112,8	178,7	-69,546	195,26	-144,28	245,88
902	-100,4	125,52	-46,822	218,59	-49,754	206,59
906	-111,42	137,18	-132,74	232,61	-48,288	201,92
908	-115,99	211,72	-203,67	260,34	-54,895	197,2
916	-115,38	207,64	-156,06	209,35	-64,792	210,09
922	-110,33	126	-72,583	187,66	-55,794	158,49
935	-115,87	216,03	-173,59	265,73	-89,879	205,87
953	-115,8	222,31	-167,37	269,62	-103,74	157,87
957	-115,79	200,2	-56,822	218,14	-170,67	240,56
959	-115,57	205,71	-101,69	220,04	-150,73	232,48
961	-115,32	217,84	-141,33	209,63	-141,04	235,45
979	-72,687	152,57	-135,61	177,47	-40,711	165,68

Tablo A.4 Devamı

993	-77,986	116,05	-123,1	224,99	-107,05	210,09
1025	-64,843	141,56	-158,88	258,48	-104,2	195,8
1037	-87,606	171,39	-95,508	216,15	-172,47	214,69
1068	-103,24	183,57	-132,38	214,88	-59,302	205,81
1071	-118,11	202,67	-233,11	300,58	-67,973	202,64
1079	123,63	209,28	-199,71	258,14	-79,753	212,9
1081	-104,67	183,03	-68,208	209,36	-63,039	156,03
1102	-89,211	156,64	-73,558	179,9	-121,11	207,14
1107	-98,116	185,8	-203,9	303,18	-116,27	198,96
1165	-114,23	184,08	-78,406	181,58	-61,041	152,77
1171	-134,64	221,13	-62,347	212,36	-106,22	197,94
1184	-119,07	195,63	-107,81	203,02	-126,35	209,65
1201	-123,19	211,27	-80,68	180,09	-148,32	216,99
1202	-127,91	220,22	-110,63	197,25	-148,56	216,79
1208	-159,35	242,49	-87,666	226,92	-211,1	266,48
1228	-103,98	154,78	-71,782	104,83	-109,89	194,72
1241	-107,91	189,72	-181,58	137,23	-137,19	228,05
1255	-79,889	130,92	-69,045	102,12	-85,028	102,36
1257	-81,556	136,75	-114,17	136,94	-85,338	102,25
1267	-91,312	168,56	-113,52	80,819	-111,61	123,5
1273	-86,002	155,59	-71,589	106,56	-80,906	53,858
1287	-76,611	136,04	-181	170,42	-122,11	94,622
1296	-77,158	137,74	-180,81	170,78	-158,75	134,18
1326	-170,26	228,9	-137,29	262,6	-62,495	100,86
1330	-126,82	208,78	-121,05	91,751	-66,258	94,549
1335	-169,87	230,92	-137,62	263,62	-101,78	130,82
1338	-139,2	203,83	-128,92	140,56	-94,274	125,97
1352	-166,67	242,21	-129,91	260,09	-94,645	68,748
1366	-120,31	193,86	-117,59	88,537	-133,45	107,94
1373	-141,69	230,33	-111,88	140,42	-186,04	157,58
1377	-123,67	202,07	-198,2	185,65	-173,57	149,85
1393	-207,81	284,78	-135,18	106,77	-102,44	226,13
1403	-208,94	294,98	-189,98	165,44	-121,69	245,29
1405	-215,34	262,42	-93,583	225,84	-63,479	114,51
1409	-185,05	250,44	-115,87	152,48	-65,219	111,43
1435	-171,58	260,78	-87,645	136,73	-89,542	74,437
1444	-174,5	265,88	-89,077	136,94	-149,62	126,06
1470	-103,38	117,14	-66,346	274,49	-69,905	255,53
1474	-118,96	193,24	-218,96	281,41	-71,662	246,95
1477	-102,43	116,26	-51,072	249,73	-90,105	268,27
1503	-118,25	195,11	-289,42	384,87	-127,76	262,23

Tablo A.4 Devamı

1507	-116,85	107,92	-103,93	236,52	-174,89	281,71
1527	-118,75	191,51	-173,94	291,77	-212,22	306,89
1532	-118,75	187,14	-63,779	259,83	-294,75	343,53
1538	-118,38	199,1	-227,7	355,88	-241,48	356,34
1554	-117,35	173,23	-205,77	286,4	-73,286	247,3
1562	-117,3	176,87	-170,55	265,15	-92,808	260,05
1567	-117,54	177,91	-45,932	245,8	-96,907	198
1570	-117,33	133,77	-113,55	231,2	-87,361	194,9
1576	-117,74	180,67	-47,261	244,91	-157,34	250,27
1610	-118,59	241,94	-241,4	331,02	-206,89	291,78
1612	-125,2	219,58	-56,033	241,06	-302,32	322,48
1619	-118,36	241,46	-240,95	330,89	-259,15	334,29
1648	-124,28	208,13	-50,128	245,02	-99,918	195,85
1668	-134,81	224,67	-80,907	269,26	-211,82	276,56
1674	-156,3	245,85	-308,14	343,06	-191,31	280,95
1683	-149,76	278,18	-292,92	347,12	-151,39	200,07
1698	-152,63	246,84	-203,18	286,73	-279,95	316,51
1701	-150,6	265,58	-293,95	347,36	-271,49	321,28
1718	-123,84	220,55	-279,39	342,57	-84,826	249,98
1739	-116,05	212,07	-102,72	278,7	-152,24	251,16
1740	-117,77	214,25	-110,49	288,91	-152,52	251,24
1757	-130,62	228,26	-108,38	278,61	-160,57	210,23
1763	-98,409	161,08	-230,16	351,63	-122,6	199,13
1788	-153,11	253,29	-210,47	278,21	-57,255	216,6
1804	-164,62	267,17	-127,53	239,9	-103,76	272,61
1816	-144,05	249,56	-191,59	262,66	-98,808	192,01
1868	-196,66	302,21	-184,76	270,91	-64,325	220,51
1869	-196,84	302,81	-215,29	284,13	-64,83	220,32
1870	-206,58	308,86	-208,67	252,11	-74,629	217,31
1883	-207,28	307,04	-114,92	293,85	-111,53	280,26
1903	-188,94	294,91	-130,19	237,62	-158,39	252,2
1907	-194,09	307,69	-257,91	332,65	-161,38	241,26
1918	-225,4	326,25	-82,268	269,09	-157,45	209,37
1940	-198,55	312,73	-182,38	254,09	-275,09	336,06
1961	-164,52	257,37	-266,76	228,67	-137,99	294,26
1964	-164,38	226,26	-151,12	319,37	-148,16	284,92
1987	-144,41	243,06	-184,8	133,83	-146,47	175,55
1995	-134,7	219,07	-189,35	181,43	-183,51	169,94
2001	-169,88	262,22	-172,21	350,5	-144,64	94,33
2054	-236,31	328,91	-146,55	340,24	-101,44	164,57
2069	-219,68	327,3	-254,08	247,76	-164,46	190,64

Tablo A.4 Devamı

2080	-237,61	334,56	-128,86	315,78	-153,32	112,72
2084	-222,13	327,29	-182,73	211,23	-145,04	107,68
2088	-192,64	294,53	-290,36	304,07	-141,61	102,59
2094	-226,55	333,75	-214,23	222,52	-223,92	189,9
2095	-196,27	298,99	-192,29	147,49	-215,15	179,9
2101	-216,14	323,22	-135,11	187,91	-270,21	262,35
2131	-320,72	419,73	-209,02	177,76	-138,43	333,82
2136	-296,74	403,72	-148,91	360,25	-106,42	182,97
2143	-299,84	393,18	-116,64	313,13	-170,74	217,26
2148	-296,3	382,36	-221,22	235,07	-169,32	212,27
2171	-322,11	417,43	-147,86	350,87	-239,73	219,31
2176	-257,76	370,02	-203,69	164,23	-230,9	199,47
2182	-279,43	394,68	-147,58	206,77	-274,55	285,17
2187	-261,56	370,01	-307,04	327,83	-282,13	273,05

Multiple Linear

$$Y = \sum_{i=1}^n (a_i x_i) + c$$

Second Order Non-Linear

$$Y = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{kj} x_j x_k) + \sum_{i=1}^n (a_i x_i) + c$$

Third Order Non-Linear

$$Y = \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n \sum_{p=1}^n (\beta_l x_l x_m x_p) + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{kj} x_j x_k) + \sum_{i=1}^n (a_i x_i) + c$$

Forth Order Non-Linear

$$Y = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n \sum_{v=1}^n (\gamma_r x_r x_s x_t x_v) + \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n \sum_{p=1}^n (\beta_l x_l x_m x_p) + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{kj} x_j x_k) + \sum_{i=1}^n (a_i x_i) + c$$

First Order Logarithmic Non-Linear

$$Y = \sum_{i=1}^n (a_i \log[x_i]) + c$$

Second Order Logarithmic Non-Linear

$$Y = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{kj} \log[x_j x_k]) + \sum_{i=1}^n (a_i \log[x_i]) + c$$

First Order Trigonometric Non-Linear

$$Y = \sum_{i=1}^n (a_i \sin[x_i] + \alpha_i \cos[x_i]) + c$$

Second Order Trigonometric Non-Linear

$$Y = \sum_{i=1}^n (a_i \sin[x_i] + \alpha_i \cos[x_i]) + \sum_{j=1}^n (\beta_j \sin^2[x_j] + \gamma_j \cos^2[x_j]) + c$$

First Order Trigonometric Rational Non-Linear

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i \sin[x_i] + \alpha_i \cos[x_i]) + c_1}{\sum_{j=1}^n (\beta_j \sin[x_j] + \gamma_j \cos[x_j])} + c_2$$

Şekil A.1 Regresyon modellerinin fonksiyonel yapıları

Şekil A.2 Dikdörtgen kesit bakır gerilme çıktısının amaç fonksiyonu

