T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜZTABAN VE DİYABET HASTASI BİREYLER İÇİN KAFES YAPILAR KULLANILARAK AYAKKABI TABANI TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

İlker DEMİRBAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Eş Danışman

Dr. Niyazi TANLAK

Ocak, 2023

T.C

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜZTABAN VE DİYABET HASTASI BİREYLER İÇİN KAFES YAPILAR KULLANILARAK AYAKKABI TABANI TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

İlker DEMİRBAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 26.01.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Birgül A. TEMİZTAŞ	Dr. Niyazi TANLAK
Yıldız Teknik Üniversitesi	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii
Danışman	Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Birgül A. TEMİZTAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Ali Can KAYA, Üye
Türk-Alman Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Birgül A. TEMİZTAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Düztaban ve Diyabet Hastası Bireyler için Kafes Yapılar Kullanılarak Ayakkabı Tasarımı ve Optimizasyonu başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İlker DEMİRBAŞ

İmza

Aileme,

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak yol gösteren değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Birgül A. TEMİZTAŞ ve eş danışmanım Dr. Niyazi TANLAK' a sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Bu zorlu süreçte yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Muhammed Talha ERTUNÇ, Berkay KUŞKIRA, Erdem BAYIRLIOĞLU, Görkem AŞCI ve Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş' deki iş arkadaşlarıma desteklerinden dolayı minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Hayatım boyunca her zaman beni olumlu motive eden, emeklerini hiçbir zaman esirgemeyerek bana destek olan canım aileme sonsuz teşekkürler.

İlker DEMİRBAŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ ix

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Araştırması 1

1.2 Tezin Amacı 4

1.3 Hipotez 4

2 KAFES YAPILAR 6

2.1 Kafes Yapıların Tanımı 6

2.2 Kafes Yapıların Sınıflandırılması 7

2.3 Maxwell'in Kararlılık Kriteri (Maxwell's Stability Criterion) 8

2.4 Eğilme Ağırlıklı Kafes Yapılar (Bending-Dominated Structure) ve Mekanik Özellikleri 10

2.5 Gerinme Ağırlıklı Kafes Yapılar (Stretch-Dominated Structure) ve Mekanik Özellikleri 14

2.6 Yüzey Temelli Kafes Yapılar 16

3 OPTİMİZASYON 17

3.1 Optimizasyonun Matematiksel Tanımı 17

3.2 Yapısal Optimizasyon 18

3.2.1 Boyut Optimizasyonu 20

3.2.2 Şekil Optimizasyonu 20

3.2.3 Topoğrafya Optimizasyonu 21

3.2.4 Topoloji Optimizasyonu 22

3.2.5 Kafes Optimizasyonu 27

4 MATERYAL VE METHOD 31

4.1 Ayak ve Ayakkabı Tabanı Geometrilerinin Oluşturulması 31
4.2 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması 35
4.2.1 Ağ Yapısı “Mesh” Oluşturulması ve Eleman Seçimi 36
4.2.2 Ayak ve Ayakkabı Tabanı Seçimi ve Özellikleri 37
4.2.3 Sınır Şartları 38
4.2.4 Tasarım Alanı ve Optimizasyon Parametreleri 41

5 SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARI 44

5.1 Genel Kafes Yapısı Optimizasyonu Süreçleri 45
5.2 1.Kafes Yapısı Optimizasyon Sonuçları 46
5.3 2.Kafes Yapısı Optimizasyon Sonuçları 49
5.4 3.Kafes Yapısı Optimizasyon Sonuçları 53
5.5 Üç Farklı Kafes Yapısı Optimizasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması 57
5.6 Temas Basıncı Kısıtı Uygulanarak Yapılan Optimizasyonlar ve Ayak Tabanı Basınç Dağılımları 58
5.7 1.Kafes Yapısı Optimizasyon Sonucu Oluşan Ayakkabı Tabanı Yapısı ve Tasarım Alternatifleri 61
5.7.1 Ayak Ucunda Oluşan Boşluk Bölgesi İçin Katı Eleman Eklenmesi 63
5.7.2 Ayak Ucunda Oluşan Boşluk Bölgesi İçin Adım Atma Durumu İncelenerek Optimizasyon Yapılması ve Oluşan Yapının Eklenmesi 64
5.8 Elde Edilen Ayakkabı Tabanı Modelinin Üretime Uygun Verisinin Elde Edilmesi 66

6 SONUÇ VE ÖNERİLER 67

KAYNAKÇA 69

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 72

SİMGE LİSTESİ

(f)	Amaç fonksiyonu
j	Bağlantı adeti
P	Cezalandırma faktörü
n	Değişken sayısı
m	Denklem sayısı
ε_d	Densifikasyon gerinmesi
(y)	Durum değişkeni
E	Elastisite modülü
σ_{el}	Elastomer akma dayanımı
K_e	Eleman sertlik matrisi
L	Hücre boyutu
t	Hücre kesit kalınlığı
I	İkinci alan momenti
ρ	Kafes yoğunluğu
ρ_s	Katı yoğunluğu
kg	Kilogram
kPa	Kilopaskal
E_S	Kiriş malzemesi modülü
b	Kiriş sayısı
σ_{ys}	Malzeme akma dayanımı
M	Maxwell kararlılık kriteri
Mpa	Megapaskal
m	metre
mm	Milimetre
N	Newton
σ_{pl}	Plato gerilmesi
M_f	Tam plastik moment
(x)	Tasarım değişkeni
ρ_{crit}	Yapı kilitlendiği durumdaki bağıl yoğunluk
δ	Yer değiştirme

KISALTMA LİSTESİ

Bcc	Hacim Merkezli Kübik (Body Centered Cubic)
ESO	Dönüşümsel Yapısal Optimizasyon (Evolutionary Structural Optimization)
Fcc	Yüzey Merkezli Kübik (Face Centered Cubic)
ISE	İzotropik katı veya boş elemanlar (Isotropic solid or empty elements)
SIMP	Solid Isotropic Microstructures with Penalization
SPC	Tek Nokta Kısıt (Single Point Constraints)
TPMS	Üçlü periyodik minimal yüzeyler (Triply Periodic Minimal Surfaces)
TPU	Termoplatik Poliüretan

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Deniz süngerinden esinlenilerek oluşturulmuş kafes yapı [3] 1
Şekil 1.2 Farklı kafes topolojilerindeki ayakkabı tabanları [5] 2
Şekil 1.3 İki boyutlu boşluklu protez[8] 3
Şekil 1.4 Kafes optimizasyonu yapılmış yapının üretime uygun verisi [10]..... 4
Şekil 2.1 Kafes yapıların kullanıldığı uygulamalar-1 [12] 6
Şekil 2.2 Kafes yapıların kullanıldığı uygulamalar-2 [12] 7
Şekil 2.3 Mimari ve geometrilerine göre kafes yapıların sınıflandırılması [14] ... 8
Şekil 2.4 Çeşitli yapıların Maxwell kriteri değerleri [15] 9
Şekil 2.5 Temsili birim hücre yapısı [11] 10
Şekil 2.6 Eğilme ağırlıklı yapıların (bending-dominated structure) gerilme-gerinim grafiği ve önemli parametreler [11]..... 11
Şekil 2.7 Temsili birim hücre yapısı-yükleme sonrası yapının davranışı [11] 11
Şekil 2.8 Birim hücrenin, hücre kesitinin plastik olarak eğilmesinden dolayı hücrede oluşan davranış [11] 12
Şekil 2.9 Eğilme ağırlıklı yapının (bending-dominated structure) yük altında davranışı [16] 13
Şekil 2.8 Gerinme ağırlıklı yapıların (stretch-dominated structure) gerilme-gerinim grafiği ve önemli parametreler [11]..... 15
Şekil 2.8 Gerinme ağırlıklı yapının (stretch-dominated structure) yük altında davranışı [16] 15
Şekil 2.8 Yüzey temelli kafes yapıların oluşturulması [15] 16
Şekil 2.8 Örnek yüzey temelli kafes yapılar [15] 16
Şekil 3.1 Fonksiyonların minimum ve maksimum noktası [17] 17
Şekil 3.2 Yapısal optimizasyon problemi [18]..... 19
Şekil 3.3 Yapısal optimizasyon çeşitleri..... 20
Şekil 3.4 Boyut optimizasyonu [19]..... 20
Şekil 3.5 Şekil optimizasyonu [19] 21
Şekil 3.6 Topoğrafya optimizasyonu [21] 21
Şekil 3.6 Topoloji optimizasyonu [19] 22
Şekil 3.8 Topoloji optimizasyonu adımları [22] 23
Şekil 3.9 Yoğunluk temelli topoloji optimizasyonu [23] 24
Şekil 3.10 Farklı cezalandırma faktörlerine sahip yoğunluğun bir fonksiyonu olarak bağıl rijitlik [19] 25
Şekil 3.11 Mikroyapının değişkenlere göre değişimi [19] 26
Şekil 3.12 Homojenizasyon metodunda mikroyapılar [19] 27
Şekil 3.13 Topoloji optimizasyonu ve kafes optimizasyonu arasındaki fark [24] 28
Şekil 3.12 Eğimli kiriş formülasyonu [24] 28

Şekil 3.15 Altı düzlem yüzeyli(hexahedral) elemanlar [24] 29
Şekil 3.16 Diğer kafes yapıları-a) üç yüzlü eleman (tetrahedral) b) piramit eleman c) beş yüzlü eleman (pendahedron) [24] 29
Şekil 3.17 Boşluk seçenekleri arasındaki fark [24] 29
Şekil 4.1 Taranmış nokta bulutu ayak modeli 32
Şekil 4.2 Dönüştürülmüş katı ayak modeli 32
Şekil 4.3 Ayak numarası belirleme tablosu [26] 33
Şekil 4.4 Ayakkabı tabanı standart ölçüleri [27] 33
Şekil 4.5 İki boyutlu ayakkabı tabanı çizim taslağı 34
Şekil 4.6 Üç boyutlu ayak tabanı temel ölçüler 34
Şekil 4.7 Bilgisayar destekli tasarım programı ile oluşturulmuş ayakkabı tabanı 35
Şekil 4.8 Ayak modeli eleman kalitesi 36
Şekil 4.9 Ayakkabı tabanı eleman kalitesi 37
Şekil 4.10 Kuvvet uygulanması ve dağıtılması 39
Şekil 4.11 Kontak yüzeyleri ve özellikleri 40
Şekil 4.12 “Spc” uygulanma noktaları 40
Şekil 4.13 Ayakkabı tabanı tasarım ve tasarım alanı olmayan bölgeler 41
Şekil 4.14 Kafes yapısı optimizasyonu parametreleri 43
Şekil 5.1 Çözüm işlemlerinin başlatıldığı sekme 44
Şekil 5.2 Topoloji ve kafes yapısı parametrelerinin tanımlandığı sekme 45
Şekil 5.3 1.Kafes yapısı 46
Şekil 5.4 1.Kafes yapısı temas basıncı sonuçları 46
Şekil 5.5 1.Kafes yapısı ayakkabı tabanı yer değiştirme sonuçları 47
Şekil 5.6 1.Kafes yapısı ayakkabı tabanı gerilme değerleri 48
Şekil 5.7 1.Kafes yapısı gerilme değerleri 48
Şekil 5.8 1.Kafes yapısı gerinme değerleri 49
Şekil 5.9 2.Kafes yapısı 50
Şekil 5.10 2.Kafes yapısı temas basıncı sonuçları 50
Şekil 5.11 2.Kafes yapısı ayakkabı tabanı yer değiştirme sonuçları 51
Şekil 5.12 2.Kafes yapısı ayakkabı tabanı gerilme değerleri 51
Şekil 5.13 2.Kafes yapısı gerilme değerleri 52
Şekil 5.14 2.Kafes yapısı gerinme değerleri 53
Şekil 5.15 3.Kafes yapısı 53
Şekil 5.16 3.Kafes yapısı temas basıncı sonuçları 54
Şekil 5.17 3.Kafes yapısı ayakkabı tabanı yer değiştirme sonuçları 55
Şekil 5.18 3.Kafes yapısı ayakkabı tabanı gerilme değerleri 55
Şekil 5.19 3.Kafes yapısı gerilme değerleri 56
Şekil 5.20 3.Kafes yapısı gerinme değerleri 57
Şekil 5.21 Temas basıncı sonuçları-190 kPa basınç kısıtı 59
Şekil 5.22 Temas basıncı sonuçları-170 kPa basınç kısıtı 60
Şekil 5.23 Temas basıncı sonuçları-150 kPa basınç kısıtı 61
Şekil 5.24 Optimize edilmiş ayakkabı tabanı modeli 62
Şekil 5.25 Katı elemanlar ve kafes yapılar 62

Şekil 5.26 Ayak ucunda oluşan boşluk bölgesi 63
Şekil 5.27 Ayak ucunda oluşan boşluk bölgesine katı elemanların eklenmesi ... 63
Şekil 5.28 Yeni sınır şartları ve tasarım bölgesi 64
Şekil 5.29 Yeni sınır şartlarına göre oluşan yeni yapı 65
Şekil 5.30 Yeni sınır şartlarına göre oluşan temas basıncı 66
Şekil 5.30 Üç boyutlu verisi elde etme iş akışı [9] 66

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Ayak modeli eleman sayısı ve özellikleri 36
Tablo 4.2 Ayakkabı tabanı modeli eleman sayısı ve özellikleri 37
Tablo 4.3 Kullanılan malzemeler ve özellikleri 38
Tablo 4.4 Ayak ağırlık merkezi koordinatları 39
Tablo 4.5 Optimizasyon parametreleri ve özellikleri 42
Tablo 5.1 Çözüm için kullanılan bilgisayar özellikleri 44
Tablo 5.2 Üç farklı kafes yapısı optimizasyon sonuçları 57
Tablo 5.3 Yeni konuma göre ayak ağırlık merkezi koordinatları 64
Tablo 6.1 Diğer çalışmalar ile yapılan ayakkabı tabanı tasarımları ile elde edilen ayak tabanı maksimum basınç değerleri 68

ÖZET

Düztaban ve Diyabet Hastası Bireyler için Kafes Yapılar Kullanılarak Ayakkabı Tabanı Tasarımı ve Optimizasyonu

İlker DEMİRBAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Eş-Danışman: Dr. Niyazi TANLAK

Düztaban ayak yapısına sahip olan bireylerin yere basmaları durumda ayak tabanında oluşan basınç dağılımı ayak yapısı ortopedik formda olan bireylere göre farklılıklar gösterir. Bu fark ayağın yük taşımaya uygun olmayan kısımlarına daha fazla yük gelmesine neden olur. Bireyin düztaban ayak yapısına sahip olmasının yanı sıra bir de diyabet hastası olması durumunda ise ayağın yük taşımaya uygun olmayan bölgelerinde yara oluşumu gerçekleşir. Diyabet hastaları için kritik basınç değeri 200kPa'dır [1]. Bu çalışmada vücut kitle endeksi referans değeri aşan bir birey incelenerek kritik basınç değerine göre bireyin ayak yapısında oluşan gerilme ve deformasyonlar farklı taban yapıları dikkate alınarak nümerik olarak sonlu elemanlar paket programı kullanılarak incelenmiştir. Nümerik çalışmada ayakta ve hareketsiz kalan bir bireyin statik olarak ayak tabanına gelen basınç dağılımını kritik değerin altına çekecek şekilde optimize edecek sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Optimizasyon; topoloji optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu sonunda oluşan kafes yapılarının boyut optimizasyonu olarak iki aşamada

gerçekleşmektedir. Bu optimizasyon modeli üç boyutlu yazıcıda basılabilecek şekilde üç farklı kafes yapısı için tekrarlanmış ve her bir kafes yapısının bulunduğu ayakkabı tabanı, ayak tabanındaki basınç dağılımını kritik değerin altına düşürmüştür. Oluşturulan kafes yapılarındaki gerilme ve deformasyon değerleri incelendiğinde birinci kafes yapısı diğer iki kafes yapısına göre daha az gerilme ve deformasyon değerlerine sahiptir. Ayakkabı tabanı tasarımı için birinci kafes yapısı bulunan model seçilmiş ve kullanılmıştır. Kafes yapıları kullanılarak üstün özelliklere sahip yapılar elde edilebilmektedir. Sonuç olarak; kafes yapıları kullanılarak üç boyutlu yazıcılar için üretime uygun ve hem düztaban hem de diyabet hastalığına sahip kişiler için ayak tabanı basınç dağılımını azaltıcı özel olarak üretilebilecek ayakkabı tabanı için tasarım modeli oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Optimizasyon, kafes yapılar, ayakkabı tabanı

ABSTRACT

Shoe Sole Design and Optimization Using Lattice Structures for Flatfoot and Diabetic Individuals

İlker DEMİRBAŞ

Department of Mechanical Engineering

Masters of Science Thesis

Supervisor: Asist. Prof. Dr. Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Co-supervisor: Dr. Niyazi TANLAK

When individuals having flat feet step on the ground, the pressure distribution in the soles of their feet is different than that of the people having orthopedic foot structure. This abnormal pressure distribution causes more load to be placed on regions of the feet that are not suitable for load bearing. If any individual has a flat-footed foot structure as well as diabetes, wounds may occur at those regions that are not suitable for carrying a load. The critical pressure value for diabetes care is 200kPa [1]. An object that exceeds this body mass target is examined, and the stresses and abrasions that occur in the body foot structure according to the critical pressure times are hit numerically using the finite elements package program, based on different sole structures. It contains a finite element model that will optimize the pressure distribution to the static sole of the foot as an organism that is numerically standing and immobile. Topology optimization and size optimization are run sequentially to form the optimal insole. This two-staged scheme was repeated for three different lattice structures that could be printed on

a 3D printer, and the sole of the shoe with a lattice structure reduced the pressure distribution on the sole of the foot below the critical value. The stress and deformation values in the lattice structures formed have less stress and strain values than the first lattice structure compared to the other two lattice structures. For the shoe sole design, the model in the first lattice structure was selected and used. By using lattice structures, insole with superior properties can be obtained. As a result, A design model for the design of insoles, which will be specially produced using the mesh structure, suitable for production for three-dimensional printers and reducing the pressure distribution of the sole of the foot for both flat feet and people with diabetes, has been released.

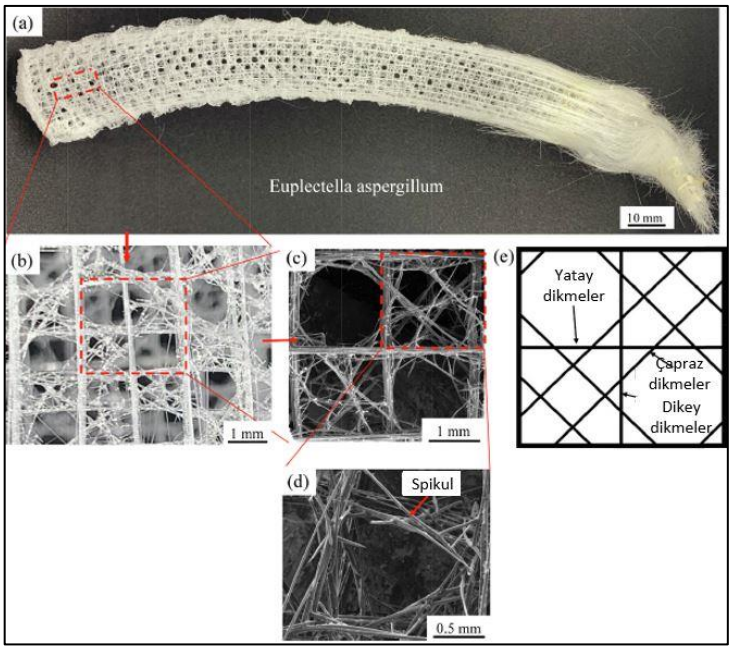
Keywords: Optimization, lattice structures, shoe sole

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Araştırması

Kafes yapıların, bal peteği ve köpüklere göre hafiflik, yüksek dayanım, titreşimi azaltma ve enerjiyi sönümleme gibi konularda üstünlükleri vardır ve bu konularda çalışmalar kapsamlı bir şekilde çalışılmaktadır. Bu üstün özelliklerinden dolayı kafes yapılar, biyomühendislik, havacılık ve otomotiv gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinin gelişmesi, araştırmacıları yeni kafes yapılar tasarlamaya yöneltmiştir [2].

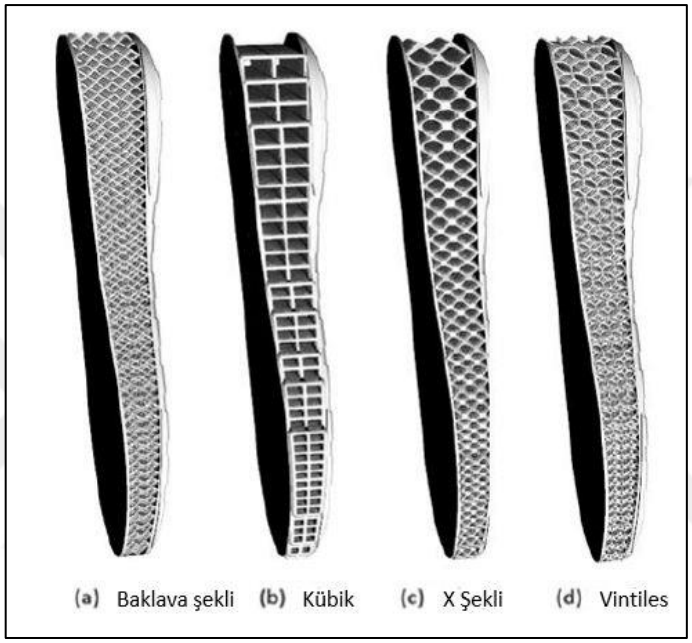
Yeni kafes yapılar, genellikle doğadan esinlenerek oluşturulmaktadır. Bir çalışmada deniz süngerlerinden esinlenilerek, periyodik kafes yapılar oluşturulmuştur ve yarı statik yükleme koşullarında enerji sönümleme ve deformasyon davranışları numerik ve deneysel olarak incelenmiştir ve literatürdeki diğer kafes yapılar ile karşılaştırılması yapılmıştır [3].



Şekil 1.1 Deniz süngerinden esinlenilerek oluşturulmuş kafes yapı [3]

Başka bir çalışmada ise; tavus mantis karidesinden esinlenilerek daha iyi enerji sönümleme amacıyla, dalgalı bir kafes yapı tasarlanmış ve eklemeli imalat ile üretimi yapılmıştır ve dalga sayısı, genliği gibi özelliklerin enerji sönümleme üzerinde etkileri incelenmiştir [4].

Kafes yapıların kullanıldığı birçok uygulama alanı vardır. Bir çalışmada, farklı kafes topolojileri kullanarak ayakkabı tabanı tasarımları yapılmıştır ve farklı kafes topolojilerinin taban gerilmesinde etkisi olduğu görülmüştür [5].

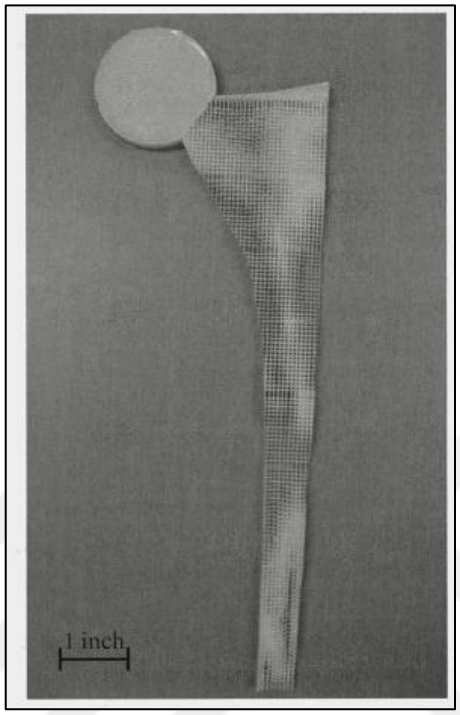


Şekil 1.2 Farklı kafes topolojilerindeki ayakkabı tabanları [5]

Kafes yapıları daha verimli hale getirmek için optimizasyon yöntemleri kullanılmaya başlamıştır. Çarpışmaya dayanıklı daha iyi periyodik kafes yapılar elde edebilmek için topoloji optimizasyon yöntemini kullanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda optimize edilmiş yapının, katı çarpmaya yönelik yapılar ve üçgen, kare bal peteği yapılardan daha çok enerji sönümleme kapasitesi olduğu sonucu ortaya çıkmıştır [6].

Başka bir çalışmada eklemeli imalat ile üretilecek değişken yoğunluklu kafes yapıların topolojisini optimize etmek için metot ortaya konulmuştur. Bu metot deneyler aracılığıyla doğrulanmıştır [7].

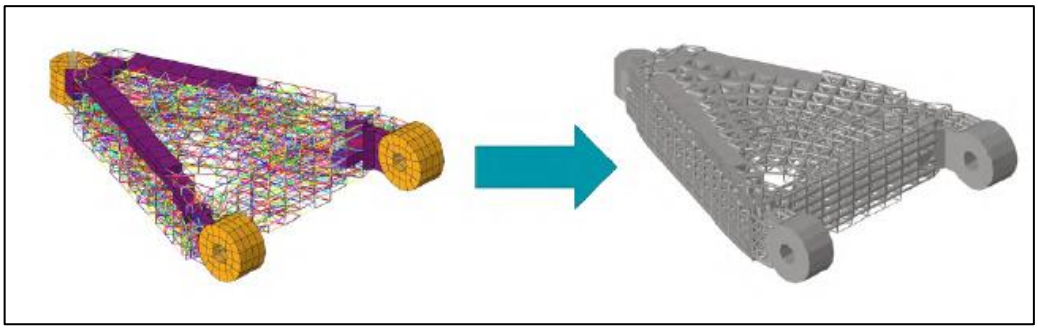
Başka bir çalışmada kalça protezleri tasarımları için çok boyutlu tasarım ve optimizasyon metodu sunulmuştur. Bu metot ile boşluklu olmayan protezlere göre arayüz gerilmelerinde %50, kemik erimesinde %76'lık bir azaltma meydana getirmiştir [8].



Şekil 1.3 İki boyutlu boşluklu protez [8]

Kafes yapılar, çoğunlukla eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmektedirler. Doğal olarak, bu üretim yönteminin kısıtları ve limitleri olabilmektedir. Bir çalışmada toz yatak kaynaştırma (powder bed fusion) yöntemi ile üretilmiş her bir kafes için limitleri içeren, pratik kullanıma uygun olan tablolar elde edilmiştir [9].

Topoloji optimizasyonu ile oluşturulan tasarımların üretime uygun hale getirilmesi için birçok kez iterasyon gerekmektedir. Fakat kafes yapılar kullandığında ve optimize edildiğinde üretime iterasyon gerekmeden tasarım verisi verilebilmektedir. Bir çalışmada, kafes optimizasyonu kullanılarak, araç salıncağı tasarlanmıştır ve üretim kısıtları uygulandığında topoloji optimizasyonu yapılan modele göre performansının daha iyi olduğu görülmüştür ve kafes optimizasyonu ile yapılan model, birçok iterasyona ihtiyaç olmadan üretime uygun tasarım veri oluşturmuştur [10].



Şekil 1.4 Kafes optimizasyonu yapılmış yapının üretime uygun verisi [10]

1.2 Tezin Amacı

Düztaban ayak yapısına sahip olan bireylerde oluşan ayak tabanı basıncı, ortopedik formda olan diğer bireylere göre farklılıklar göstermektedir. Bu sebepten dolayı düztaban ayak yapısına sahip bireylerde ayağın yük taşımaya uygun olmayan bölgelerinde yükler oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca diyabet hastalığı, bireylerde ayak formunun ortopedik formdan uzaklaşmasına şekil bozukluğuna sebep olabilmektedir. Düztaban ve diyabet hastalığına sahip bireylerde bu durum önem arz etmektedir. Diyabet hastalığına sahip bireylerde yara oluşumu olduğu durumlarda yaraların iyileşmesi uzun zaman alabilmektedir. Hem düztaban hem de diyabet hastalığına sahip bireylerde ayak formu normal insanlardaki gibi ortopedik formdan uzak olduğundan dolayı ayağın yük taşımaya uygun olmayan bölgelerine yük gelmesine sebep olmaktadır ve bu da yara oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durum oluştuğunda diyabet hastalığına sahip kişilerde uzuv kaybına sebep olacak durumlar oluşabilmektedir. Bu tezde amaç, bu durumdaki bireyler için kafes yapıları, sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak; oluşan basınç değerini azaltacak ve üç boyutlu yazıcılarda üretilebilecek ayakkabı tabanı tasarımı yapmaktır.

1.3 Hipotez

Kafes yapılar, bal peteği yapıları gibi diğer boşluklu yapılara göre hafiflik, yüksek dayanım, titreşimi azaltma ve enerjiyi sönümleme gibi konularda üstünlükleri vardır. Diyabet hastaları için kritik basınç değeri çalışmalarda 200kPa olarak belirlenmiş ve çalışmalarda kullanılmıştır [1]. Sonlu elemanlar yöntemi

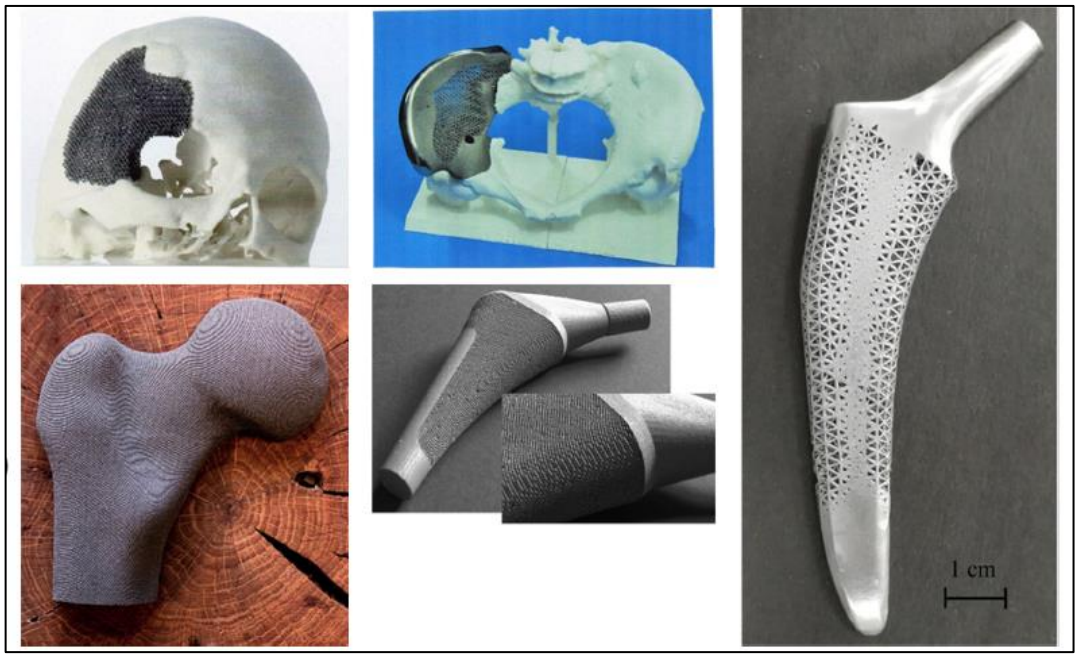
kullanılarak ayak tabanında oluşan gerilmeler hesaplanacaktır. İki aşamalı optimizasyon algoritması kullanılarak ayak tabanı katılığı; ayak tabanında oluşan kritik basınç değerini azaltacak şekilde dağıtılacaktır. Sonlu elemanlar paket programı yardımıyla kafes yapı optimizasyonunu da kullanarak, kafes yapılarında olduğu üç boyutlu yazıcılarda üretilebilecek bir ayakkabı tasarımı oluşturulacaktır.

2
KAFES YAPILAR

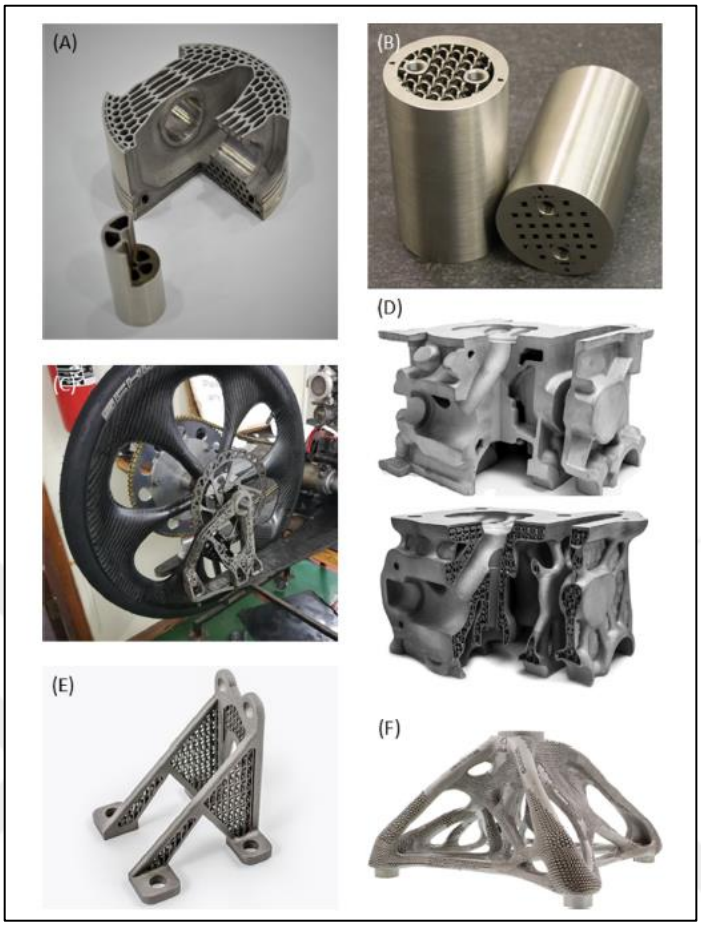
2.1 Kafes Yapıların Tanımı

Kafes yapılar, kirişlerin birbirine bağlı olduğu bir ağsal yapıdır. Yapısal mühendislik dilinde, bir kafes veya uzay çerçevesi, bir dizi kirişin pim bağlantısı veya rijit bağlantı ile bağlanmış, genellikle alüminyum, çelik vb. malzemelerden yapılmış yapılardır. Bu yapıların oluşturulma amacı, mümkün olduğunca az malzeme kullanarak rijit, güçlü ve yük taşıyan yapılar oluşturmaktır [11].

Kafes yapılar, yapı köpüklerinden farklı olarak tekrar eden, düzenli yapılardır. Ashby hücresel malzemelerin bir türü olan kafes yapıları, ölçeğinin kiriş ve kafes yapılar gibi büyük değil; mikro ya da milimetre ölçeğinde olan birim hücreler olarak tanımlamıştır. Kafes birim hücreler mekaniğin klasik metoduyla analizini mümkün kılarken, kafes yapıların malzeme özellikleri ile düşünülmesi gerekir [11].



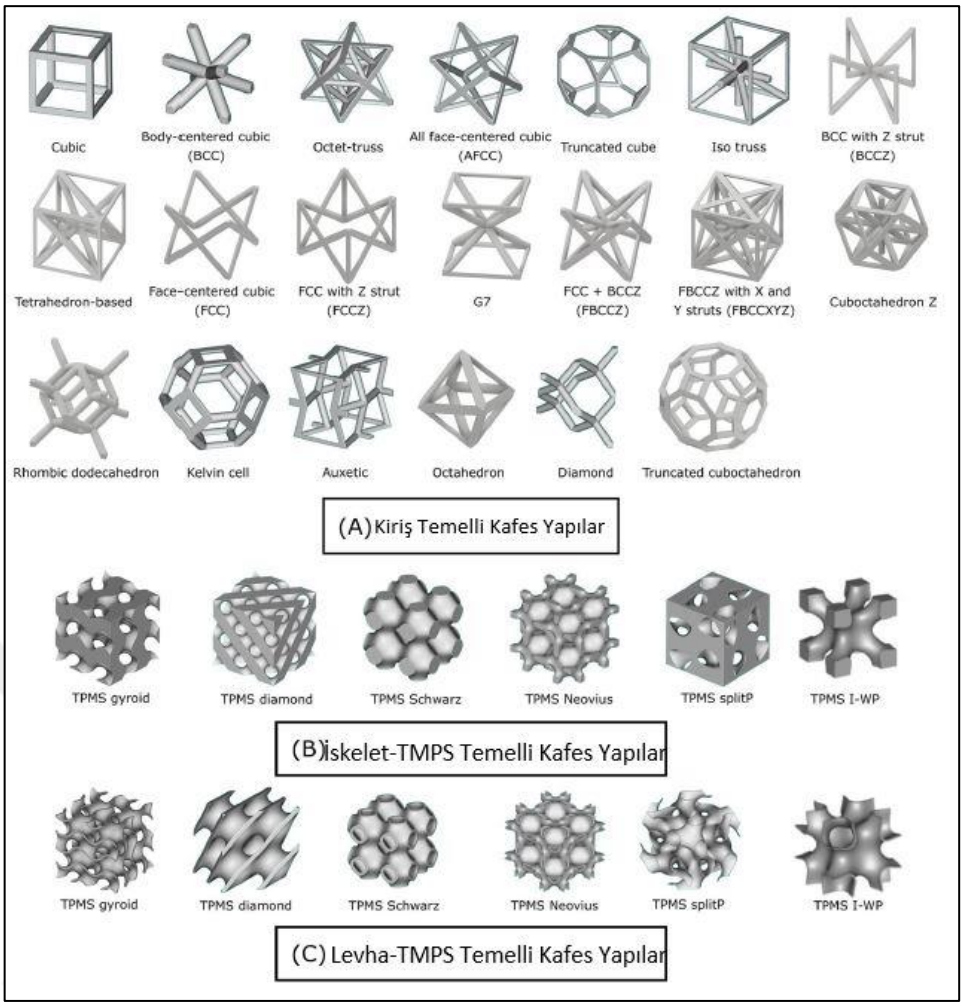
Şekil 2.1 Kafes yapıların kullanıldığı uygulamalar-1 [12]



Şekil 2.2 Kafes yapıların kullanıldığı uygulamalar-2 [12]

2.2 Kafes Yapıların Sınıflandırılması

Kafes yapılar mekanik davranışlarına göre eğilme ağırlıklı (bending-dominated) ve gerinme ağırlıklı (stretch-dominated) olarak sınıflandırılabilir. Bu yapıların başka bir sınıflandırma biçimi ise oluşturuldukları mimari ve geometriye göredir. Bu kriterlere göre kafes yapılar kiriş tabanlı (strut-based), iskelet-TPMS tabanlı (skeletal-TPMS based) ve saç-TPMS tabanlı (sheet-TPMS based) kafes yapılar olarak sınıflandırılabilir [13].



Şekil 2.3 Mimari ve geometrilerine göre kafes yapıların sınıflandırılması [14]

2.3 Maxwell'in Kararlılık Kriteri (Maxwell's Stability Criterion)

Maxwell yapısal rijitliği matematiksel teorisini 1864'te yayınlamıştır. Bu teori rijit kiriş elemanlardaki kararlılığı basit denklemler ile anlatmıştır. Bu denklemler kafes yapılar içinde geçerlidir [15].

Maxwell b kiriş sayısı, j bağlantı adeti olmak üzere, pin bağlantılı kafes yapılar için aşağıdaki denklemleri yayınlamıştır:

İki boyutlu sistemler için;

$$M = b - 2j + 3 = 0 \tag{2.1}$$

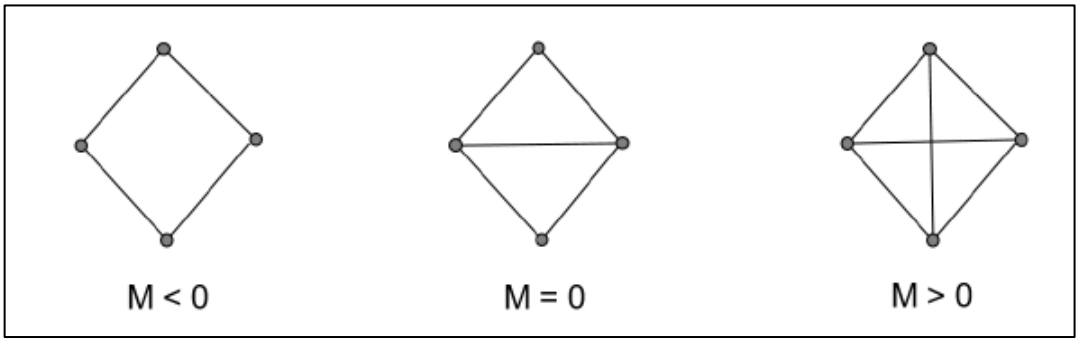
Üç boyutlu sistemler için;

$$M = b - 3j + 6 = 0 \tag{2.2}$$

Eğer M<0’ dan küçük olursa kafes mekanizması 1 veya daha fazla serbestlik derecesine sahiptir. Bu durumda sistem, serbest yönlerde yer değiştirmeye izin verir ve o yönlerde rijitlik ve dayanıma sahip olmaz. Eğer bu durumu kafes yapılar için düşünürsek bağlantılar kilitlidir. Bu durumlarda kafes yapısındaki çubuk elemanlar yüklendiği zaman eğilmeye zorlanır. Yani eğilme ağırlıklı yapı (bending-dominated structure) oluşur [11].

Eğer M=0 olur ise; mekanizma hareketi durur. Yapı yüklendiği zaman, elemanlar çekme ya da basma yükleri taşıyabilirler. Bu durumda yapı gerinme ağırlıklı yapı (stretch-dominated structure)’a dönüşür. Buradan gerinme ağırlıklı yapıların (stretch-dominated structure) yapısal efektiviteleri yüksek iken; eğilme ağırlıklı yapılar (bending-dominated structure) yapısal efektiviteleri düşüktür [11].

Eğer M>0 olur ise; Kiriş elemanlar dışarıdan herhangi bir yükleme olmadan, yapılarından dolayı ön yüklemeye sahip olurlar. Maxwell kriteri kafes yapılarının davranışları hakkında fikir sahibi olmamızı sağlar [11].



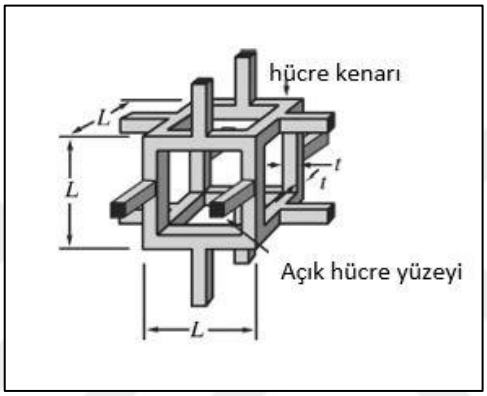
Şekil 2.4 Çeşitli yapıların Maxwell kriteri değerleri [15]

2.4 Eğilme Ağırlıklı Kafes Yapılar (Bending-Dominated Structure) ve Mekanik Özellikleri

Boşluklu yapılar, bağıl yoğunluklarıyla karakterize edilirler. t≪L olmak üzere;

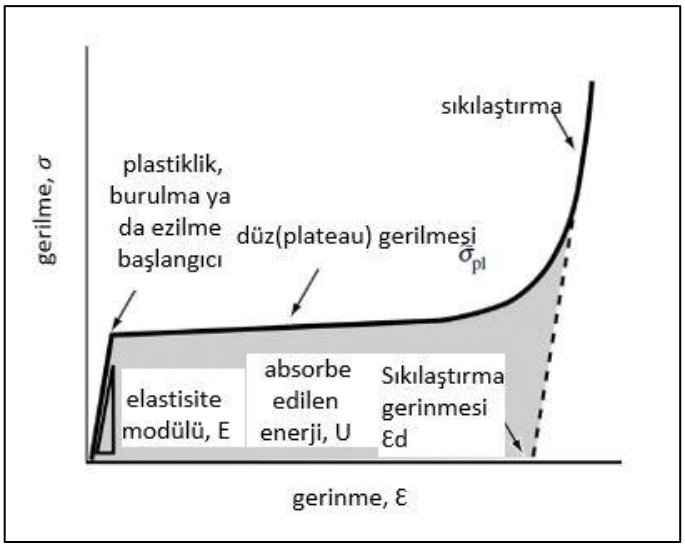
$$\frac{\rho}{\rho_s} \propto \left(\frac{t}{L}\right)^2 \tag{2.3}$$

Burada ρ kafes yoğunluğu, ρ_s hangi malzemeden yapıldıysa o katının yoğunluğu, L hücre boyutu, t hücre kesitinin kalınlığıdır.

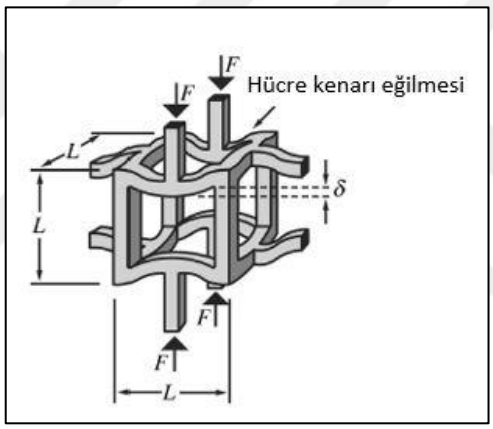


Şekil 2.5 Temsili birim hücre yapısı [11]

Malzeme hücrenin kesitinin plastik olarak eğildiği ya da kırıldığı elastik limite kadar elastik modülü E ile lineer bir ilişki içindedir. Sonrasında gerilmenin dramatik bir şekilde arttığı hücrenin çarpıldığı (densifikasyon gerinmesi, ϵ_d) noktaya kadar yapı neredeyse sabit bir gerilme değeri ile (plato gerilmesi, σ_{pl}) devam eder [11].



Şekil 2.6 Eğilme ağırlıklı yapıların (bending-dominated structure) gerilme-gerinim grafiği ve önemli parametreler [11]



Şekil 2.7 Temsili birim hücre yapısı-yükleme sonrası yapının davranışı [11]

Basma gerilmesi σ hücre kenarları üzerinde $F \propto \sigma L^2$ kuvveti uygulayarak Şekil 2.7'teki gibi hücreyi eğilmeye zorlayarak δ yer değiştirmesine sebep olur. Bu yer değiştirmesinin değeri aşağıdaki gibidir:

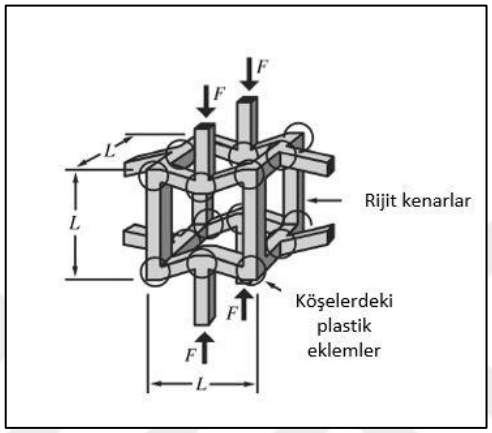
$$\delta \propto \left(\frac{FL^3}{E_s I}\right) \tag{2.4}$$

Burada E_s kirişlerin yapıldığı malzemenin modülüdür ve $I = \frac{t^4}{12}$ hücrenin kare kesit alanının, txt ikinci alan momentidir. Hücrelerde oluşan gerinim $\epsilon \propto 2/L$'dir ve bu sonuçları birleştirsek aşağıdaki denklemde verilen ilişki ortaya çıkar [11].

$$\frac{E}{E_s} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 \tag{2.5}$$

Yukarıdaki denklem hücrelerdeki eğilme ağırlıklı davranışı (bending-dominated behaviour) verir [11].

Benzer yaklaşım yapının çökme yükünü ve plato gerilmesini modellemek içinde kullanılabilir.



Şekil 2.8 Birim hücrenin, hücre kesitinin plastik olarak eğilmesinden dolayı hücrede oluşan davranış [11]

Kuvvet uygulandığında hücrede görülen tam plastik moment aşağıdaki gibidir:

$$M_f = \left(\frac{\sigma_{y,s} t^3}{4}\right) \tag{2.6}$$

Burada $\sigma_{y,s}$ yapının yapıldığı malzemenin akma dayanımıdır. Bu moment gerilme $M \propto FL \propto \sigma L^3$ ilişkisi ile bağlantılıdır. Sonuçlar birleştirildiğinde aşağıdaki ilişki elde edilir:

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{y,s}} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{2.7}$$

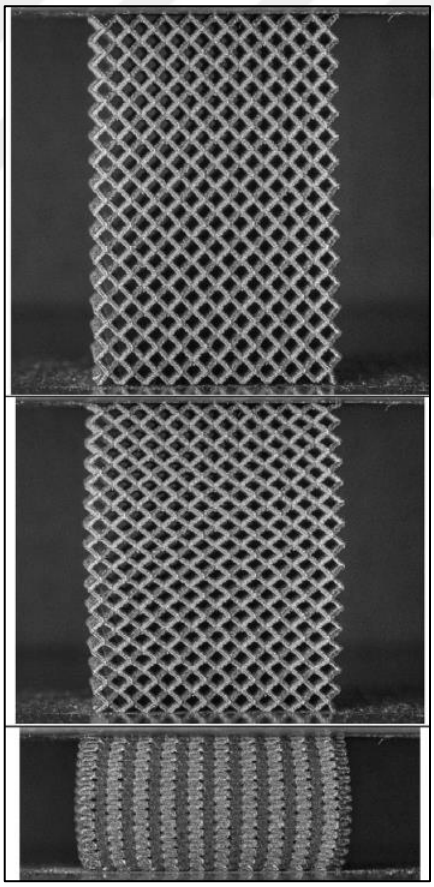
Yapı malzemenin elastomer olduğu durumlarda akmaya uğramadan önce burkulmaya uğrayabilir. Bu durumda elastik burkulma aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{\sigma_{el}}{E_s} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 \tag{2.8}$$

Gerilmenin dramatik bir şekilde arttığı densifikasyon noktası tamamen geometrik bir etkidir. Hücrenin karşıt tarafları temas etmeye zorlanır ve daha çok eğilme oluşur veya bükülme imkansızdır. Densifikasyon gerinimi aşağıdaki formül ile ifade edilebilir:

$$\epsilon_d = 1 - \frac{\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)}{\left(\frac{\rho_{crit}}{\rho_s}\right)} \tag{2.9}$$

Burada ρ_{crit} yapı kilitlendiği zamandaki bağıl yoğunluktur [11].



Şekil 2.9 Eğilme ağırlıklı yapının (bending-dominated structure) yük altında davranışı [16]

2.5 Gerinme Ağırlıklı Kafes Yapılar (Stretch-Dominated Structure) ve Mekanik Özellikleri

Bu yapılar çekme yüklemesine maruz kaldığında; herhangi bir mekanizma olmadığından dolayı yapının kirişleri ilk etapta elastik gerinme şeklinde davranış gösterecektir. Yapı basit bir çekme ile yüklendiğinde, yapıdaki kirişlerin üçte biri çekme taşıyacaktır. Bu yüzden yükleme yönünden bağımsız olarak aşağıdaki ilişki tanımlanabilir:

$$\frac{E}{E_s} \propto \frac{1}{3}\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right) \tag{2.10}$$

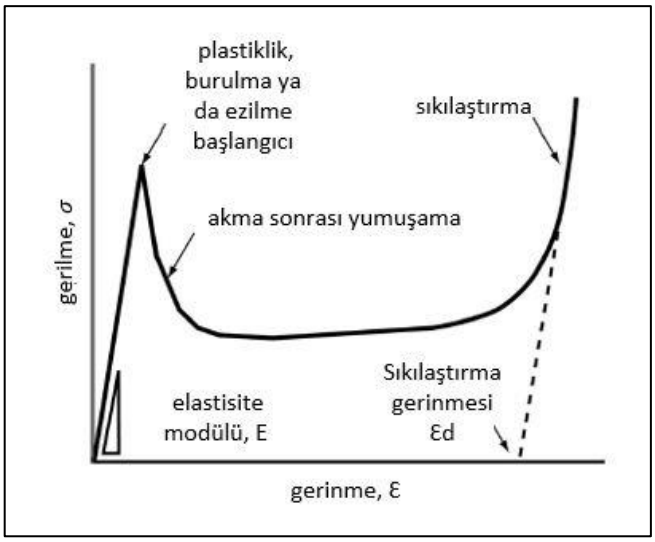
Yukarıdaki ilişki gerinme ağırlıklı davranışı temsil eder [11].

Elastik limite ulaşıldığında; bir veya daha fazla kiriş plastik olarak akmaya, bükülmeye veya kırılmaya uğrayacaktır. Bu durumda ilişki aşağıdaki gibi olacaktır [11]:

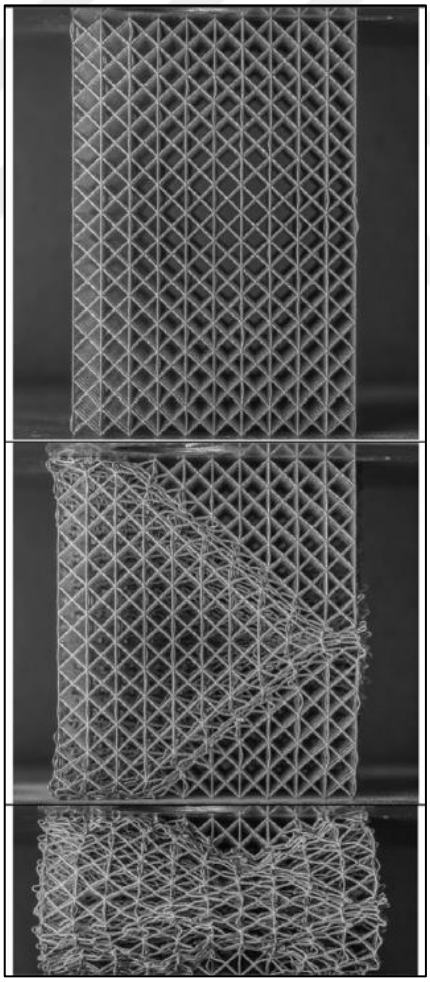
$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{y,s}} \approx \frac{1}{3}\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right) \tag{2.11}$$

Eğer kirişler ince ise akmadan önce burkulmaya uğrayabilir. Burkulma ağırlıklı davranışı aşağıda verilen ilişki ifade eder [11]:

$$\frac{\sigma_{el}}{E_s} \approx \frac{1}{3}\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 \tag{2.12}$$



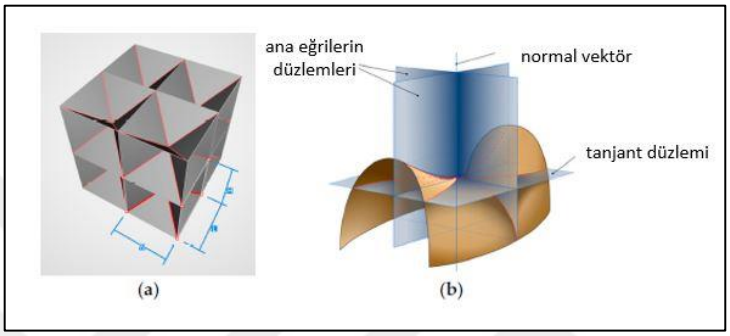
Şekil 2.10 Gerinme ağırlıklı yapıların (stretch-dominated structure) gerilme-gerinim grafiği ve önemli parametreler [11]



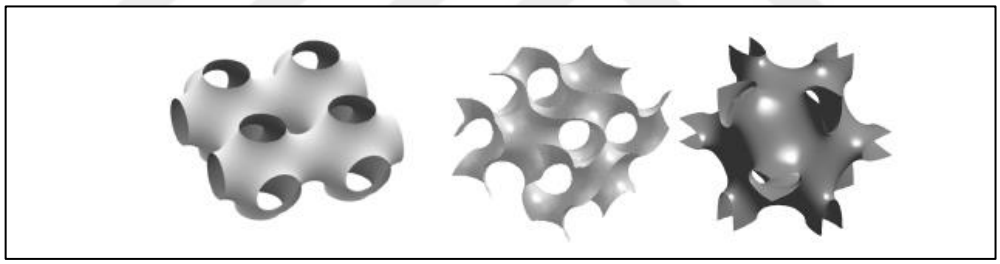
Şekil 2.11 Gerinme ağırlıklı yapının (stretch-dominated structure) yük altında davranışı [16]

2.6 Yüzey Temelli Kafes Yapılar

Bu tip kafes yapılar kiriş elemanlar yerine trigonometrik yüzeyleri kullanarak oluşturulurlar. Bu yüzeylere üçlü periyodik minimal yüzeyler (Triply periodic minimal surfaces) olarak adlandırılırlar. Bu yüzeylerden oluşan yapılar yapıların denklemleri bilgisayar destekli tasarım programları tarafından uygulanabilir. Bu yüzeyler doğadan ilham alınarak oluşturulabilir. Örnek olarak kelebek kanadı, deniz kestanesi, böcek dış kabuğu vb. verilebilir [15].



Şekil 2.12 Yüzey temelli kafes yapıların oluşturulması [15]



Şekil 2.13 Örnek yüzey temelli kafes yapılar [15]

Bu yapılar kullanılarak farklı ihtiyaçlar için daha iyi dayanımlara sahip yapılar elde edilebilir. Bu yapılar ile yapılan çalışmalarda, bazı uygulamalarda kiriş bazlı yapılara göre daha az gerilme konsantrasyonu ve yükü daha iyi yayarak yüksek dayanım sağlama gibi üstün noktaları olduğu görülmüştür [15].

3
OPTİMİZASYON

3.1 Optimizasyonun Matematiksel Tanımı

Optimizasyon yapılan kabuller altında en iyi sonucu bulma süreci olarak tanımlanabilir. Eğer matematiksel olarak optimizasyonu tanımlarsak;

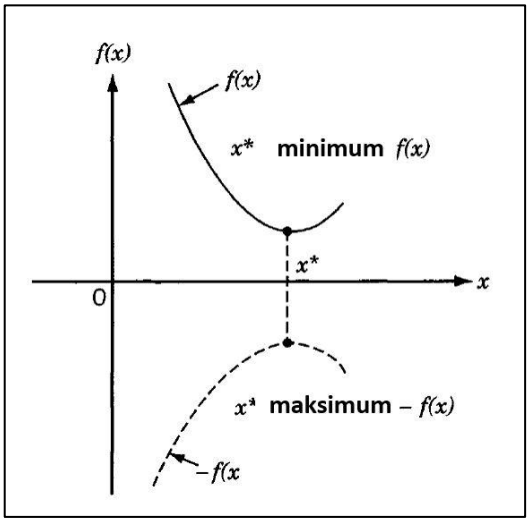
Matematiksel olarak n adet değişken ve m adet denklemin bulunduğu bir durumda 3 adet durum olabilir:

1: m=n olduğu durumda bilinmeyen ve denklem sayısı eşittir. Bu durumda tek bir çözüm vardır.

2: m>n olduğu durumda denklemin çözümü bulunmamaktadır.

3: m<n olduğu durumda denklemin sonsuz sayıda çözümü bulunmaktadır.

Bu sonsuz çözüm arasından en iyisi sonucu bulmak ise optimizasyon olarak tanımlanmaktadır. Fakat en iyi sonuç belli bir kritere göre belirlenmelidir. Bu kriter denklemi maksimum ya da minimum yapma amacıyla olabilir.



Şekil 3.1 Fonksiyonların minimum ve maksimum noktası [17]

Şekil 3.1'de f(x) fonksiyonunu minimum yapan değerler matematiksel olarak ya da algoritmalar yardımıyla bulunabilir. Basit olarak anlatmak gerekirse denklemi sağlayan çeşitli x değerleri denenerek f(x) fonksiyonunu minimum yapan değer bulunmaya çalışılır. Aynı şekilde -f(x) denkleminde de denklemin maksimum olduğu noktayı bulmak içinde çeşitli x değerleri denenir. Şekil 3.1'de f(x) fonksiyonunu minimum yapan ve –f(x) fonksiyonunu maksimum yapan x değeri aynıdır.

3.2 Yapısal Optimizasyon

J.E. Gordon mekanikte bir yapıyı, istenilen yükleri taşıyan malzemelerin birleşimi olarak tanımlamaktadır. Optimizasyon en iyiyi yapmak olarak tanımlanabilir. Bu yüzden yapısal optimizasyon mekanikteki yapılarda bulunan malzemelerin, istenilen yükleri en iyi şekilde karşılamasıdır. En iyiyi gerçekleştirmek için ilk akla gelen iş, yapının ağırlığını minimize etmektir. En iyiyi gerçekleştirmek için akla gelen diğer işler, yapıyı daha rijit ya da burkulmaya karşı daha dirençli yapmaktır. Yapısal optimizasyon problemlerinde kısıtlar genellikle gerilmeler, yer değiştirmeler veya geometridir. Birçok durumda bu kısıtlar amaç fonksiyonu olarak en iyiyi bulmak için ölçüt olabilir. Ayrıca ağırlık, yük rijitlik, gerilme, yer değiştirme ve geometri gibi yapısal performans parametreleri; yapısal optimizasyon problemlerinde değerlerini maksimum veya minimum yapmak için amaç fonksiyonu olarak kullanılabilirler [18].

Yapısal optimizasyon genel olarak tekrarlayan ve sezgisel süreçler ile manuel olarak tamamlanır. Yapısal optimizasyon süreçlerinin ilk adımı, yapı için bir tasarım önermektir. Sonrasında ikinci adım olarak tasarım isterleri sonlu elemanlar yöntemiyle değerlendirilir. Son adım olarak ise; değerlendirmeler sonucu isterler sağlanırsa optimizasyon tamamlanır. Eğer değerlendirmeler sonucu isterler karşılanmaz ise; ikinci ve üçüncü adımlara geri dönülür [18].

Sonuçlar ağırlıklı olarak tasarımcının bilgi birikimine, tecrübesine ve sezgisel olarak problemi anlamasına bağlıdır. Sezgisel olarak tasarımda yapılan değişiklikler genellikle deneme ve yanılma yolu ile yapılır. Bu da çok zaman harcayıcı bir süreçtir ve optimum olmayan tasarımla yol açar [19].

Yapısal optimizasyon problemin her zaman amaç fonksiyonu (f), tasarım değişkeni (x), durum değişkeni (y) 'dir [18].

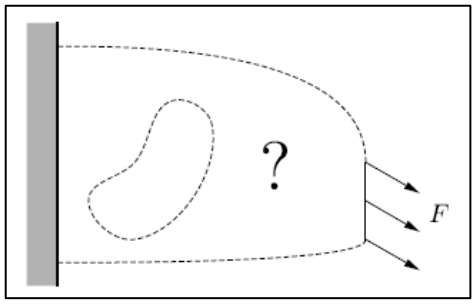
Amaç fonksiyonu (f): Amaç fonksiyonu tasarımı sınıflandırmak için kullanılır. Yani tasarımın ağırlık, hacim, rijitlik, yer değiştirmesi veya gerilme gibi özelliklerini minimize ya da maksimize eder [18].

Tasarım değişkeni (x): Amaç fonksiyonunu minimize veya maksimize etmek isterken bulunan değişkenlerdir. Bu değişkenler optimizasyon süreci boyunca değişkenlik gösterir ve amaç fonksiyonu isterlere göre minimize veya maksimize edildiğinde bulunur [18].

Durum Değişkeni (y): Durum değişkeni bir tasarımda verilen tasarım değişkenine göre yapının verdiği cevap olarak tanımlanabilir. Mekanik sistemlerde bu cevap yer değiştirme, gerilme, gerinim veya kuvvet vb. olabilir [18].

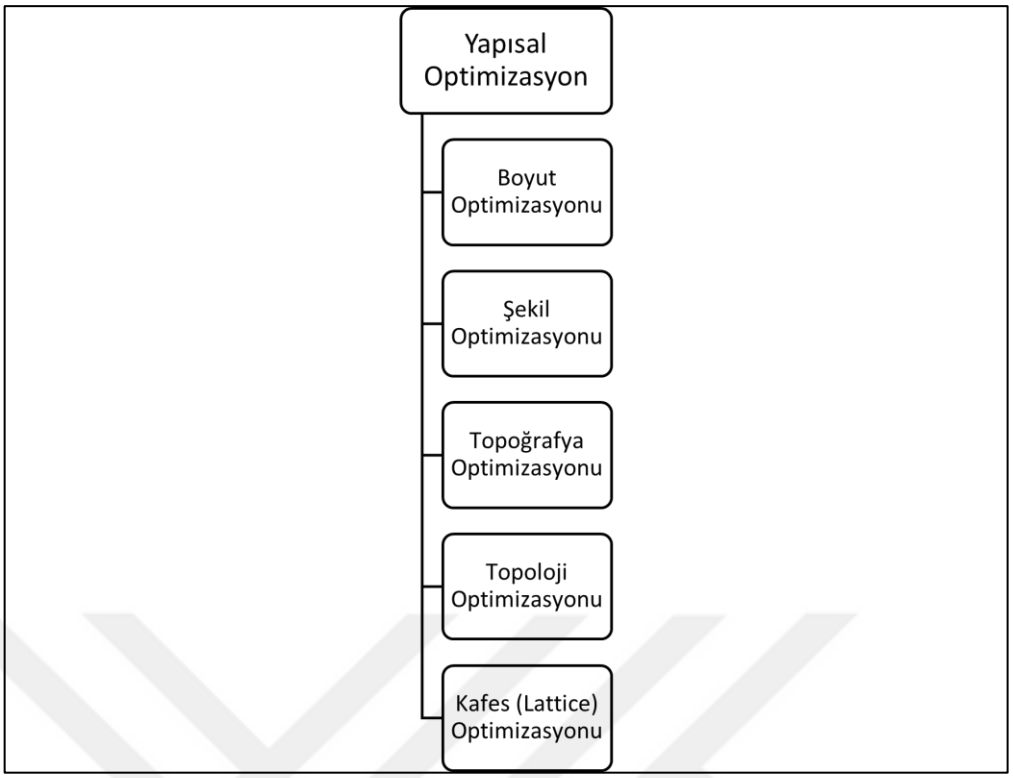
Yapısal optimizasyon problemini aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

Yapısal optimizasyon: tasarım değişkeni (x) ve durum değişkeni (y) kısıtlarına bağlı olarak f(x,y) amaç fonksiyonunu minimize etmek olarak özetlenebilir. Tasarım ve durum değişkenlerine belli aralıklarda kalacak şekilde kısıtlarda verilebilir [18].



Şekil 3.2 Yapısal optimizasyon problemi [18]

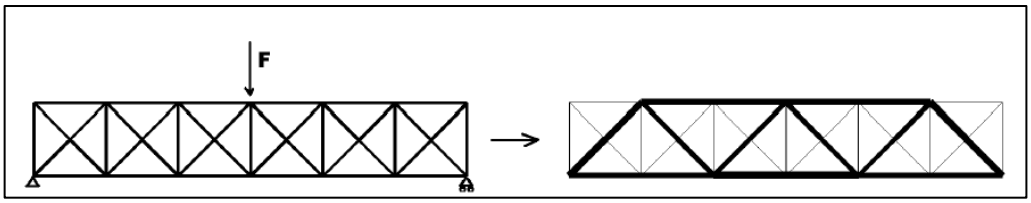
Yapısal tasarım optimizasyon; boyut optimizasyonu, şekil optimizasyonu, topoloji optimizasyonu ve topoğrafya optimizasyonu olarak sınıflandırılabilir [18]. Kafes optimizasyonu da bu sınıflandırmaya dahil edilebilir.



Şekil 3.3 Yapısal optimizasyon çeşitleri

3.2.1 Boyut Optimizasyonu

Boyut optimizasyonu, yapısal optimizasyonun en basit türüdür. Bu optimizasyon türünde yapının şekli bilir ve amaç elemanların boyutlarını değiştirerek yapıyı optimize etmektir. Bir saç levhanın kalınlığı veya bir çubuğun çap ölçüsü tasarım değişkeni olarak düşünülebilir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi çubukların çapları tasarım değişkenidir ve yapı bu çap ölçüsü değiştirilerek verilen sınır şartları altında optimize edilmiştir [19].

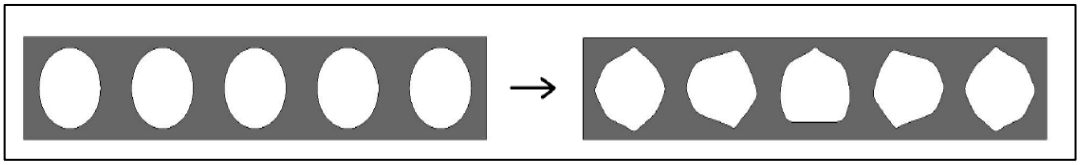


Şekil 3.4 Boyut optimizasyonu [19]

3.2.2 Şekil Optimizasyonu

Şekil optimizasyonu topolojisini değiştirmeden, geometrisini en iyi tasarıma ulaştırmayı hedefler. Boyut optimizasyonunda olduğu gibi yapının topolojisi

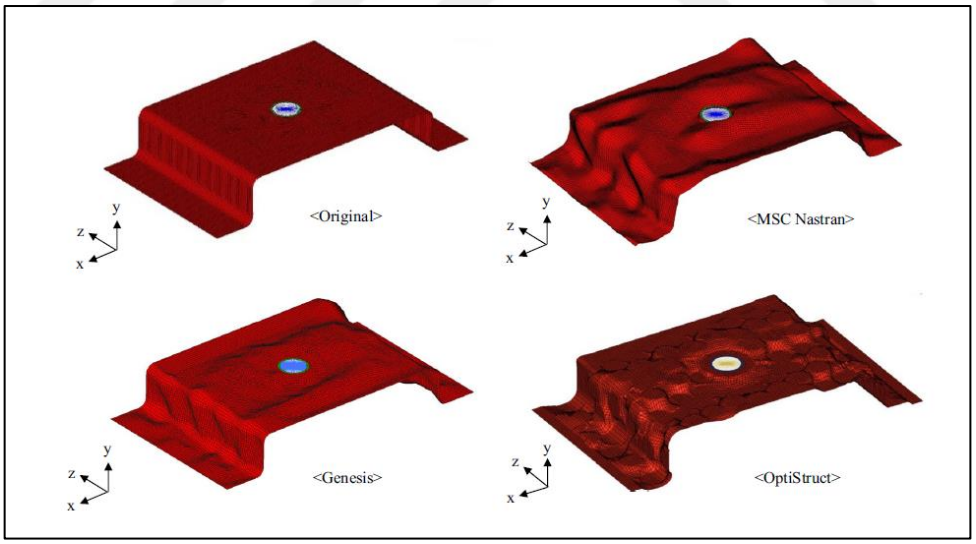
biliniyorsa (delik, kiriş sayısı vb.); şekil optimizasyonu yeni delikler ve kirişler oluşturmaz. Şekil optimizasyonunda parçanın topolojisinde bulunan delik ve kirişlerin şekilleri ve boyutları ile ilgilenir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi yapıya verilen sınır şartları altında şekil optimizasyonu uygulandığında yapıdaki unsurların şekilleri değişmektedir fakat bu deliklerin sayısı değişmemektedir [19].



Şekil 3.5 Şekil optimizasyonu [19]

3.2.3 Topoğrafya Optimizasyonu

Topoğrafya optimizasyonu şekil optimizasyonunun ileri seviye halidir. Tanımlanmış bir tasarım bölgesinde, bölge içindeki şekil deseni oluşturulur. Topoloji optimizasyonu ile topoğrafya optimizasyonu arasındaki fark; topoloji optimizasyonu tasarım değişkenini kullanırken, topoğrafya optimizasyonu şekil değişkenlerini kullanır [20].



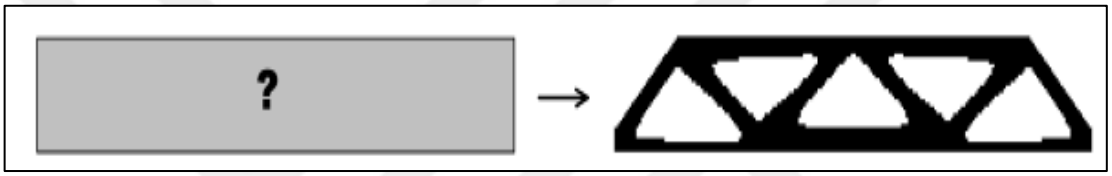
Şekil 3.6 Topoğrafya optimizasyonu [21]

3.2.4 Topoloji Optimizasyonu

Son yıllarda topoloji optimizasyonu popüler hale gelmiştir ve yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Topoloji optimizasyonu yapısal optimizasyonun genel formu olarak nitelendirilir. Topoloji optimizasyonunda ana amaç yapıdaki optimum malzeme dağılımını elde etmektir [19].

Topoloji optimizasyonunda belirlenen tasarım alanında optimum tasarım için gereken yerlere malzeme dağılımı yapılır, gerekmeyen yerlere yapılmaz. Yani sınır koşullarına göre malzeme gerekmeyen yerlerden malzemeyi kaldırır, gereken yerlere malzeme ekler.

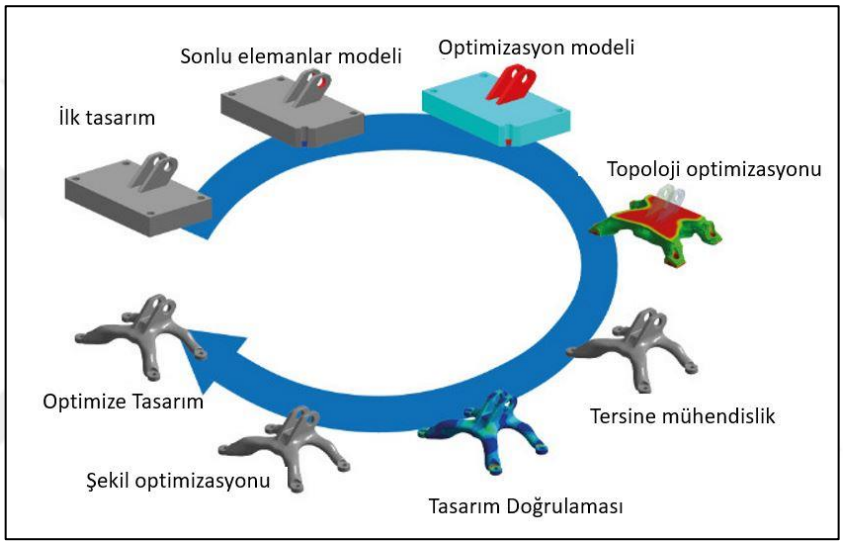


Şekil 3.7 Topoloji optimizasyonu [19]

Topoloji optimizasyonunda nihai şekil veya topoloji bilinmediği gibi delik ve gövde sayısı da belirlenmez. Sonlu elemanlar metodu topoloji optimizasyonu problemlerinde kullanılmaktadır Ana amaç oluşturulan tasarım alanından yola çıkarak boşlukları ve yapıdaki optimum malzeme dağılımını elde etmektir. Bu problemi çözmek için tasarım alanı sonlu elemanlar metodu kullanılarak ayrıklaştırılır ve tasarım alanı ayrık elemanlara (mesh) bölünür. Sonrasında ortaya çıkan problem hangi elemanda malzeme olacağı hangi elemanda malzemeye olmayacağını bulmaya yarayan optimizasyon metodunun çözümünü bulmaktır. Bu problem malzemenin olup olmadığını gösteren 0-1 problemi olarak adlandırılmaktadır. Bu ayrıca isotropik katı veya boş elemanlar (isotropik solid or empty elements)-ISE topolojisi olarak adlandırılan ve elemanlar için iki farklı duruma sahip bir tam sayı problemi olarak nitelendirilebilir [19].

N eleman sayısı olmak üzere farklı kombinasyonları sayısı 2^N adettir. Normal bir sonlu elemanlar modelinde yüzlerce ila binlerce eleman vardır. Bu yüzden bu çeşitlilikteki elemanların olduğu bir sonlu elemanlar modelinde çözüm için

herhangi bir pratik çözüm yoktur. Bu yüzden ISE metodu kullanılarak optimizasyon problemlerinin çözümü için iki ana strateji vardır. Bu metotlar yoğunluk (density) metodu ve homojenizasyon (homogenization) metodudur. Ek olarak genetik algoritmayı kullanan ya da evrimsel yapısal optimizasyon (evolutionary structural optimization)-ESO gibi buluşsal (heuristic) metotlar vardır. Rozvany ESO metodunun tamamen sezgisel, hesaplama açısından oldukça verimsiz, metodolojik olarak rasyonellikten yoksun, bazen oldukça kaotik yakınsama eğrileri ile güvenilmez olduğunu ve endüstriyel uygulamalarda neredeyse hiç kullanılmadığını belirtmiştir [19].



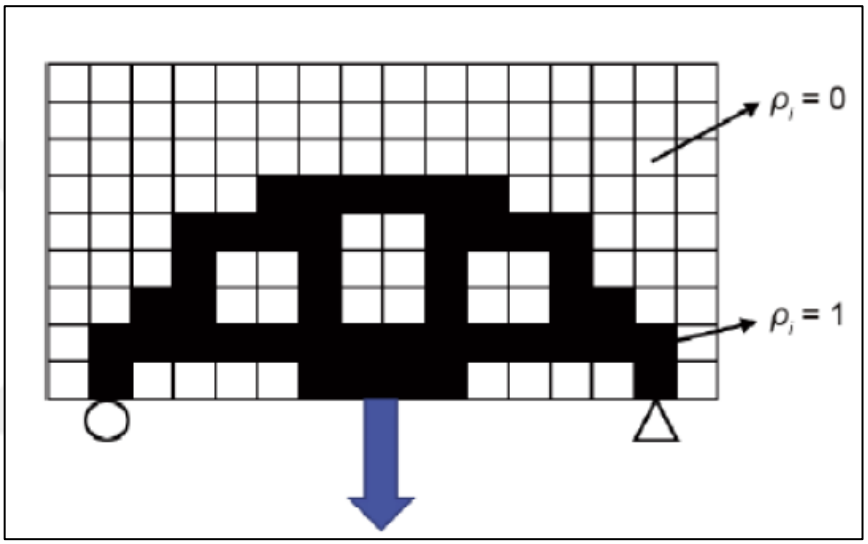
Şekil 3.8 Topoloji optimizasyonu adımları [22]

3.2.4.1 Yoğunluk (Density) Metodu

Problemin çözülebilir olmasının bir yolu malzeme yoğunluğunun 0 ve 1 arasında herhangi bir değer olmasını sağlayarak problemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Burada 0 değeri malzeme yoğunluğunun %0 olması, 1 olması ise malzeme yoğunluğunun %100 olması gibi düşünülebilir. Bu işlemi yaparak amaç fonksiyonu minimum yapmak için kullanılan gradyan temelli optimizasyonunun (gradient based optimization) kullanımına imkan sağlar. Optimizasyon probleminin tasarım değişkeni tasarım alanı üzerinde fonksiyona bağlı olarak değişkenlik gösteren yoğunluktur. Sonlu elemanlar ayrıklaştırmasında yoğunluk

genellikle her elemanda yaklaşık olarak sabittir ve bu tasarım değişkeni olarak yoğunluğun, her elemana tanımlanması demektir [19].

Tasarım olarak üretilebilir bir sonuç elde edebilmek için sonuçların sadece katı(dolu) ya da boş elemanlar olarak elde edilebilmesi gerekmektedir. Fakat elemanların 0-1 arasında herhangi bir değer alabilmesine izin verildiği için sonuçlarda ara değerlere sahip elemanlarda oluşur. Bu ara değerlere sahip elemanların cezalandırma uygulanılarak elemanların 0 veya 1 değerlerine sahip olması sağlanır. Herhangi bir cezalandırma olmadan rijitlik-malzeme değeri lineerdir.



Şekil 3.9 Yoğunluk temelli topoloji optimizasyonu [23]

$$E = \rho E^0 \tag{3.1}$$

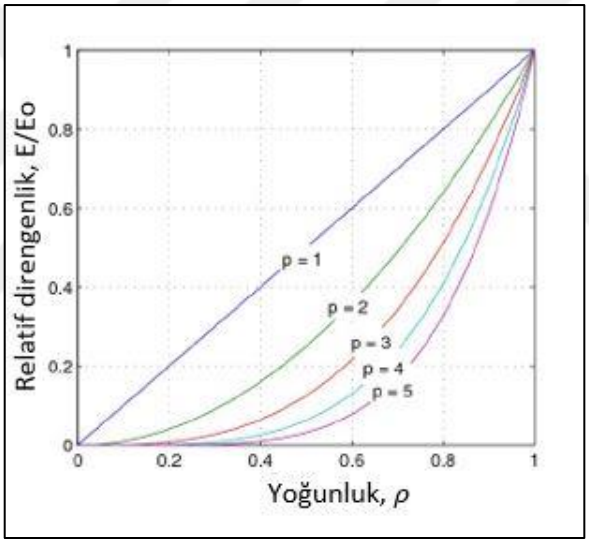
Denklemde bulunan E elastisite tensörüdür ve ρ yoğunluktur. Yoğunluk $0 \leq \rho \leq 1$ arasında değişmektedir. Malzeme rijitliğini bozarak ara yoğunluklara sahip yoğunlukları cezalandırmayı sağlayan popüler metot aşağıdaki denklemde açıklanabilir [19].

$$E = \rho^p E^0, \;\; Kütle = \int_\Omega \rho d\Omega, \quad p > 1 \tag{3.2}$$

Yoğunlukların her bir eleman üzerinde sabit olduğu kabul edildiğinde, yoğunluk-rijitlik ilişkisi, eleman rijitlik matrislerini global rijitlik matrisinde birleştirmeden önce basitçe ölçeklendirerek uygulanabilir [19].

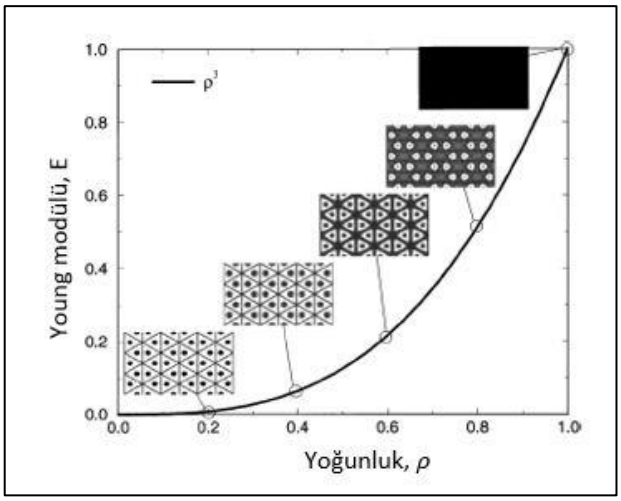
$$K_e = \rho_e^p K_e^0 \tag{3.3}$$

Burada K_e her bir eleman için sertlik matrisini temsil eder ve p cezalandırma faktörü 0'dan büyüktür, genellikle 2-5 arasında bir değer alır. Literatürde cezalandırma ile birlikte yoğunluk(density) metodu, cezalandırma ile birlikte malzeme dağıtım yöntemi(Solid Isotropic Microstructures with Penalization)-SIMP metodu olarak bilinir [19].



Şekil 3.10 Farklı cezalandırma faktörlerine sahip yoğunluğun bir fonksiyonu olarak bağıl rijitlik [19]

Yoğunluk 1 değerine yaklaştığında tam dolu malzeme, 0 değerine yaklaştığında boşlukların olduğu malzeme anlamına gelmektedir. Aşağıda şekilde mikroyapının yoğunluğa göre değişimi verilmiştir:



Şekil 3.11 Mikroyapının değişkenlere göre değişimi [19]

Yoğunluk metodunun iki ana avantajı vardır. Bu avantajlardan birinci eleman başına bir değişken (yoğunluk) olduğundan dolayı ekstra hafızaya ihtiyaç duymaması ve herhangi bir tasarım kısıtlarının kombinasyonları ile kullanılabilmesidir [19].

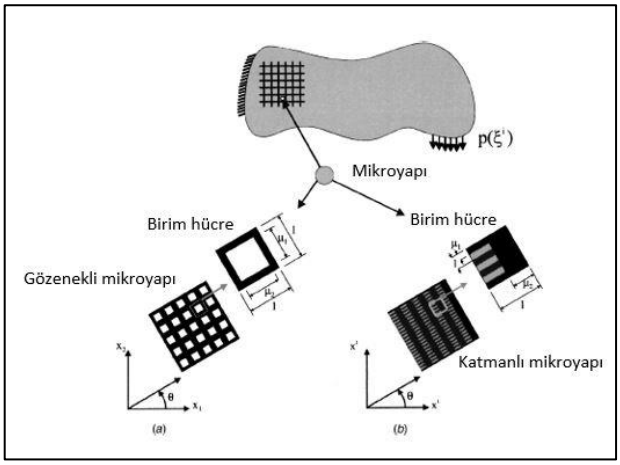
3.2.4.2 Homojenizasyon (Homogenization) Metodu

Homojenizasyon yönteminin ana fikri, malzeme yoğunluğu mikroyapı olarak tanımlamasıdır. Bu mikroyapı sonsuz küçük boşluklara sahip kompozit bir malzemedir. Bu da yoğunluğu %0 ile %100 arasında değişen boşluklu kompozit yapılara sebep olur. Bu mikroyapılardan bazıları kare, deliklere sahip dikdörtgenler veya katmanlı yapılardır. Mikroyapıların makroskobik özellikleri izotropik olmadığından dolayı bir açıya ihtiyaç duyar [19].

Katmanlı yapılar için elastisite analitik olarak bulunabilir. Fakat diğer türdeki mikroyapıların elastisitesini bulmak için sonlu elemanlar metodunu kullanarak farklı boyutlarda numerik olarak hesaplanmaya ihtiyaç duyar. Mikroyapılar kendi başlarına ara yoğunluklar üzerinde bir miktar cezalandırma sağlar, ancak bu genellikle yeterli değildir ve bazı ek cezaların tanımlanması gerekir [19].

Optimizasyon yoğunluk(density) metoduna benzer şekilde yapılır. Problem her eleman üzerinde sabit olarak kabul edilen tasarım değişkenlerine sahip (delik boyutu ve rotasyon) ayrıklaştırılmış sonlu elemanlardır [19].

Bu metodun bir dezavantajı yoğunluk (density) metoduna göre eleman başına daha fazla tasarım değişkenine sahip olmasıdır [19].



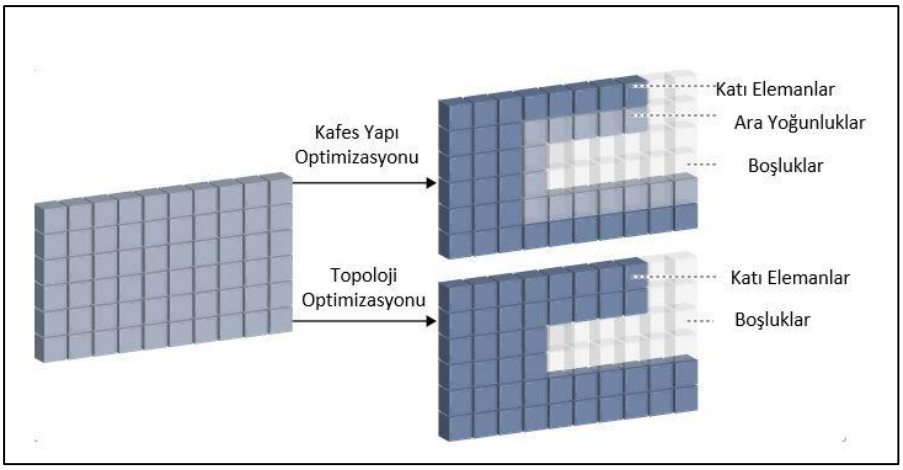
Şekil 3.12 Homojenizasyon metodunda mikroyapılar [19]

3.2.5 Kafes Optimizasyonu

Eklemeli imalat teknolojisinin gelişmesiyle karmaşık yapıların imalatı kolaylaşmıştır. Topoloji optimizasyonu ile elde edilen tasarım verisinin üretilebilir hale getirebilmesi için tasarım, üretim ve analiz arasında birçok iterasyon yapılmasına ihtiyaç vardır [9].

Bu gibi zorlukların üstesinden gelebilmek için kafes optimizasyonu giderek kullanımı yaygınlaşmıştır. Kafes yapıları çeşitli büyüklükte ve şekilde, belli bir düzende oluşmuş yapılardır. Bu yapıları basit çubuk elemanlar ile birleşmiş hücreler topluluğu olarak düşünebiliriz. Kafes yapılar, topoloji optimizasyonu ile elde edilen yapıların aksine üretilebilir çıktı verebilmektedir [9].

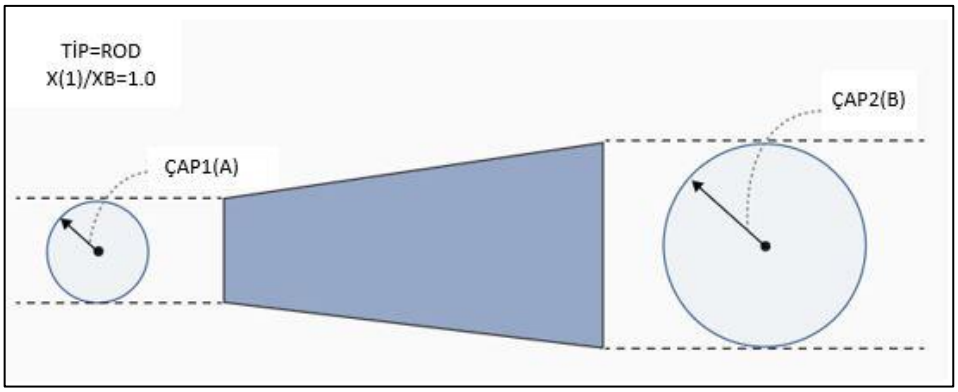
Kafes optimizasyonu topoloji optimizasyonuna benzerdir. Fakat tasarım alanına ara yoğunluğa sahip elemanlarda eklenir. Fiziksel olarak topoloji optimizasyonunda ara yoğunluğa sahip elemanlar bir anlam ifade etmediğinden dolayı, 0 ve 1 değerlerine yani boşluk veya katı malzeme olacak şekilde cezalandırma uygulanarak atanır. Fakat kafes optimizasyonunda ara yoğunluklara sahip elemanlar kafes elemanlar ile değiştirilerek fiziksel olarak temsil edilir [24].



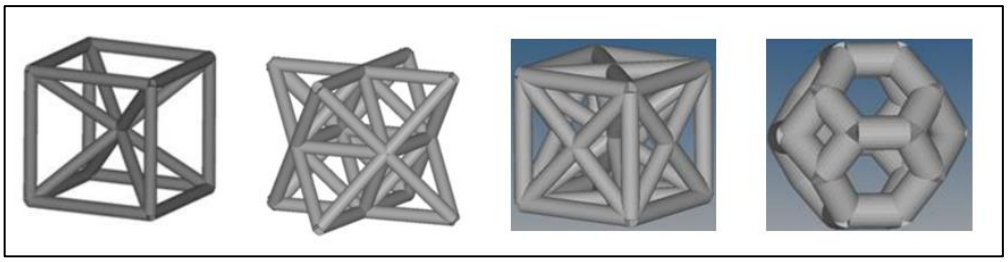
Şekil 3.13 Topoloji optimizasyonu ve kafes optimizasyonu arasındaki fark [24]

Kafes optimizasyonu iki aşamada yapılır:

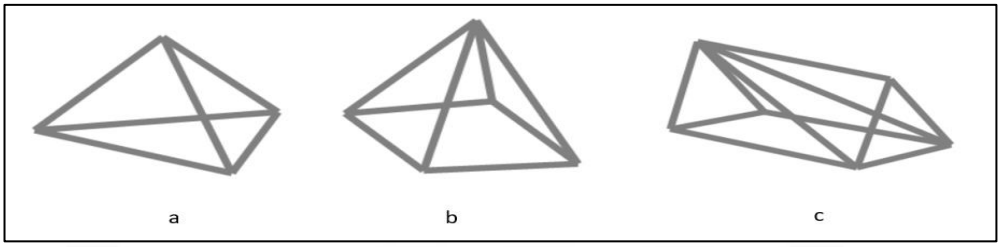
Kafes oluşturulması: İlk aşamada tasarım alanına topoloji optimizasyonu uygulanır. Topoloji optimizasyonu sonucu elemanların yoğunlukları elde edilir. Eleman yoğunlukları elde edildikten sonra ara yoğunluğa sahip elemanlar kafes elemanlar ile değiştirilir. Bu kafes elemanlar çubuk elemanların birleşiminden oluşur ve bu çubuk elemanlar eğimli kiriş formülasyonu ile ifade edilir. Oluşturulacak kafes çeşitleri, sonlu elemanlar programında seçilebilir [24].



Şekil 3.14 Eğimli kiriş formülasyonu [24]

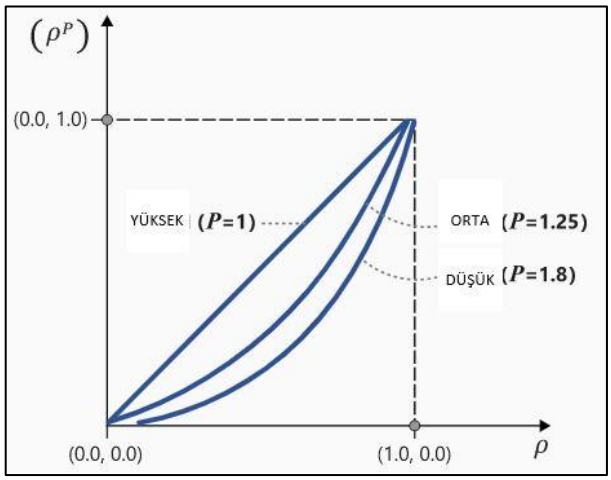


Şekil 3.15 Altı düzlem yüzeyli(hexahedral) elemanlar [24]



Şekil 3.16 Diğer kafes yapıları-a) üç yüzlü eleman (tetrahedral) b) piramit eleman c) beş yüzlü eleman (pendahedron) [24]

Ara yoğunluğa sahip elemanların miktarı uygulanan cezalandırma değerine göre oluşmaktadır. Yüksek boşluk istenildiğinde modelde cezalandırma değeri 1 olur ve yüksek boşluğa sahip, çok sayıda ara yoğunluğa sahip elemanlar oluşur. Orta boşluk istenildiğinde modelde cezalandırma değeri 1.25 olur ve orta yoğunluğa sahip, orta miktarda ara yoğunluğa sahip elemanlar oluşur. Düşük boşluk istendiğinde 1.8 cezalandırma değeri uygulanır ve düşük yoğunlukta ara yoğunluğa sahip elemanlar, yani daha rijit bir yapı oluşturulmuş olur. Bu seçenekler problem özelinde istenilen özelliklere göre seçilebilir [24].



Şekil 3.17 Boşluk seçenekleri arasındaki fark [24]

Oluşturulan kafes yapılara boyut optimizasyonu uygulanması: İkinci aşamada ise oluşturulan kafes elemanlara boyut optimizasyonu uygulanır. Kafes mikroyapısal gösterimi izotropik ya da neredeyse izotropiğe yakın) homojenleştirilmiş özelliklere sahip olduğundan, ilk aşama izotropik malzeme optimizasyonunu temsil eder. Boyut optimizasyonu aşaması, kafes yapısına bir miktar anizotropi dahil etmeyi ve böylece yapıyı daha verimli hale getirmeyi amaçlar. Kafes yapılar birinci aşamanın sonunda elde edildiğinden, kafes yapılarının gerçek davranışlarını tahmin etmek mümkün değildir. İkinci aşamada tasarım kısıtlamaları, gerçek kafes yapısı optimize edildiğinden, optimize edilmiş model doğrudan kontrol edilebilir [24].

Kafes yapılara boyut kısıtları da verilerek eklemeli imalatta üretilemeyecek unsurların önüne geçilebilir. İkinci aşamada kafes yapılara gerilme kısıtı verilebilir.

4
MATERYAL VE METHOD

Bu bölümde sonlu elemanlar modeli için gerekli olan geometrilerin oluşturulması ve sonrasında kritik basınç değerinin altına düşürmeyi amaçlamak için kurulan sonlu elemanlar modelleri anlatılacaktır. Gerekli olan geometriler bilgisayar destekli tasarım programı olan CATIA yardımıyla oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli ve optimizasyon modeli HYPERMESH programı ve OPTISTRUCT çözücüsü kullanılarak hazırlanmış ve sonlu elemanlar modelleri çözülmüştür.

4.1 Ayak ve Ayakkabı Tabanı Geometrilerinin Oluşturulması

Düztaban ayak geometrisi ilk olarak nokta bulutu formatında bilgisayar destekli tasarım programı içine atılmıştır ve sonrasında bu nokta bulutu modeli tersine mühendislik modülü kullanılarak katı geometriye dönüştürülmüştür.

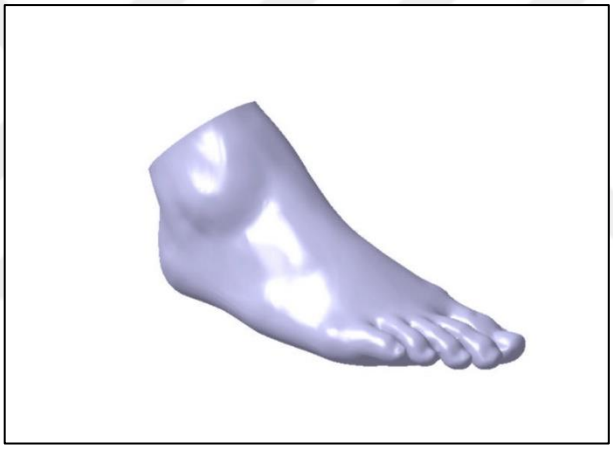
Taranmış ayak modeli, çeşitli alanlarda tasarımcıların modellerini paylaştığı GrabCAD sitesinden alınmıştır [25]. Bu model ilk olarak CATIA programı içine atılmıştır.

Sonrasında tersine mühendislik modeli kullanılarak. stl formatındaki nokta bulutu şeklinde olan ayak modeli sonlu elemanlar programında kullanılabilecek katı modele dönüştürülüp .stp formatında kaydedilmiştir. Taranmış nokta bulut modeli aşağıdaki Şekil 4.1 Taranmış nokta bulutu ayak modeli Şekil 4.1 de verilmiştir.



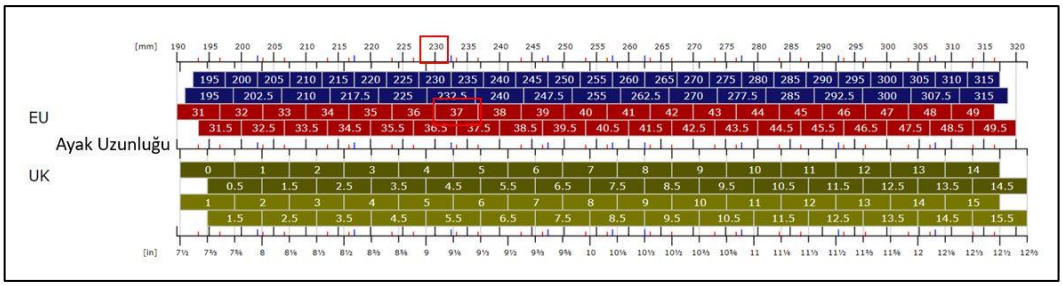
Şekil 4.1 Taranmış nokta bulutu ayak modeli

Taranmış nokta bulutundan katı modele dönüştürülmüş ayak modeli aşağıdaki Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



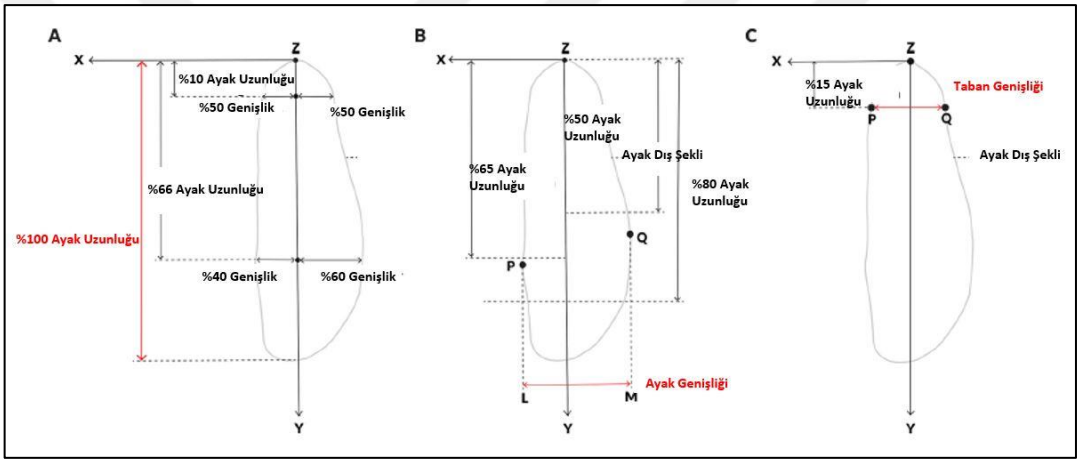
Şekil 4.2 Dönüştürülmüş katı ayak modeli

Taranmış ayak modeli, katı modele dönüştürüldükten sonra ayak boyutuna ve standartlara uygun olarak ayakkabı tabanı geometrisi oluşturulmuştur. Ayak modelinin toplam boyu bilgisayar destekli tasarım programı yardımıyla ölçülmüştür ve 228.756 mm olarak bulunmuştur. Bu değer standart tabloya bakılarak 37 numara olarak belirlenmiştir.



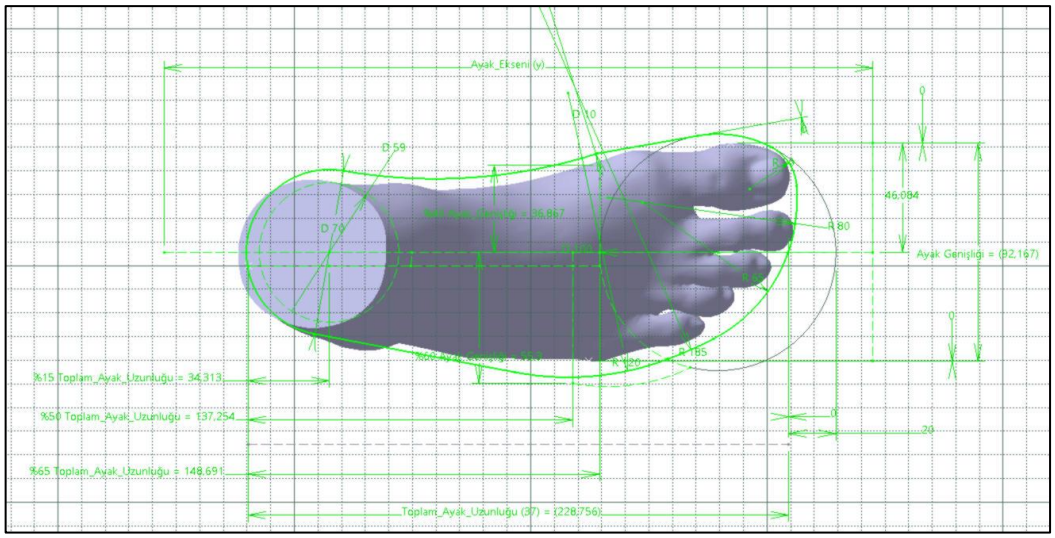
Şekil 4.3 Ayak numarası belirleme tablosu [26]

Ayak uzunluğu belirlendikten sonra, bu ölçüye bağlı olarak referans çalışmalarda belirtilen standartlara uygun olarak ayakkabı tabanının iki boyutlu çizimi oluşturulmuştur. Ayakkabı tabanı standart ölçülerinin belirtildiği tablo aşağıdaki Şekil 4.4'de verilmiştir.



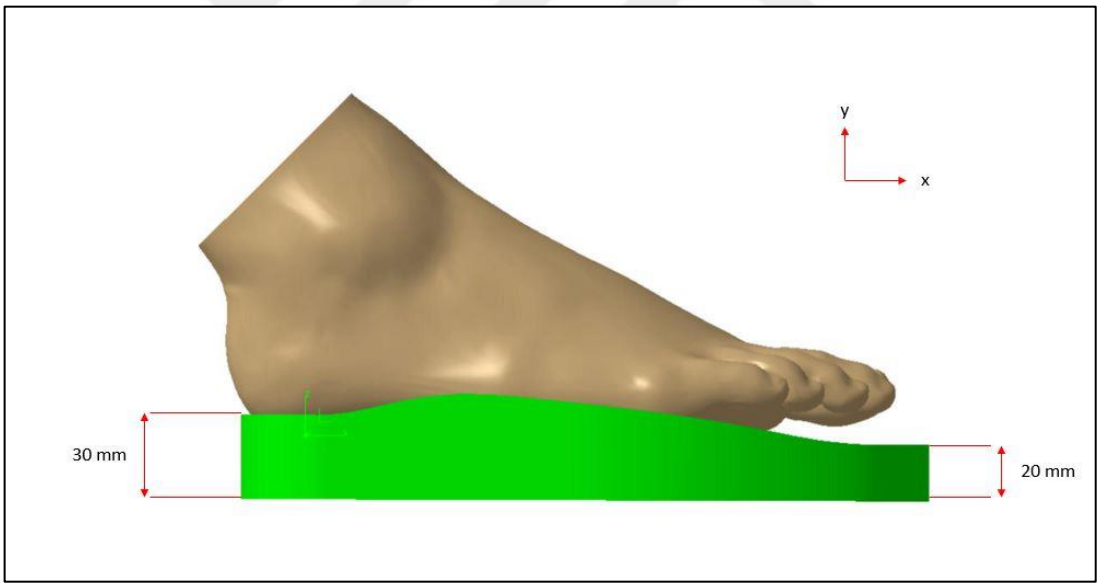
Şekil 4.4 Ayakkabı tabanı standart ölçüleri [27]

Standart ölçülere göre iki boyutlu çizimi yapılmış taslak aşağıdaki Şekil 4.5'deki gibidir.



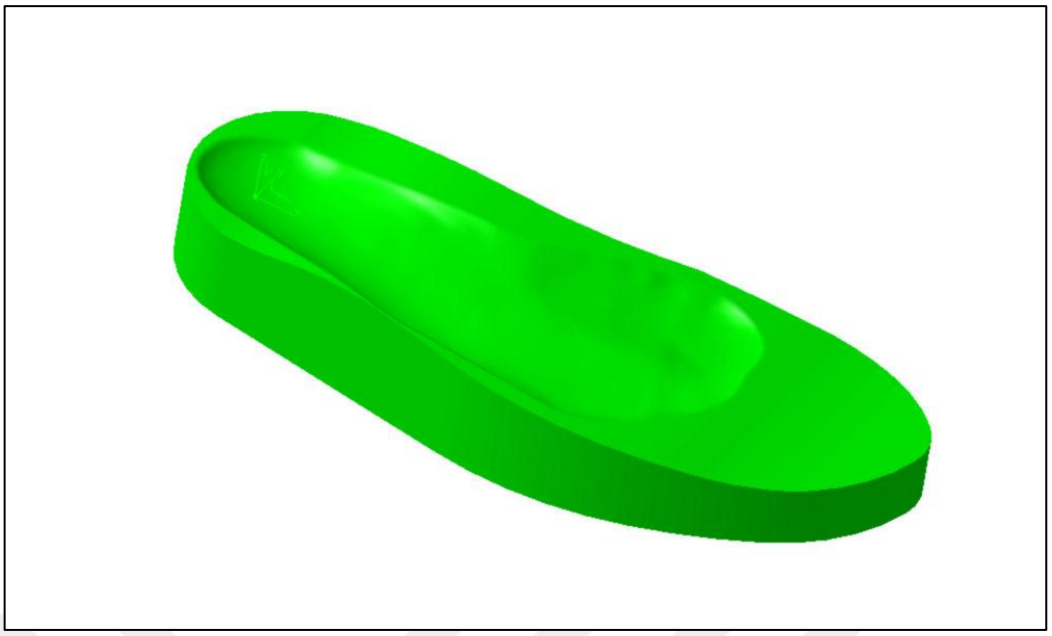
Şekil 4.5 İki boyutlu ayakkabı tabanı çizim taslağı

İki boyutlu çizim taslağı üç boyutlu katı modele dönüştürülmüştür. Ayak tabanı kalınlığı 30 mm ve ayak ucu kalınlığı 20 mm olarak belirlenmiştir. Ayak tabanı ve ayak ucu arasındaki eğri oluşturularak birleştirilmiştir.



Şekil 4.6 Üç boyutlu ayak tabanı temel ölçüler

Üç boyutlu ayakkabı tabanı; ayak modeli ile uyumlu olması için oluşturulan model ayak modelinde çıkarılarak, ayakkabı tabanı üst yüzeyi ayak ile uyumlu hale getiren yüzey elde edilmiştir. Bu işlem sonucunda elde edilen ayak tabanı Şekil 4.7'de gösterilmiştir



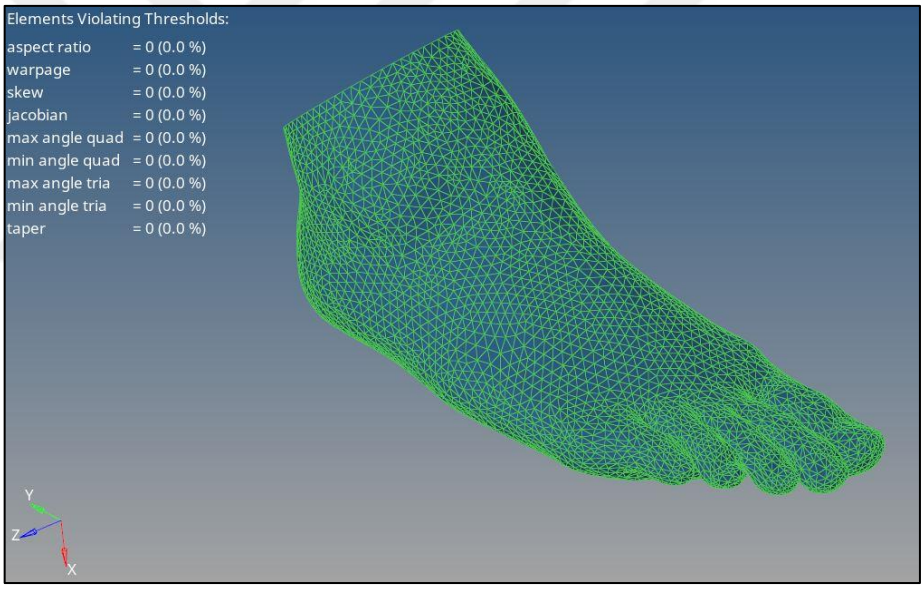
Şekil 4.7 Bilgisayar destekli tasarım programı ile oluşturulmuş ayakkabı tabanı

4.2 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Çalışma kapsamında oluşturulan geometriler HYPERMESH programına .stp uzantılı olarak aktarılmıştır. HYPERMESH programı yardımıyla birçok çözücü ile uyumlu sonlu elemanlar modeli hazırlanabilmektedir. Sonlu elemanlar modeli için çözüm ve optimizasyon için kendi içinde bulunan OPTISTRUCT çözücüsü kullanılmıştır. OPTISTRUCT çözücüsü lineer statik analiz, lineer olmayan analiz, optimizasyon analizleri vb. analizleri çözebilmektedir ve çalışmalarda kullanılmaktadır. HYPERMESH programı içinde geometriler düzenlenebilir, ağ yapısı ve eleman tipleri belirlenebilir, malzeme özellikleri atanabilir, sınır şartları verilebilir ve yük koşulları belirlenerek optimizasyon analizleri yapılabilmektedir. İlk olarak ağ yapısı ve eleman tipleri belirlenmiş ve “mesh” işlemi yapılmıştır. İkinci adım olarak malzeme bilgileri tanımlanmıştır ve sınır koşulları modele tanımlanarak; yükler uygulanarak lineer olmayan analiz modeli oluşturulmuştur. Üçüncü aşamada ise optimizasyon parametreleri belirlenerek ve tanımlanarak optimizasyon çalışması yapılmıştır.

4.2.1 Ağ Yapısı “Mesh” Oluşturulması ve Eleman Seçimi

İlk olarak kaliteli ağ yapısı oluşturabilmek için geometrilerdeki hatalı bölgeler düzenlenmiştir. İlk olarak ayak modelinin ağ yapısı ve eleman seçimi yapılmıştır. Ayak geometrisi görece karmaşık yüzeylere sahip olduğu için ilk olarak iki boyutlu üçgen elemanlar kullanılmıştır ve bu elemanların kalitesi program içindeki kriterlere göre iyileştirilmiştir. Birçok çalışmada ayak modeli için üçgen elemanlar kullanılmıştır. Sonrasında ise bu iki boyutlu elemanları referans alarak üç boyutlu elemanlar ayak modelinde oluşturulmuştur ve yine programdaki kriterlerini referans alarak üç boyutlu elemanların kalitesi iyileştirilmiştir. Eleman boyutu 4 mm olarak belirlenmiştir. Bu eleman boyutu önceki yapılan çalışmasından referans alınarak belirlenmiştir. Bu çalışmada 6-4 mm eleman boyutu arasında 0.5 mm arttırımlarla yakınsama çalışması yapılmıştır [28].

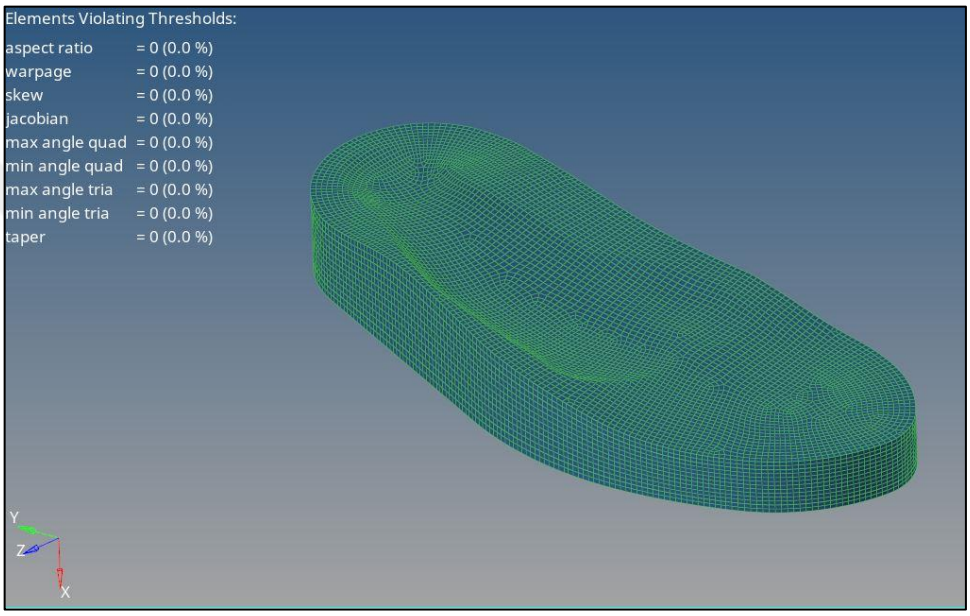


Şekil 4.8 Ayak modeli eleman kalitesi

Tablo 4.1 Ayak modeli eleman sayısı ve özellikleri

	Eleman sayısı	Eleman tipi	Eleman boyutu[mm]
İnsan Ayağı	90067	3D-Tetrahedra	4

Ayakkabı tabanı aynı şekilde sonlu elemanlar programına atıldıktan sonra geometri düzenlemesi yapılmıştır. İlk olarak iki boyutlu “quad” elemanlar atılmış ve eleman kalitesi referans değerlere göre iyileştirilmiştir. Yapılan birçok çalışmada ayakkabı tabanı için “quad” elemanlar kullanılmıştır. İkinci adım olarak iki boyutlu elemanları referans alarak üç boyutlu “quad” elemanlar oluşturulmuştur ve aynı şekilde referans değerlere göre eleman kalitesi iyileştirilmiştir. Eleman boyutu 2 mm olarak belirlenmiştir. Benzer çalışmalarda ayakkabı tabanı için eleman boyutu 3 mm olarak kullanılmıştır [29].



Şekil 4.9 Ayakkabı tabanı eleman kalitesi

Tablo 4.2 Ayakkabı tabanı modeli eleman sayısı ve özellikleri

	Eleman sayısı	**Eleman tipi**	**Eleman boyutu[mm]**
Ayakkabı tabanı	75075	3D-Hexahedra	2

4.2.2 Ayak ve Ayakkabı Tabanı Seçimi ve Özellikleri

İnsan ayağını modellemek için birçok çalışma yapılmıştır. Detaylı modellenmek istenildiğinde kemik yapısı, yumuşak doku vb. özellikler ayrı ayrı malzeme atanıp

modellemeler yapılmıştır. Ayakkabı tabanı tasarımı üzerine yapılan çalışmalarda analizi basitleştirmek için kemik bir yapı olarak düşünülmüş ve modellenmiştir. Ayakkabı tabanı için malzeme, termoplastik poliüretan malzeme olan TPU95A olarak düşünülmüştür. Bu malzeme kauçuk benzeri bir malzemedir ve üç boyutlu yazıcılar ile yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. TPU95A hiper elastik bir malzemedir fakat optimizasyon gereksinimlerinden dolayı analizlerde elastik özellikleri kullanılmıştır. Ayak ve ayakkabı tabanına ait malzeme özellikleri aşağıdaki Tablo 4.3'de belirtilmiştir.

Tablo 4.3 Kullanılan malzemeler ve özellikleri

	Elastik Modülü [MPa]	**Possion Oranı [-]**	**Referans**
İnsan Ayağı	7300	0.3	[30]
Ayakkabı Tabanı	30	0.46	[31]

4.2.3 Sınır Şartları

İlk olarak analizlerde kullanılacak yük değeri belirlenmiştir. Bu değer belirlenirken en kötü durum göz önüne alınarak hesaplama yapılmıştır. Ayak modeli, vücut kitle endeksi kritik değerin üzerinde olan kadın bir bireye ait olduğu kabul edilmiştir. Bireyin 1.65mm boyunda ve 90 kg ağırlığında olduğu kabulü yapılmıştır ve vücut kitle indeksi hesabı aşağıdaki gibidir. Bireyin vücut kitle endeksi 30 değerinin üzerinde olduğunda obezite olarak kabul edilmektedir [32].

$$Vücut\ kitle\ endeksi = \frac{(Ağırlık)[kg]}{(Boy)^2[m^2]} = 30 \tag{4.1}$$

$$Vücut\ kitle\ endeksi = \frac{(90)[kg]}{(1.65)^2[m^2]} = 33\ [\frac{kg}{m^2}] \tag{4.2}$$

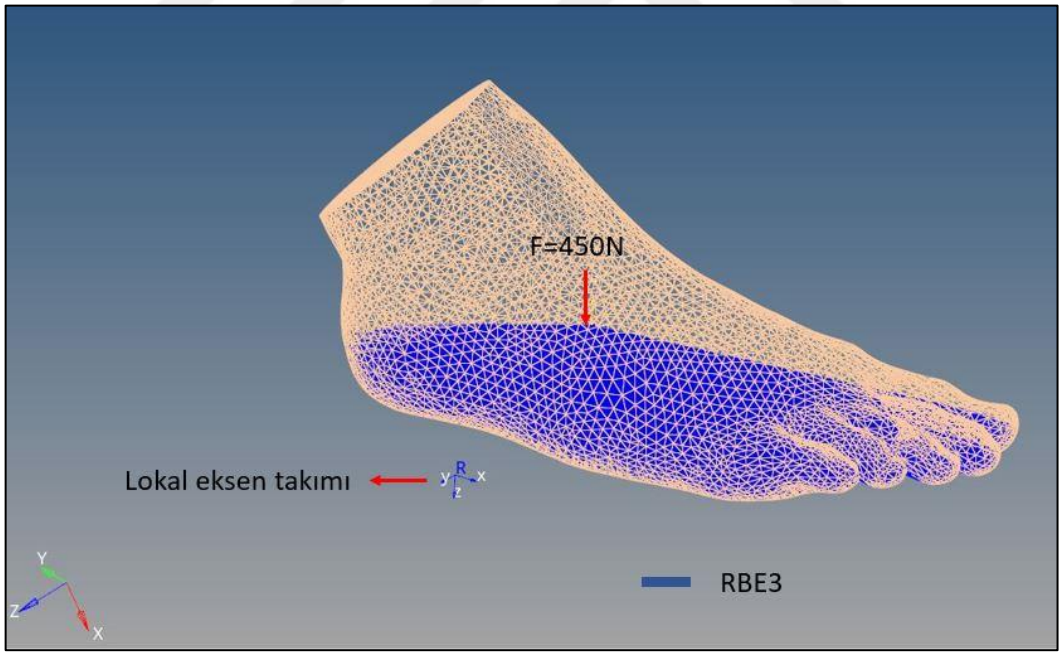
Analizde tek bir ayağa yük uygulanacağı için 90 kg yük yarıya indirilerek modelde uygulanmıştır. Yük benzer çalışmalarda ayağın ağırlık merkezinden uygulanarak

yapılmıştır. 450 N ‘luk ayağın ağırlık merkezinden “rbe3” bir boyutlu eleman kullanılarak uygulanmıştır. “rbe3” elemanı genellikle yük aktarımı yapılan durumlarda kullanılırlar. Özelliği ise uygulanan noktaların yüke göre olan uzaklığına bağlı yükü dağıtmasıdır ve sistemde fazladan rijitlik eklemez. Ayak ağırlık merkezi bilgisayar destekli tasarım programı yardımıyla belirlenmiştir ve aşağıdaki Tablo 4.4’de belirtilmiştir.

Tablo 4.4 Ayak ağırlık merkezi koordinatları

	x [mm]	**y [mm]**	**z [mm]**
Ayak Ağırlık Merkezi	12.539	9.066	-73.189

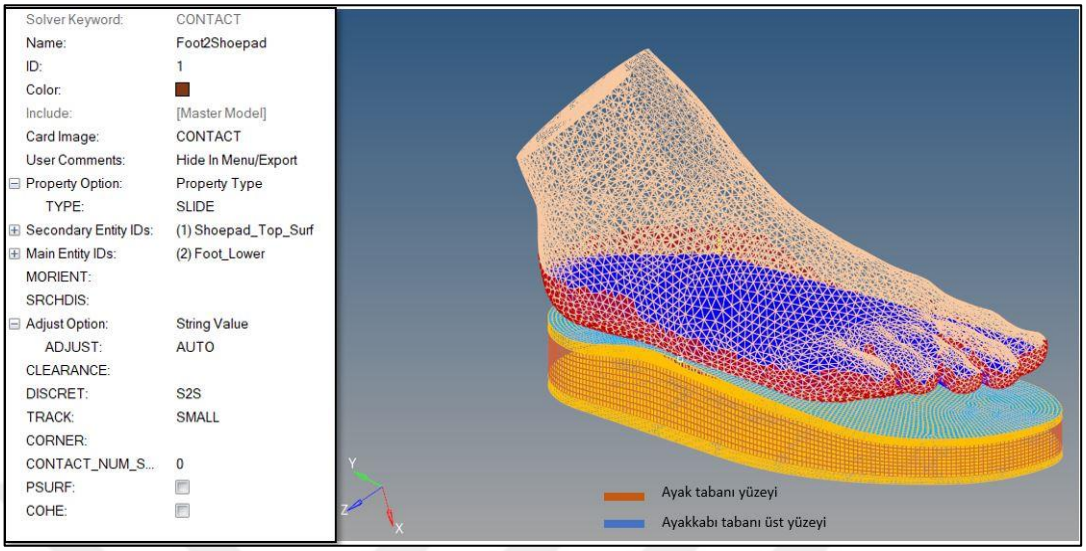
450 N büyüklüğe sahip yük lokal eksen takımına göre +z yönünde uygulanmıştır ve yukarıda belirtildiği gibi “rbe3” 1 boyutlu elemanı aracılığıyla ayak tabanına dağıtılmıştır.



Şekil 4.10 Kuvvet uygulanması ve dağıtılması

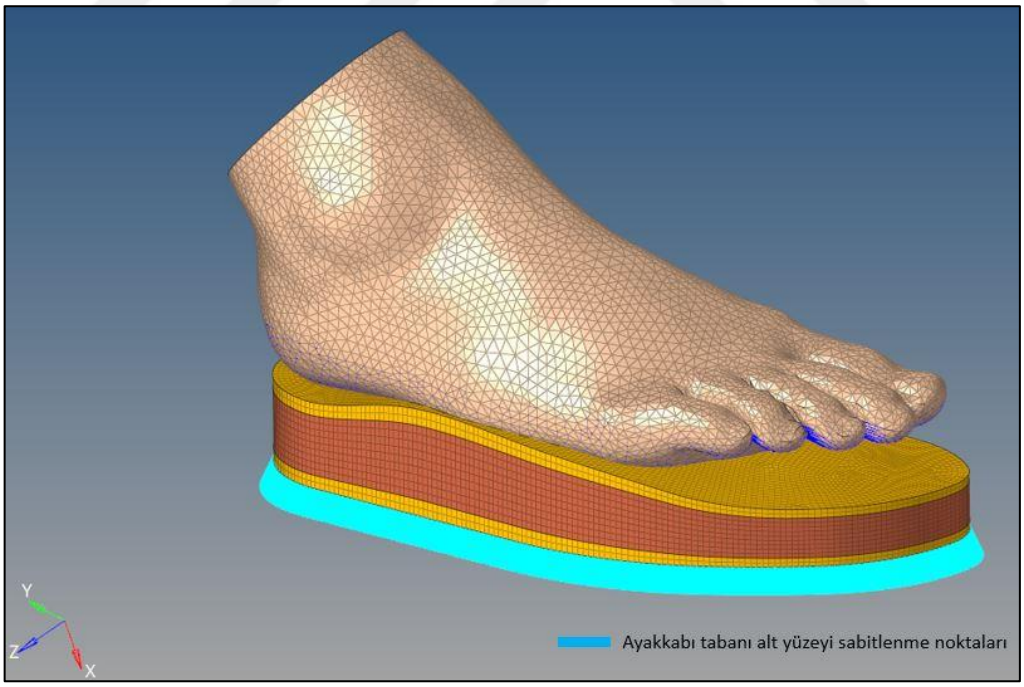
Ayak tabanı yüzeyi ile ayak tabanı üst yüzeri arasında yüzey-yüzey “surface to surface” kontak tanımlaması yapılmıştır. Kontak tipi ve özellikleri optimizasyon gereksinimlerine göre belirlenmiştir. “Large displacement non linear analysis”

kategorisine giren kontak tipleri optimizasyon çalışmaları için uygun değildir. Kontak parametreleri tipi ve özellikleri aşağıdaki Şekil 4.11'deki gibidir.



Şekil 4.11 Kontak yüzeyleri ve özellikleri

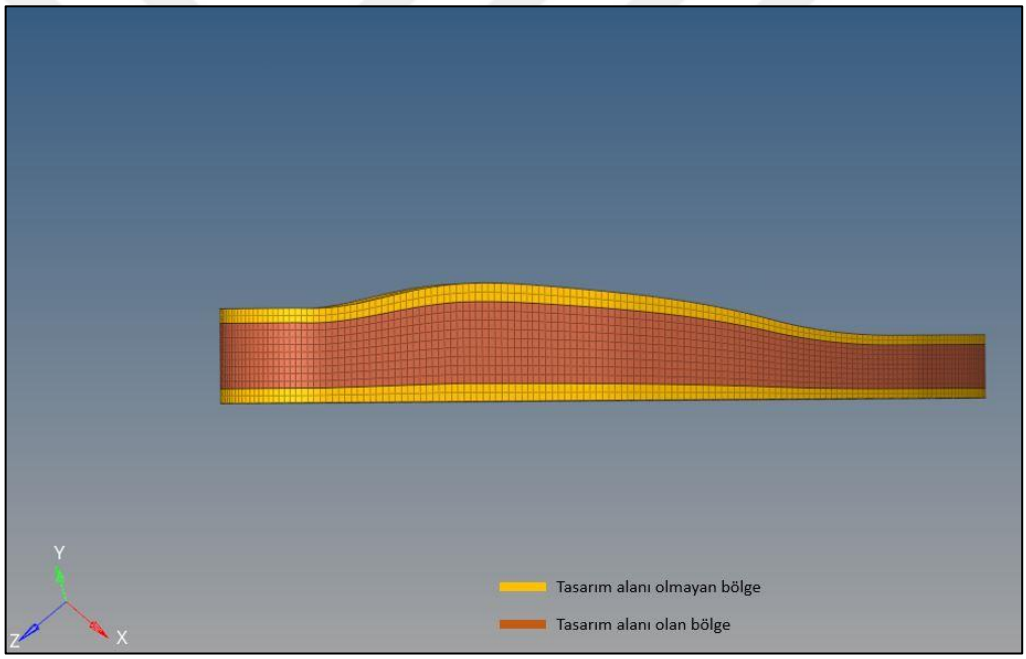
Son olarak ise ayakkabı tabanı alt yüzeyi "spc" elemanlar ile tüm yönlerde hareketi kısıtlanarak sabitlenmiştir.



Şekil 4.12 "Spc" uygulanma noktaları

4.2.4 Tasarım Alanı ve Optimizasyon Parametreleri

Optimizasyon analizi için ilk olarak optimizasyon yapılacak bölgeler ve optimizasyon dışı olacak bölgeler belirlenmiştir. Ayakkabı tabanının üst yüzeyi ayak ile temas halinde ve zemin ile temas halinde bulunan alt yüzeyi 4 mm kalınlığında olacak şekilde tasarım dışı olan bölge olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi ise bu bölgelerde optimizasyon sonrası malzeme boşaltmasının olmaması gerekliliğidir. Bu kısımları fonksiyonel bölgeler olarak adlandırabiliriz. Bu iki bölge arasında kalan kısım; bireyin statik ve ayakta olduğu durum için tasarım hacmi olarak belirlenmiştir. Bu bölge optimizasyon yapılacak bölge olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar modelinde belirlenen tasarım hacmi ve tasarım hacmi olmayan bölgeler Şekil 4.13'de belirtilmiştir.



Şekil 4.13 Ayakkabı tabanı tasarım ve tasarım alanı olmayan bölgeler

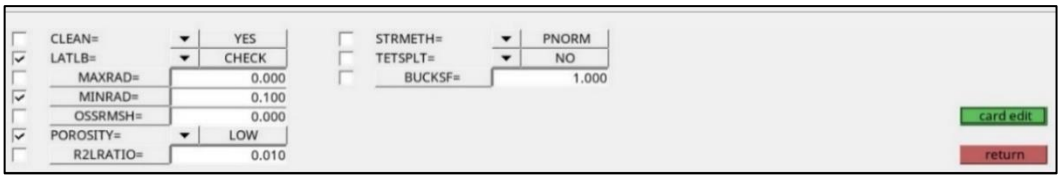
Optimizasyon parametreleri istenilen gereksinimleri sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Optimizasyon amacı minimum kompliyans (maksimum rijitlik) olarak belirlenmiştir. Optimizasyon amacının bu şekilde belirlenmesinin sebebi optimizasyon sonrası oluşacak yapının maksimum rijitlik vermesi istenmesi sebeplidir. Optimizasyon cevapları kompliyans, hacim oranı "volume fraction" ve basınç kısıtı gereken durumlarda temas basıncı olarak belirlenmiştir.

Optimizasyon kısıtları ise hacim oranı 0.3 ve 0.5 arasında olacak şekildedir. Bu değerler yapılan optimizasyon çalışmalarda kullanıldığı ve gerçek durumu daha iyi yansıttığı için seçilmiştir. Temas basıncı kısıtı ise optimizasyon sonuçlarına göre istenildiğinde optimizasyon modeline eklenmiştir. Optimizasyon sonrası ayak tabanında oluşan kritik basınç değeri 200 kPa değerinin üzerinde kaldığı durumlarda temas basıncı 190 kPa, 170 kPa ve 150 kPa olacak şekilde modele uygulanmıştır ve lineer olmayan bir sistem cevabı optimize edilmiştir. Yapılan analiz çalışmalarında kullanılan optimizasyon parametreleri ve özellikleri aşağıdaki gibi Tablo 4.5'deki gibi özetlenebilir.

Tablo 4.5 Optimizasyon parametreleri ve özellikleri

Optimizasyon amacı "objective"	Min (kompliyans "compliance")		
Optimizasyon cevabı " optimization response"	Hacim oranı "volume fraction"	Kompliyans "compliance"	Temas basıncı "contact pressure"
Optimizasyon kısıtı "optimization constraint"	0.3-0.5		190 kPa, 170 kPa, 150 kPa

Kafes yapısı optimizasyonunda kullanılan parametreler aşağıdaki Şekil 4.14 gibidir. Bu parametrelerdeki "porosity" seçeneği ile ara yoğunluğa sahip az malzeme oluşur ve kafes yapı optimizasyonlarında "low" seçeneği önerilmektedir ve bu sebepten dolayı bu seçenek seçilmiştir. "min rad" ve "max rad" seçenekleri ile kafes yapılarında oluşan silindirlerin en küçük ve en büyük çapları belirlenebilir. Bu seçenek üç boyutlu yazıcıların üretim yeteneğine göre belirlenebilir. Buna ek olarak sonlu elemanlar programı optimizasyon sonucunda oluşan çok küçük boyutlara sahip kafes yapılarını optimize ederek modelden silmektedir.



Şekil 4.14 Kafes yapısı optimizasyonu parametreler

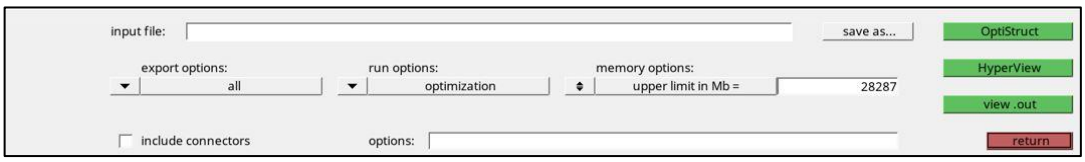
5
SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARI

Sonlu elemanlar modeli hazırlandıktan sonra “optistruct” modülü yardımıyla çözülmeye başlanır. Bu modül içinden sonlu elemanlar analizi, optimizasyon analizleri gibi farklı çeşit analizler yapılabilmektedir. İlk olarak analiz program “.hm” uzantılı sonlu elemanlar modelini “.fem” uzantılı formata çevirerek çözücü için gerekli dosyayı oluşturur. Çözüm işlemi tamamlandıktan sonra “.h3d” uzantılı dosyayı oluşturur. Bu dosya HYPERVIEW modülüne atılarak sonuçlar incelenir. Sonlu elemanlar analizi, özellikleri aşağıdaki Tablo 5.1’daki gibi olan bilgisayar yardımıyla çözülmüştür.

Tablo 5.1 Çözüm için kullanılan bilgisayar özellikleri

İşlemci	11th Gen Intel® Core™ i7-11800H @2.3GHz
RAM (GB)	16
Sistem Türü	64 bit işletim sistemi

Çözüm sekmesi arayüzü aşağıdaki Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Çözüm işlemlerinin başlatıldığı sekme

Kafes optimizasyonu iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada topoloji optimizasyonu yapılır ve ara yoğunluğa sahip elemanlar kafes yapısına dönüştürülür. Kafes yapılar ilk aşamanın sonunda oluşturulduğu için ikinci aşamada sadece kafes yapıların boyut optimizasyonu yapılır ve verilen girdilere göre optimizasyon tamamlanır ve çok küçük boyuttaki kafes yapıları silinir.

İlk olarak üç farklı kafes yapısı için optimizasyon analizleri yapılmıştır ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.1 Genel Kafes Yapısı Optimizasyonu Süreçleri

İlk optimizasyon öncesi topoloji sekmesinde optimizasyon yapılacak bölge seçilir ve kafes optimizasyonu yapılacak ise “lattice optimization” seçeneği seçilir. Sonrasında “lower bound”, “upper bound” ve “stress value” seçenekleri seçilerek gerekli değerler girilir. Bu değerlerden “stress value” değeri TPU95A malzemesinin young modülü (elastisite modülü)’dür. “Lower bound” ve “upper bound” değeri yapılan önceki çalışmalar ve tavsiye edilen değerler göz önünde bulundurularak seçilmiştir. “Lower bound” değeri altında yoğunluğa sahip elemanlar boşluk “void” olarak değerlendirilir ve “upper bound” değeri üstündeki elemanlar ise katı “solid” eleman olarak değerlendirirler. Bu iki değer arasında olan elemanlar ise ara yoğunluğa sahip elemanlar olarak değerlendirilirler. Bu değerlerin belirlendiği sekme gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Topoloji ve kafes yapısı parametrelerinin tanımlandığı sekme

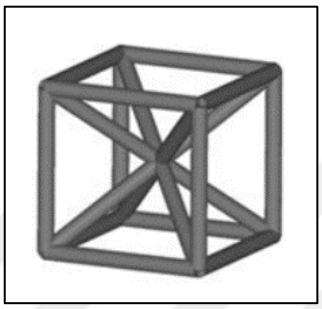
Bu işlemler tamamlandıktan sonra ilk kademe optimizasyon çözümü için analiz koşturulur ve “.h3d” uzantılı sonuçların görüntülendiği iki adet dosya ve ilk kademede optimize edilmiş modeli içeren” dosya_ismi_ lattice.fem” uzantılı dosya oluşur. “. fem” uzantılı oluşan dosya daha sonra için ikinci optimizasyon aşamasında kullanılır.”.h3d” uzantılı dosyaların biri eleman yoğunluklarını gösteren sonuç dosyası diğeri ise gerilme, yer değiştirme, basınç vb. değerleri içeren sonuç dosyasıdır.

İkinci optimizasyon analizi için ilk optimizasyon sonucu oluşan “dosya_ismi.lattice.fem” dosyası çözücü arayüzünden çözdürülür. Burada belirlenen kafes yapısı parametrelerine göre boyut “size” optimizasyonu yapılır. Aynı şekilde optimizasyon sonuçlarını içeren iki adet “.h3d” uzantılı sonuç

dosyaları ve “dosya_ismi_lattice_optimized.fem” uzantılı modeli içeren dosya oluşur.

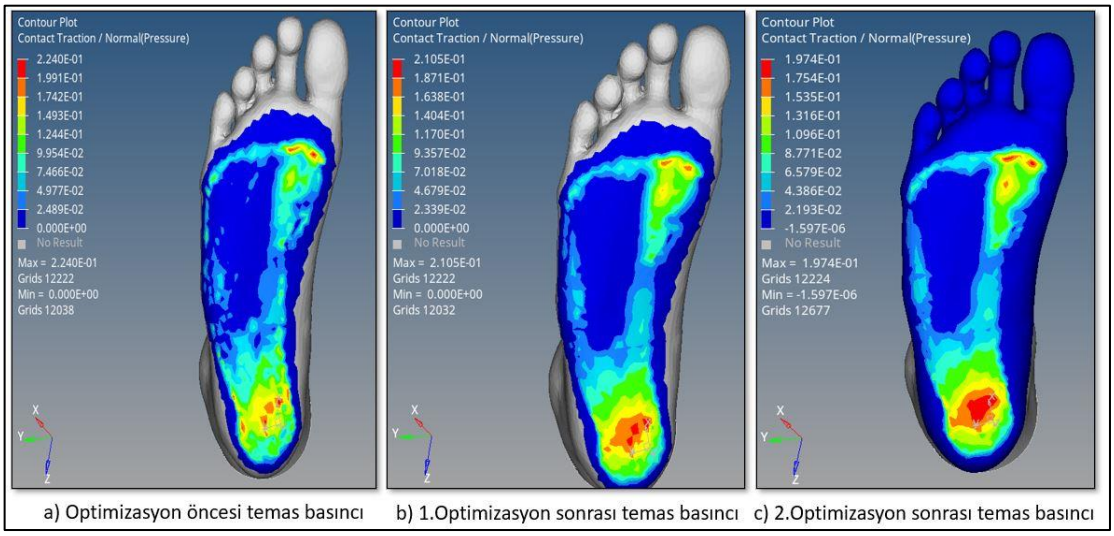
5.2 1.Kafes Yapısı Optimizasyon Sonuçları

Ayakkabı tabanı “chexa” eleman tipi ile ağ yapısı ile oluşturulduğu için bu eleman çeşitine göre farklı kafes yapıları oluştuşturmaktadır. İlk kafes yapısı aşağıdaki Şekil 5.3’de gösterilmiştir ve kafes yapısı “lattice types” sekmesinden seçilebilmektedir.Bu kafes yapısı “CubicBcc” olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 5.3 1.Kafes yapısı

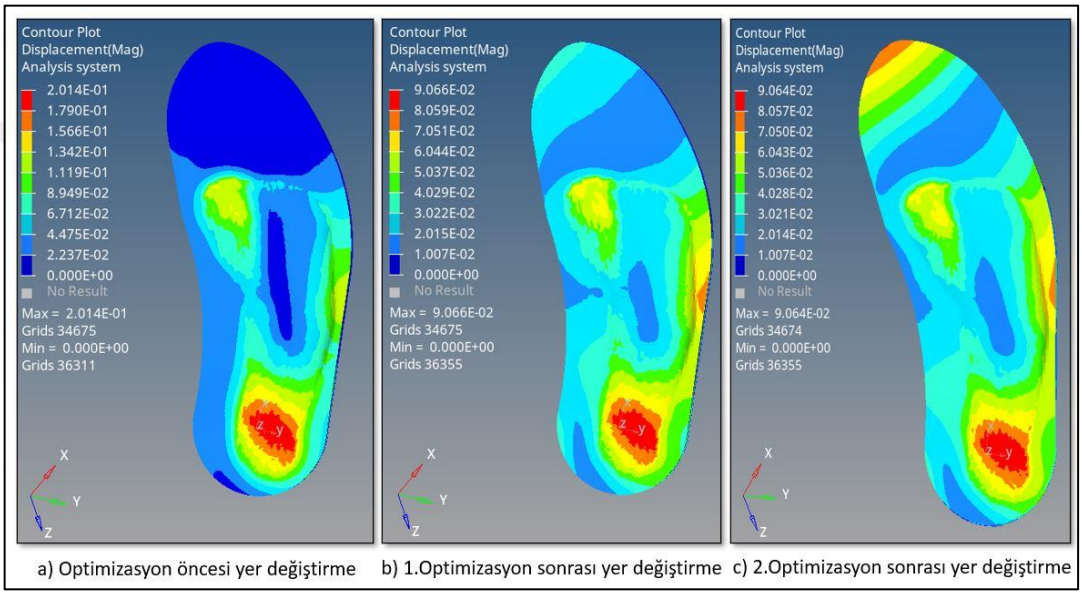
Sonlu elemanlar programı ilk olarak oluşturulmuş lineer olmayan statik analizi çözer ve sonrasında optimizasyon işlemlerine başlar. Optimizasyon öncesi ve sonrasında yapılan her aşama için ayak tabanında oluşan temas basıncı sonuçları Şekil 5.4’deki gibidir.



Şekil 5.4 1.Kafes yapısı temas basıncı sonuçları

Analiz sonuçları incelendiğinde optimizasyon öncesi 224 kPa olan temas basıncı değeri ilk optimizasyon sonucunda 210 kPa değerine, ikinci optimizasyon sonucu 197kPa değerine düşmüştür. Bu analizde temas basıncı kısıtlanmamıştır. Fakat kısıt olmadan yapılan optimizasyon sonucunda temas basıncı kritik değer olan 200kPa değerinin altına düşmeseydi; temas basıncı maksimum temas basıncı 200kPa değerinden küçük olacak şekilde temas basıncı kısıtı verilebilirdi.

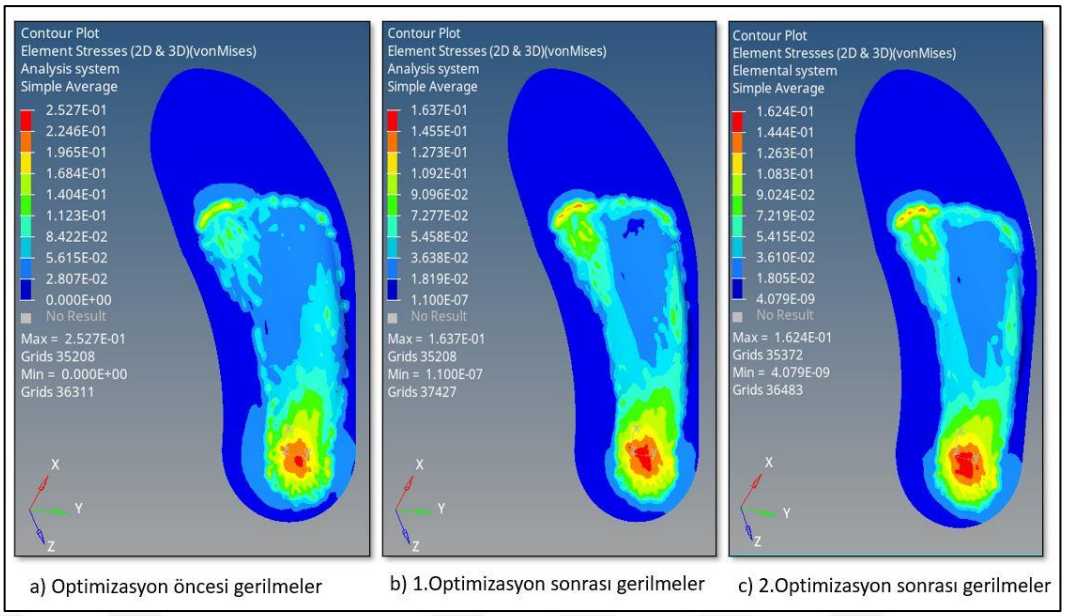
Optimizasyon öncesi ve sonrasında yapılan her aşama için ayak tabanında oluşan yer değiştirme sonuçları Şekil 5.5' deki gibidir.



Şekil 5.5 1.Kafes yapısı ayakkabı tabanı yer değiştirme sonuçları

1.Kafes yapısı için yer değiştirme sonuçlarına bakıldığında yer değiştirme değerleri optimizasyonlar sonucu azalmıştır. Bunun sebebi ise amaç fonksiyonunun kompliyansı minimize etme yani maksimum rijitlik olmasından dolayıdır.

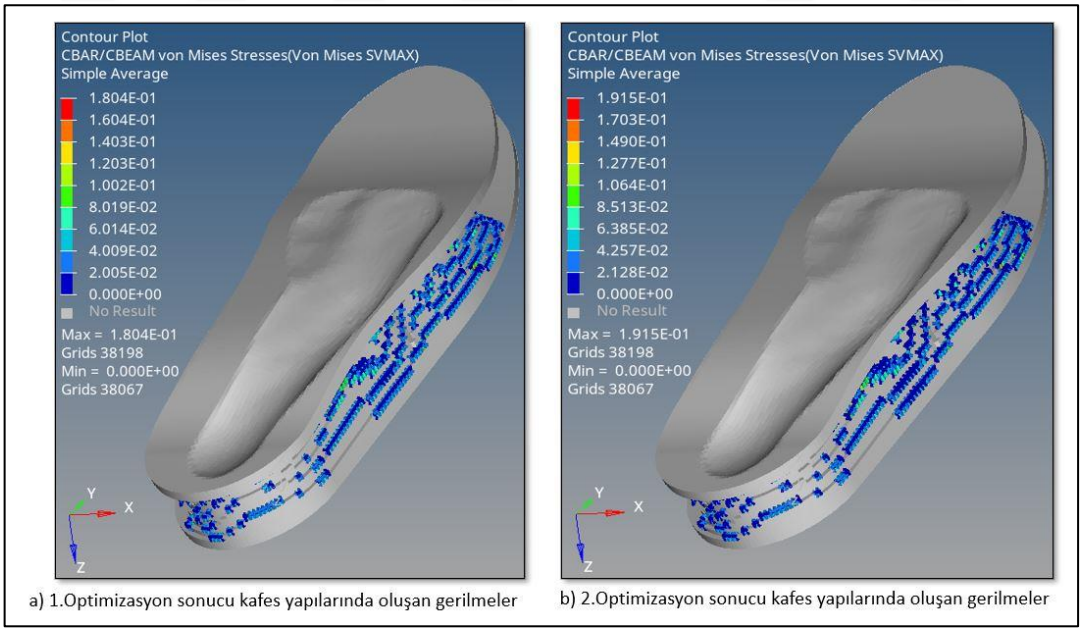
Optimizasyon öncesi ve sonrasında yapılan her aşama için ayak tabanında oluşan gerilme değerleri Şekil 5.6' deki gibidir.



Şekil 5.6 1.Kafes yapısı ayakkabı tabanı gerilme değerleri

Ayakkabı tabanında oluşan maksimum gerilmelere bakıldığında optimizasyon öncesi 0.2257 MPa, ilk optimizasyon sonrası 0.1637MPa ve ikinci optimizasyon sonucu 0.1624 MPa değerlerine düşmüştür.

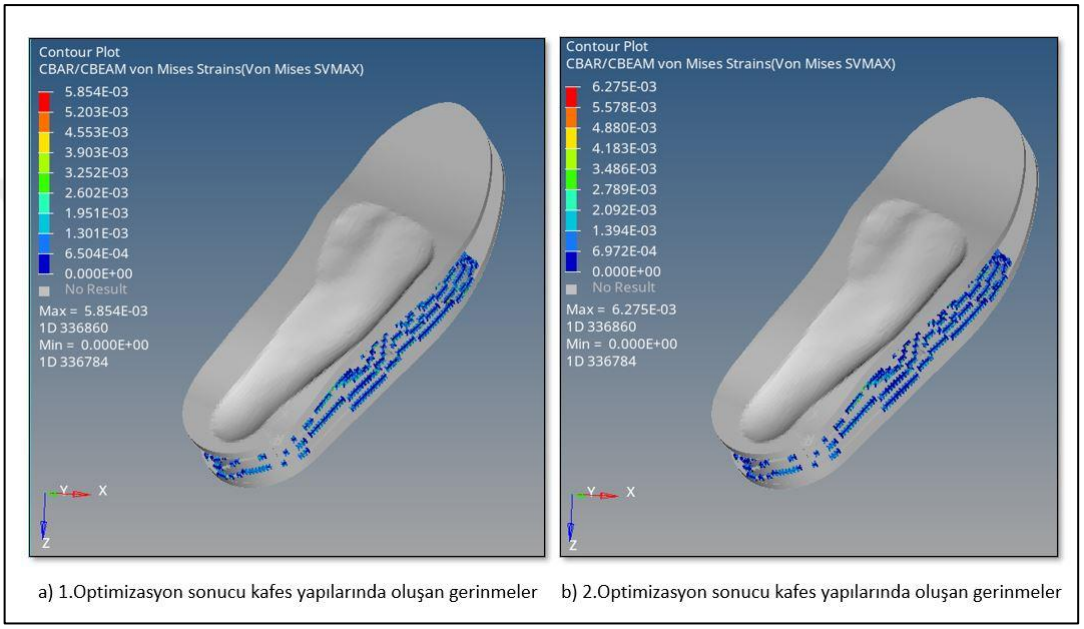
1.kafes yapısında oluşan gerilme değerleri ve sonuçları Şekil 5.7'deki gibidir.



Şekil 5.7 1.Kafes yapısı gerilme değerleri

Ayakkabı tabanında birinci optimizasyon sonucu oluşan kafes yapılarda oluşan maksimum gerilme 0.1804 MPa, ikinci optimizasyon sonucunda kafes yapılarda oluşan maksimum gerilme 0.1915 MPa ‘dır. Gerilme değerlerindeki bir miktar artış ikinci optimizasyon sonucu çok küçük olan kafes yapılarının yapıdan silinmesi ile ilişkilendirilebilir.

Son olarak 1.kafes yapısında oluşan gerinme değerlerine bakılmıştır ve sonuçlar Şekil 5.8’deki gibidir.



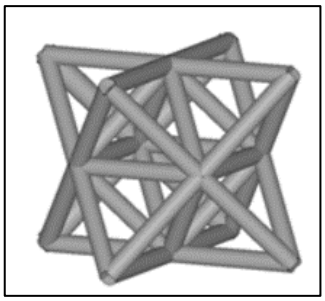
a) 1.Optimizasyon sonucu kafes yapılarında oluşan gerinmeler b) 2.Optimizasyon sonucu kafes yapılarında oluşan gerinmeler

Şekil 5.8 1.Kafes yapısı gerinme değerleri

Gerinme sonuçlarına bakıldığında; 2. Optimizasyon sonucunda 0.006275 maksimum gerinme değeri görülmüştür.

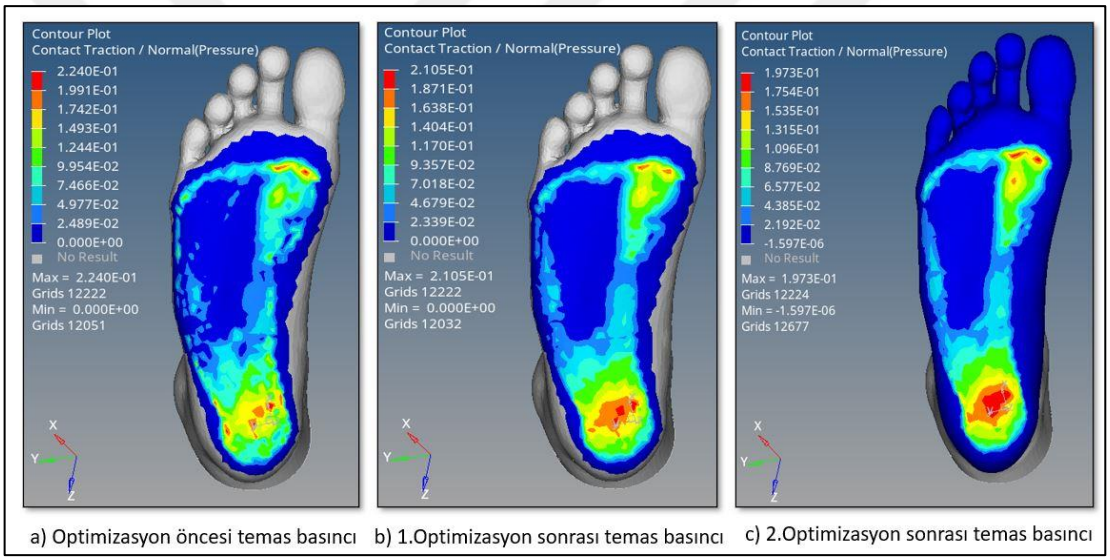
5.3 2.Kafes Yapısı Optimizasyon Sonuçları

Ayakkabı tabanı “chexa” eleman tipi ile ağ yapısı ile oluşturulduğu için bu eleman çeşitine göre farklı kafes yapıları oluştuşturmaktadır. İkinci kafes yapısı aşağıdaki Şekil 5.9’de gösterilmiştir ve kafes yapısı “lattice types” sekmesinden seçilebilmektedir. Bu kafes yapısı “Octet(FccOctahedron)” olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 5.9 2.Kafes yapısı

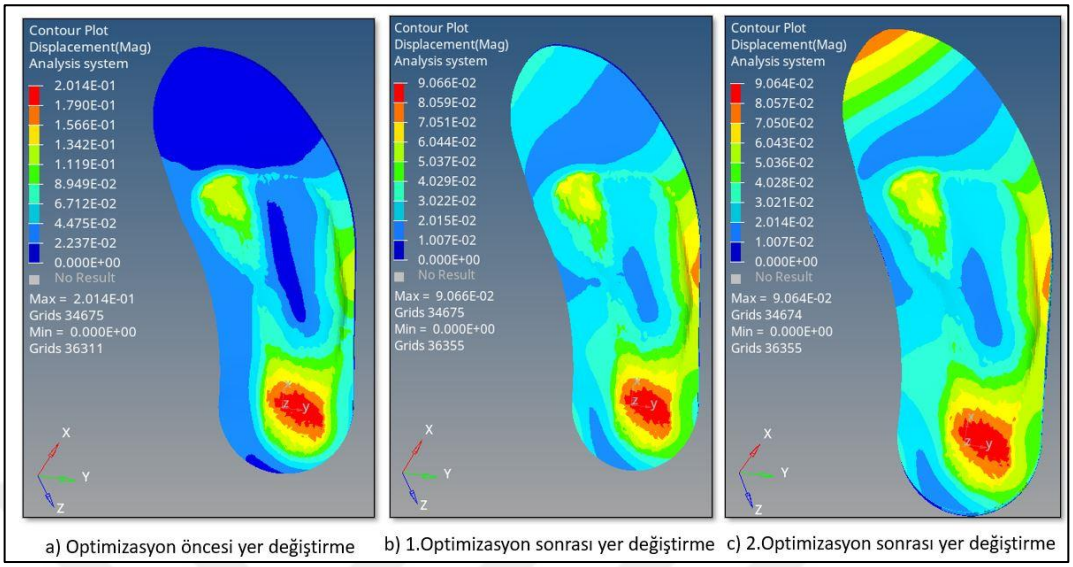
Sonlu elemanlar programı ilk olarak oluşturulmuş lineer olmayan statik analizi çözer ve sonrasında optimizasyon işlemlerine başlar. Optimizasyon öncesi ve sonrasında yapılan her aşama için ayak tabanında oluşan temas basıncı sonuçları Şekil 5.10'deki gibidir.



Şekil 5.10 2.Kafes yapısı temas basıncı sonuçları

Analiz sonuçları incelendiğinde optimizasyon öncesi 224 kPa olan temas basıncı değeri ilk optimizasyon sonucunda 210 kPa değerine, ikinci optimizasyon sonucu 197kPa değerine düşmüştür. Bu analizde temas basıncı kısıtlanmamıştır. Fakat kısıt olmadan yapılan optimizasyon sonucunda temas basıncı kritik değer olan 200kPa değerinin altına düşmeseydi; temas basıncı maksimum temas basıncı 200kPa değerinden küçük olacak şekilde temas basıncı kısıtı verilebilirdi. İlk kafes yapısına benzer sonuçlar elde edilmiştir.

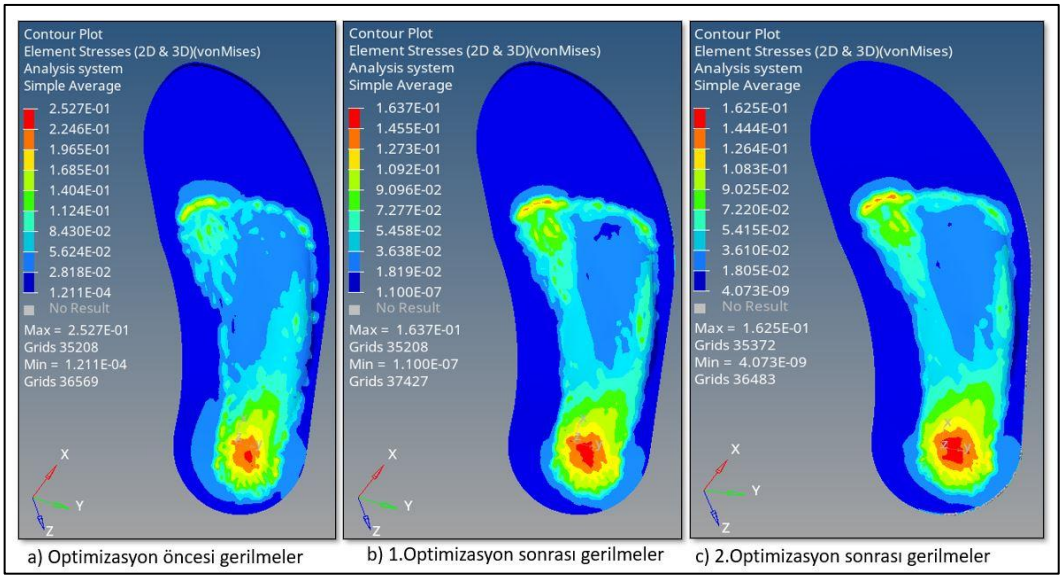
Optimizasyon öncesi ve sonrasında yapılan her aşama için ayak tabanında oluşan yer değiştirme sonuçları Şekil 5.11' deki gibidir.



Şekil 5.11 2.Kafes yapısı ayakkabı tabanı yer değiştirme sonuçları

2.Kafes yapısı için yer değiştirme sonuçlarına bakıldığında yer değiştirme değerleri optimizasyonlar sonucu azalmıştır. Bunun sebebi ise amaç fonksiyonunun kompliyansı minimize etme yani maksimum rijitlik olmasından dolayıdır.

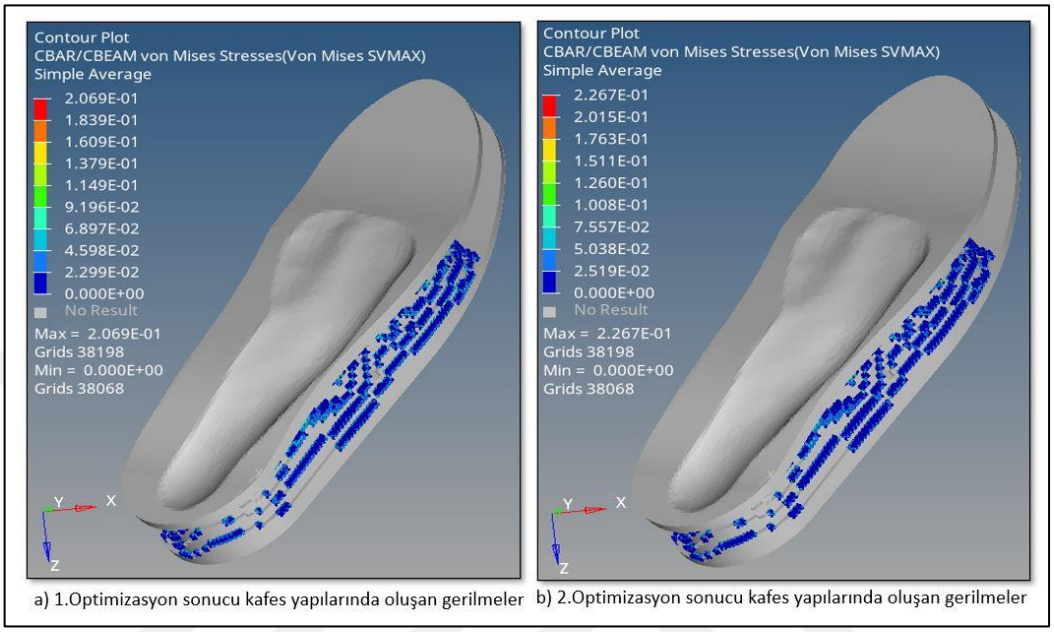
Optimizasyon öncesi ve sonrasında yapılan her aşama için ayak tabanında oluşan gerilme değerleri Şekil 5.12' deki gibidir.



Şekil 5.12 2.Kafes yapısı ayakkabı tabanı gerilme değerleri

Ayakkabı tabanında oluşan maksimum gerilmelere bakıldığında optimizasyon öncesi 0.2527 MPa, ilk optimizasyon sonrası 0.1637MPa ve ikinci optimizasyon sonucu 0.1625 MPa değerlerine düşmüştür.

2.kafes yapısında oluşan gerilme değerleri ve sonuçları Şekil 5.13'deki gibidir.

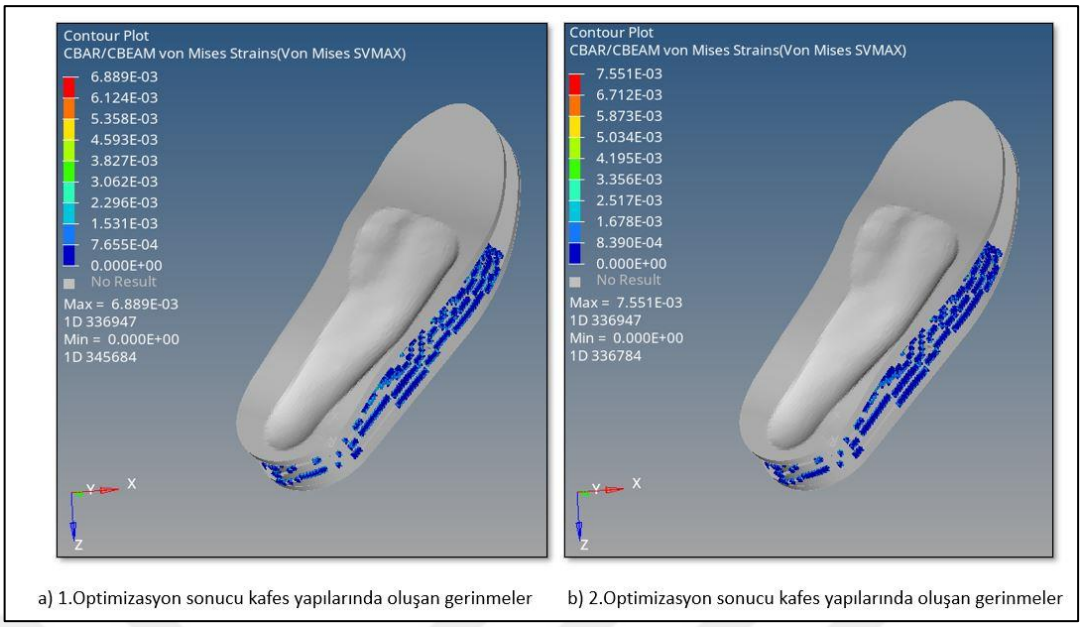


a) 1.Optimizasyon sonucu kafes yapılarında oluşan gerilmeler b) 2.Optimizasyon sonucu kafes yapılarında oluşan gerilmeler

Şekil 5.13 2.Kafes yapısı gerilme değerleri

Ayakkabı tabanında birinci optimizasyon sonucu oluşan kafes yapılarda oluşan maksimum gerilme 0.2069 MPa, ikinci optimizasyon sonucunda kafes yapılarda oluşan maksimum gerilme 0.2267 MPa 'dır. Gerilme değerlerindeki bir miktar artış ikinci optimizasyon sonucu çok küçük olan kafes yapılarının yapıdan silinmesi ile ilişkilendirilebilir.

Son olarak 2.kafes yapısında oluşan gerinme değerlerine bakılmıştır ve sonuçlar Şekil 5.16'deki gibidir.

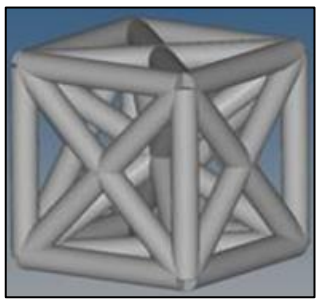


Şekil 5.14 2.Kafes yapısı gerinme değerleri

Gerinme sonuçlarına bakıldığında; 2. Optimizasyon sonucunda 0.007551 maksimum gerinme değeri görülmüştür.

5.4 3.Kafes Yapısı Optimizasyon Sonuçları

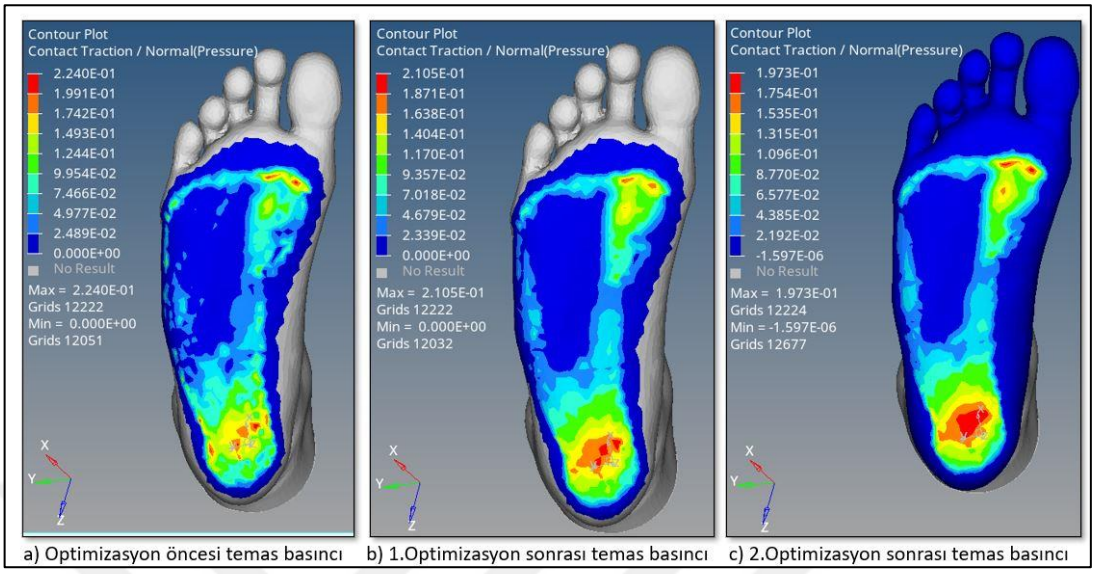
Ayakkabı tabanı “chexa” eleman tipi ile ağ yapısı ile oluşturulduğu için bu eleman çeşitine göre farklı kafes yapıları oluştuşturmaktadır. Üçüncü kafes yapısı aşağıdaki Şekil 5.15’de gösterilmiştir ve kafes yapısı “lattice types” sekmesinden seçilebilmektedir. Bu kafes yapısı “Cubic Bcc Fcc” olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 5.15 3.Kafes yapısı

Sonlu elemanlar programı ilk olarak oluşturulmuş lineer olmayan statik analizi çözer ve sonrasında optimizasyon işlemlerine başlar. Optimizasyon öncesi ve

sonrasında yapılan her aşama için ayak tabanında oluşan temas basıncı sonuçları Şekil 5.16'deki gibidir.

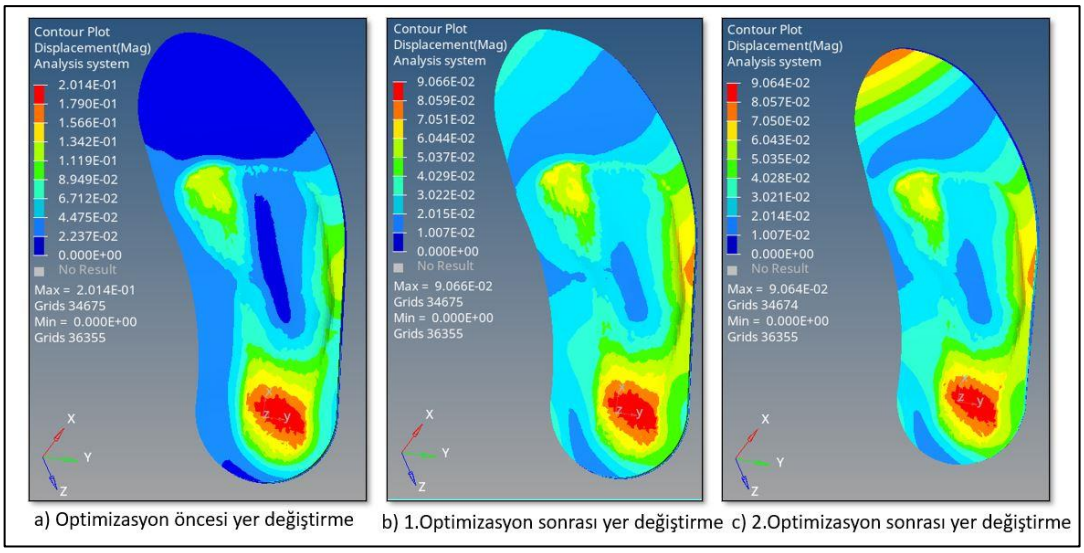


a) Optimizasyon öncesi temas basıncı b) 1.Optimizasyon sonrası temas basıncı c) 2.Optimizasyon sonrası temas basıncı

Şekil 5.16 3.Kafes yapısı temas basıncı sonuçları

Analiz sonuçları incelendiğinde optimizasyon öncesi 224 kPa olan temas basıncı değeri ilk optimizasyon sonucunda 210 kPa değerine, ikinci optimizasyon sonucu 197kPa değerine düşmüştür. Bu analizde temas basıncı kısıtlanmamıştır. Fakat kısıt olmadan yapılan optimizasyon sonucunda temas basıncı kritik değer olan 200kPa değerinin altına düşmeseydi; temas basıncı maksimum temas basıncı 200kPa değerinden küçük olacak şekilde temas basıncı kısıtı verilebilirdi. Diğer iki kafes yapıları ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

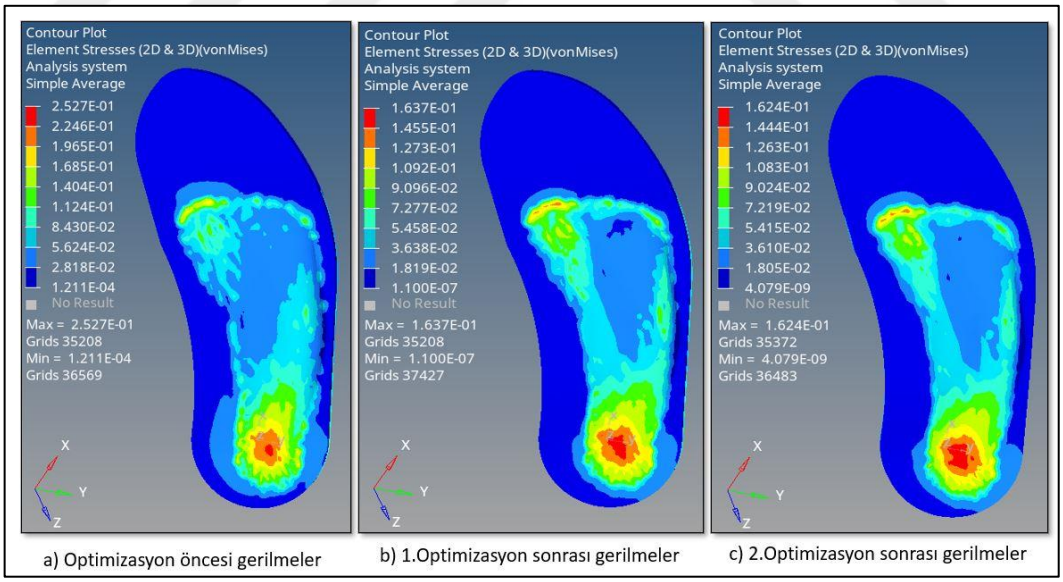
Optimizasyon öncesi ve sonrasında yapılan her aşama için ayak tabanında oluşan yer değiştirme sonuçları Şekil 5.17' deki gibidir.



Şekil 5.17 3.Kafes yapısı ayakkabı tabanı yer değiştirme sonuçları

3.Kafes yapısı için yer değiştirme sonuçlarına bakıldığında yer değiştirme değerleri optimizasyonlar sonucu azalmıştır. Bunun sebebi ise amaç fonksiyonunun kompliyansı minimize etme yani maksimum rijitlik olmasından dolayıdır.

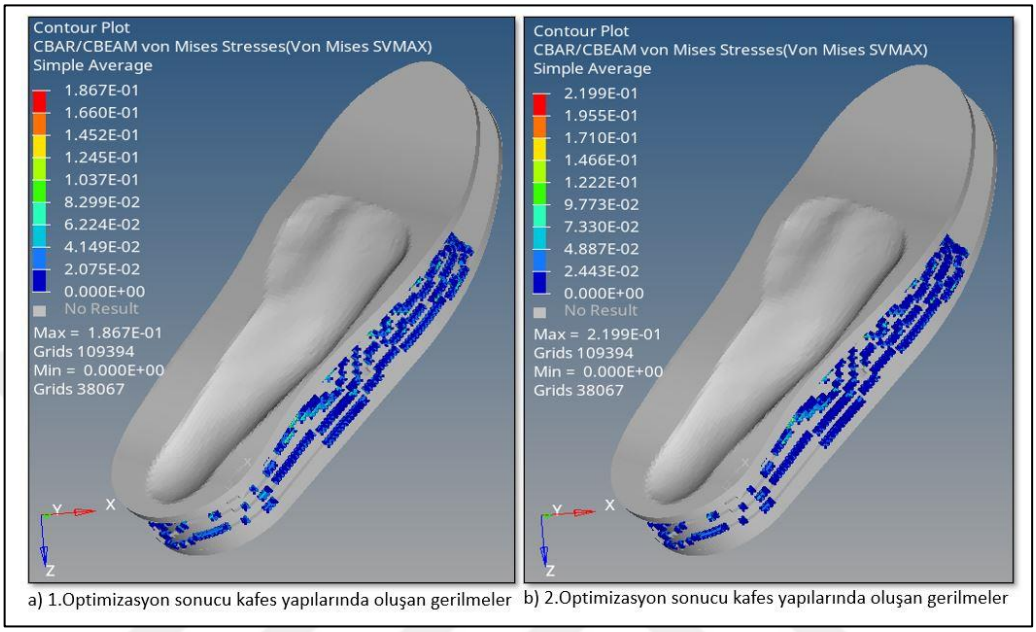
Optimizasyon öncesi ve sonrasında yapılan her aşama için ayak tabanında oluşan gerilme değerleri Şekil 5.18' deki gibidir.



Şekil 5.18 3.Kafes yapısı ayakkabı tabanı gerilme değerleri

Ayakkabı tabanında oluşan maksimum gerilmelere bakıldığında optimizasyon öncesi 0.2527 MPa, ilk optimizasyon sonrası 0.1637MPa ve ikinci optimizasyon sonucu 0.1624 MPa değerlerine düşmüştür.

3.kafes yapısında oluşan gerilme değerleri ve sonuçları Şekil 5.19'deki gibidir.

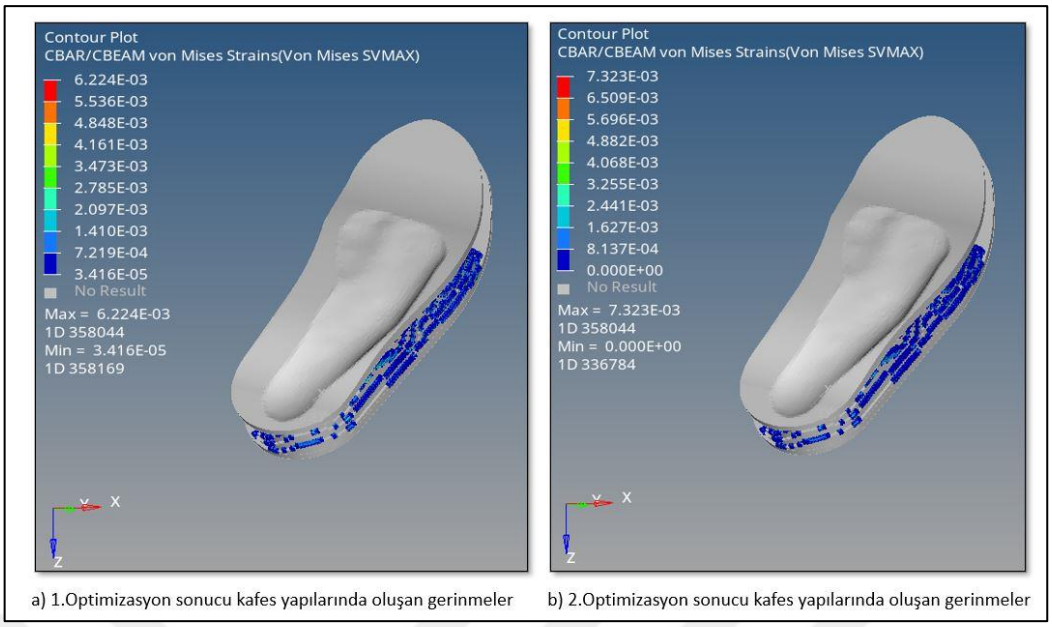


a) 1.Optimizasyon sonucu kafes yapılarında oluşan gerilmeler b) 2.Optimizasyon sonucu kafes yapılarında oluşan gerilmeler

Şekil 5.19 3.Kafes yapısı gerilme değerleri

Ayakkabı tabanında birinci optimizasyon sonucu oluşan kafes yapılarda oluşan maksimum gerilme 0.1867 MPa, ikinci optimizasyon sonucunda kafes yapılarda oluşan maksimum gerilme 0.2199 MPa 'dır. Gerilme değerlerindeki bir miktar artış ikinci optimizasyon sonucu çok küçük olan kafes yapılarının yapıdan silinmesi ile ilişkilendirilebilir.

Son olarak 3.kafes yapısında oluşan gerinme değerlerine bakılmıştır ve sonuçlar Şekil 5.20'deki gibidir.



a) 1.Optimizasyon sonucu kafes yapılarında oluşan gerinmeler b) 2.Optimizasyon sonucu kafes yapılarında oluşan gerinmeler

Şekil 5.20 3.Kafes yapısı gerinme değerleri

Gerinme sonuçlarına bakıldığında; 2. Optimizasyon sonucunda 0.007323 maksimum gerinme değeri görülmüştür.

5.5 Üç Farklı Kafes Yapısı Optimizasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan üç farklı kafes yapısının yapılan optimizasyon sonucu elde edilen sonuçların özeti aşağıdaki Tablo 5.2'deki gibidir.

Tablo 5.2 Üç farklı kafes yapısı optimizasyon sonuçları

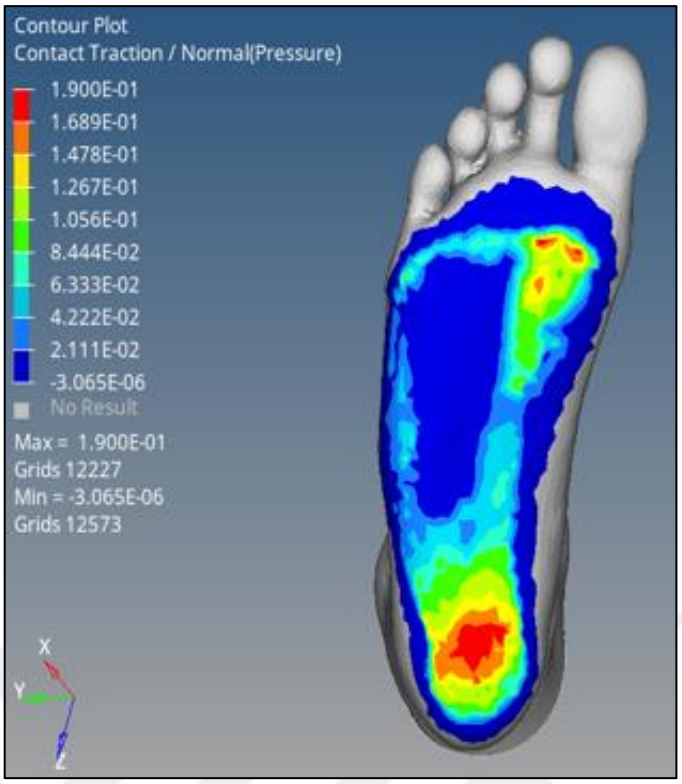
2.Optimizasyon	1.Kafes Yapısı	2.Kafes Yapısı	3.Kafes Yapısı
Temas Basıncı [kPa]	197.4	197.3	197.3
Ayakkabı Tabanı Yer Değiştirme [mm]	0.09064	0.09064	0.09064
Ayakkabı Tabanı Gerilme [MPa]	0.1624	0.1625	0.1624
Kafes Yapısı Gerilmesi [MPa]	0.1915	0.2267	0.2199
Kafes Yapısı Gerinmesi [-]	0.006275	0.007551	0.007323

Yukarıdaki Tablo 5.2 incelendiğinde; yapılan optimizasyon sonuçları temas basıncı, ayakkabı tabanı yer değiştirme ve ayakkabı tabanı gerilmesi değerleri üç farklı kafes yapısı için benzerdir. Fakat kafes yapısı gerilmelerine bakıldığında en az gerilme 1. kafes yapısında oluşmaktadır ve kafes yapısı gerinmelerine bakıldığında yine 1. kafes yapısı en düşük değere sahiptir. Bu sebepten dolayı tasarımda 1.kafes yapısı tercih edilmiştir.

5.6 Temas Basıncı Kısıtı Uygulanarak Yapılan Optimizasyonlar ve Ayak Tabanı Basınç Dağılımları

Üç farklı kafes yapısının karşılaştırılması için yapılan optimizasyon sonuçlarında kritik değer olan 200kPa değerini aşan temas basıncı değeri görülmemiştir. Eğer sonuçlarda 200kPa temas basıncı değerini aşan sonuçlar elde edilseydi; yapılan analizlere temas basıncı kısıtlaması optimizasyon parametrelerine eklenecekti. Bu durum ile karşılaşma ihtimaline karşı 1. Kafes yapısı için optimizasyon modeline temas basıncı kısıtlaması uygulanarak analizler tekrarlanmış ve temas basıncı sonuçları incelenmiştir.

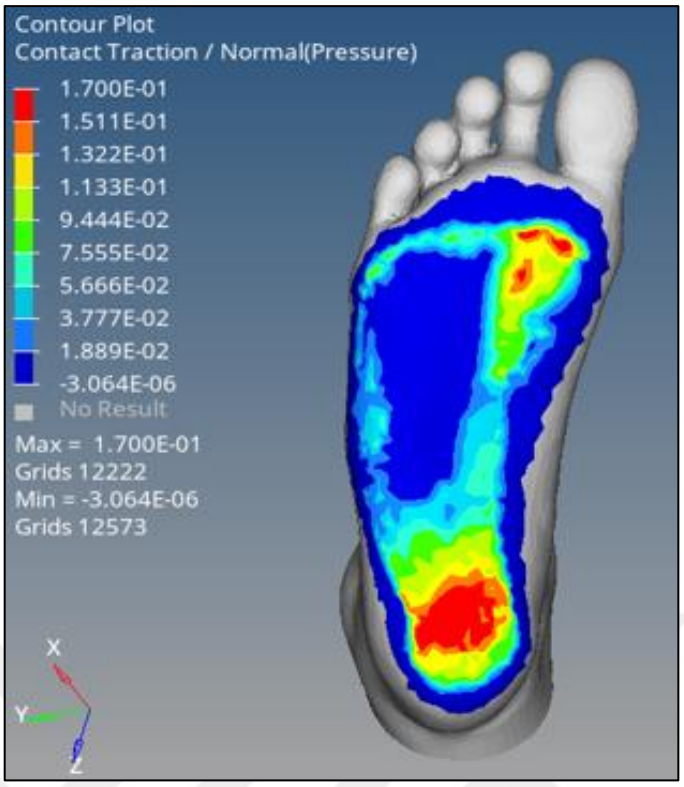
İlk olarak istenilen en yüksek temas basıncı 190 kPa olacak şekilde belirlenmiş ve optimizasyon parametrelerine eklenmiştir ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.21'deki gibidir.



Şekil 5.21 Temas basıncı sonuçları-190 kPa basınç kısıtı

190 kPa basınç kısıtı uygulanan model için ayak tabanında oluşan temas basıncı sonuçları incelendiğinde optimizasyon algoritması verilen kısıtı göre oluşan en yüksek basıncı 190 kPa olarak uygulamıştır.

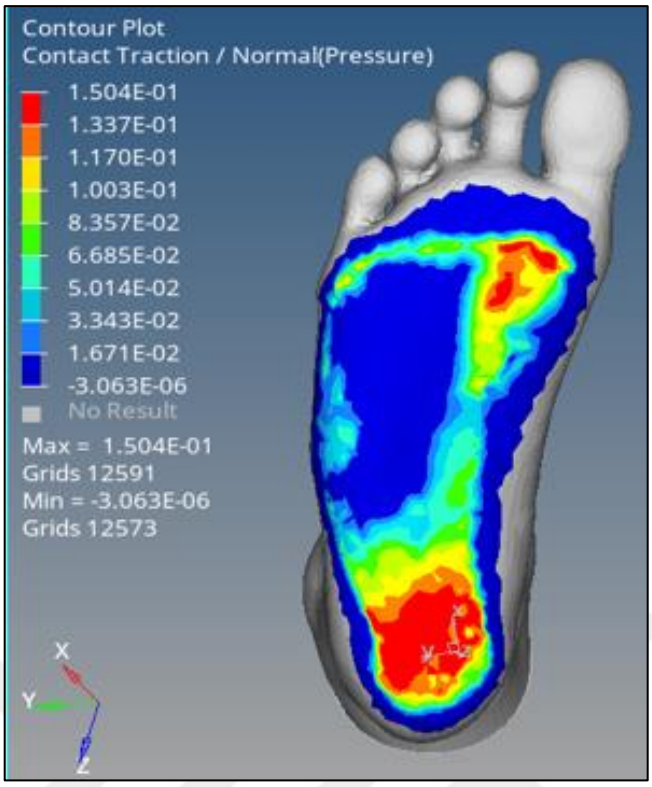
İkinci olarak temas basıncı kısıtı 170 kPa olarak belirlenmiş ve optimizasyon parametrelerine eklenerek, 1. Kafes yapısı için optimizasyon analizi tekrarlanmıştır ve elde edilen temas basıncı sonuçları Şekil 5.22'deki gibidir.



Şekil 5.22 Temas basıncı sonuçları-170 kPa basınç kısıtı

170 kPa basınç kısıtı uygulanan modelin sonuçları incelendiğinde optimizasyon analizden istenilen sonuçlar elde edilmiştir ve aynı şekilde en yüksek temas basıncı 170 kPa olacak şekilde optimizasyon yapılmıştır.

Son olarak ise; 150 kPa basınç kısıtı optimizasyon parametrelerine eklenerek, optimizasyon analizi tekrarlanmıştır ve elde edilen temas basıncı sonuçları Şekil 5.23'deki gibidir.



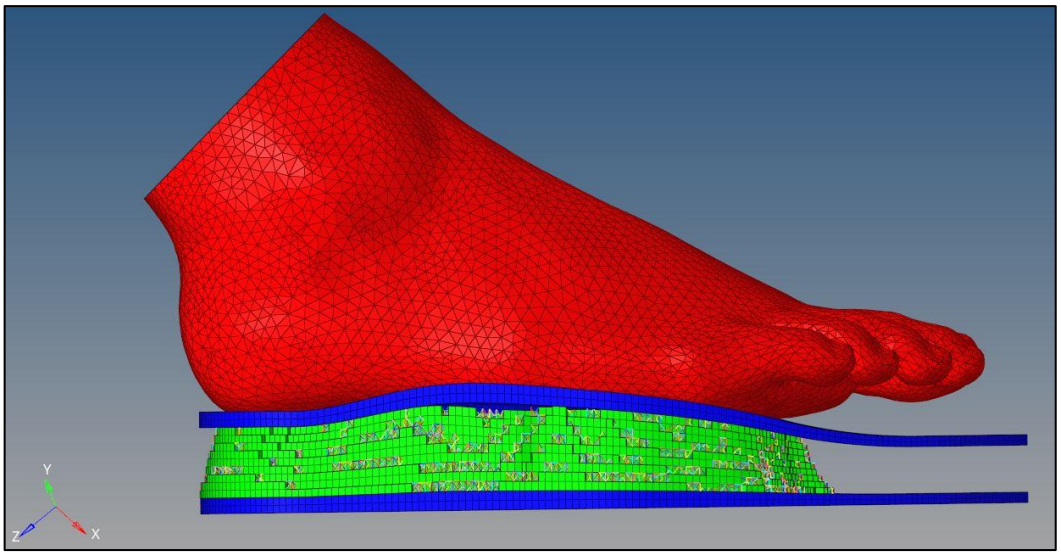
Şekil 5.23 Temas basıncı sonuçları-150 kPa basınç kısıtı

Diğer iki analiz sonucu gibi bu analizde de temas basıncı sonuçlarına bakıldığında benzer sonuçlar elde edilmiştir ve en yüksek temas basıncı 150kPa olacak şekilde temas basıncı optimize edilmiştir.

Sonuç olarak; optimizasyon modeline lineer olmayan bir sistem davranışı da eklenerek optimizasyon analizi yapılabilmiştir ve lineer olmayan temas basıncı istenilen değere göre optimize edilebilmektedir.

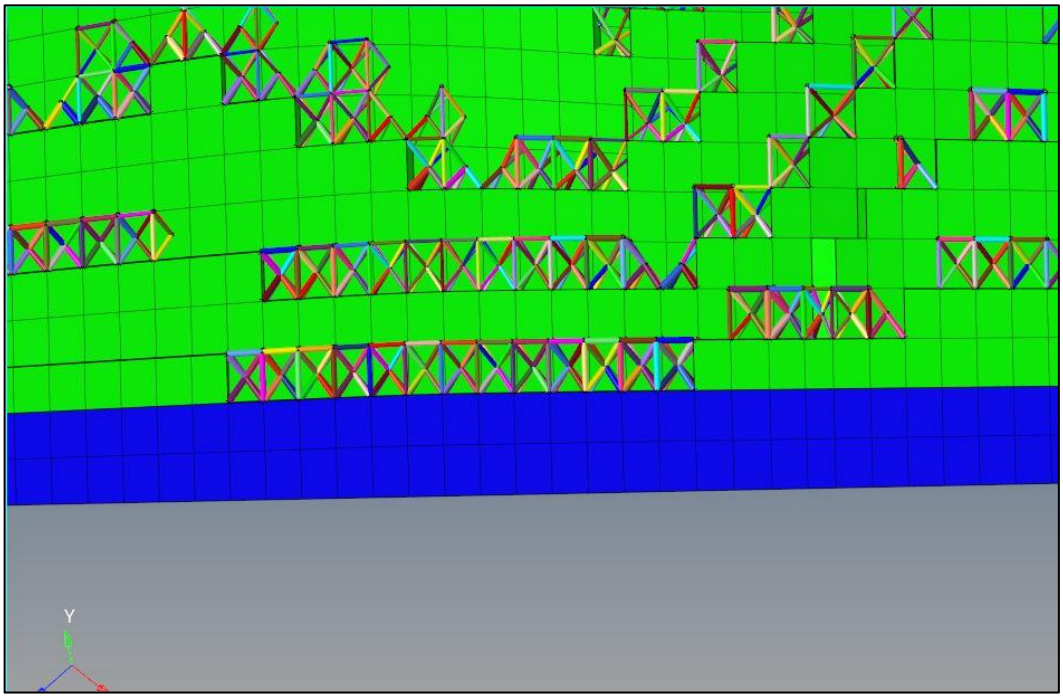
5.7 1.Kafes Yapısı Optimizasyon Sonucu Oluşan Ayakkabı Tabanı Yapısı ve Tasarım Alternatifleri

Elde edilen sonuçlara göre 1. Kafes yapısını içeren ayakkabı tabanı seçilmiştir. Optimizasyonlar sonucu elde edilen ayakkabı tabanı modeli Şekil 5.24'deki gibidir.



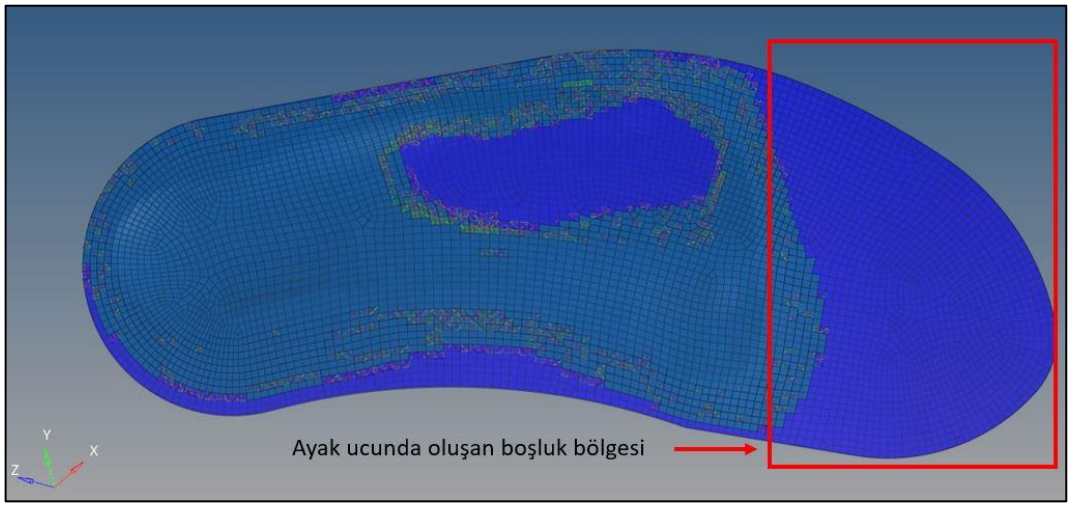
Şekil 5.24 Optimize edilmiş ayakkabı tabanı modeli

Elde edilen modele bakıldığında katı elemanlar ve kafes yapılar bulunmaktadır. Yükün gelmediği bölgelerde ise optimizasyona göre boşluklar oluşmuştur. Analiz sonuçları ile uyumlu olarak statik ve ayakta duran birey için ayak uçlarına yükler gelmemiştir ve optimizasyon algoritması bu bölgede bulunan elemanları kaldırmıştır. Katı elemanların ve kafes yapısının detay yapısı aşağıdaki Şekil 5.25'deki gibidir.



Şekil 5.25 Katı elemanlar ve kafes yapılar

Gelen yüklere göre ayak ucunda oluşan boşluklar Şekil 5.26'deki gibidir

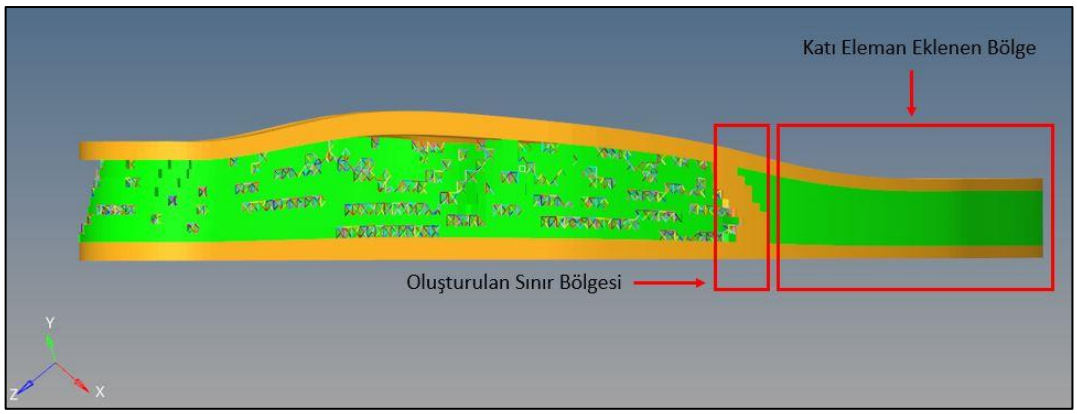


Şekil 5.26 Ayak ucunda oluşan boşluk bölgesi

5.7.1 Ayak Ucunda Oluşan Boşluk Bölgesi İçin Katı Eleman Eklenmesi

Gerçek durum düşünüldüğünde, ayakkabı tabanının kullanılabilir olabilmesi için bu bölgede fiziksel olarak malzemenin olması gerekmektedir. Bu bölgeye malzeme eklemek iki yöntem ile olabilir. Bu yöntemlerden birisi boşluk oluşan bölgeye tamamen katı elemanların bulunduğu yapıları eklemektir.

Birinci yöntem için sonlu elemanlar programı kullanılarak; oluşan yapının ayak ucu kısmındaki sınırı elde edilerek boşluk olan bölgeye katı elemanlar eklenmiştir ve Şekil 5.27'deki gibi yapı elde edilmiştir.



Şekil 5.27 Ayak ucunda oluşan boşluk bölgesine katı elemanların eklenmesi

5.7.2 Ayak Ucunda Oluşan Boşluk Bölgesi İçin Adım Atma Durumu İncelenerek Optimizasyon Yapılması ve Oluşan Yapının Eklenmesi

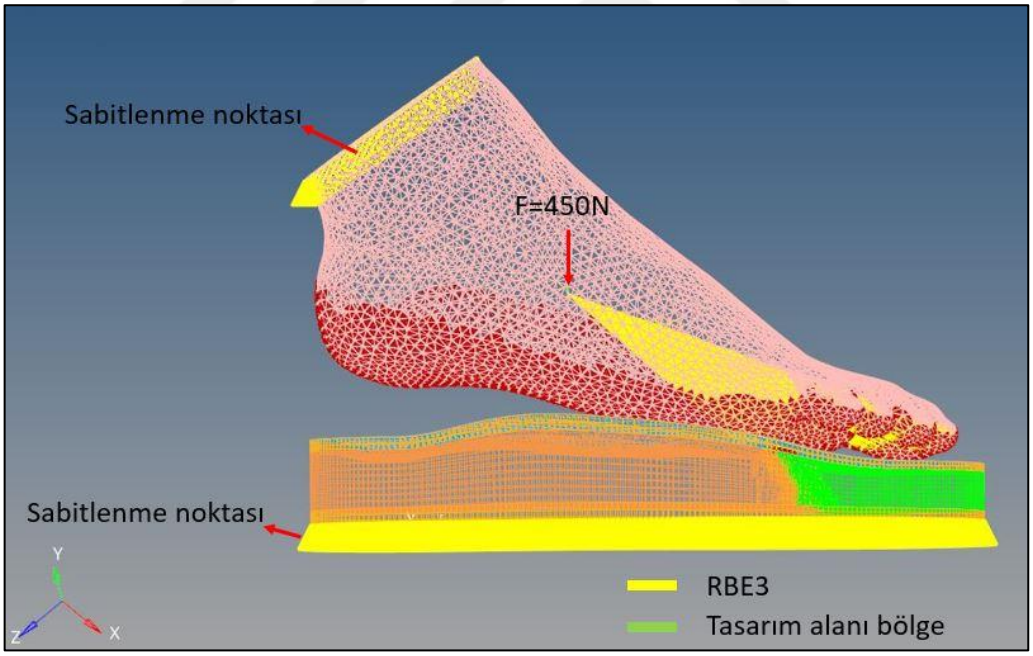
İkinci yöntem ise adım atma durumunu ayrıca analiz ederek ve statik ve ayakta bulunan durum gibi kafes yapısı optimizasyonu yapılarak modele eklemektir.

İlk olarak sınır şartları adım durumu için düzenlenmiştir ve insan ayağı modeli 10 derece döndürülmüştür [33]. İnsan ayağı döndürüldüğü için uygulanacak kuvvetin uygulama noktası değişmiştir ve yeni ağırlık merkezi aşağıdaki gibidir.

Tablo 5.3 Yeni konuma göre ayak ağırlık merkezi koordinatları

	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Ayak Ağırlık Merkezi	10.182	14.652	-87.854

Yeni sınır şartları aşağıdaki ve yeni tasarım bölgesi Şekil 5.28'deki gibidir.

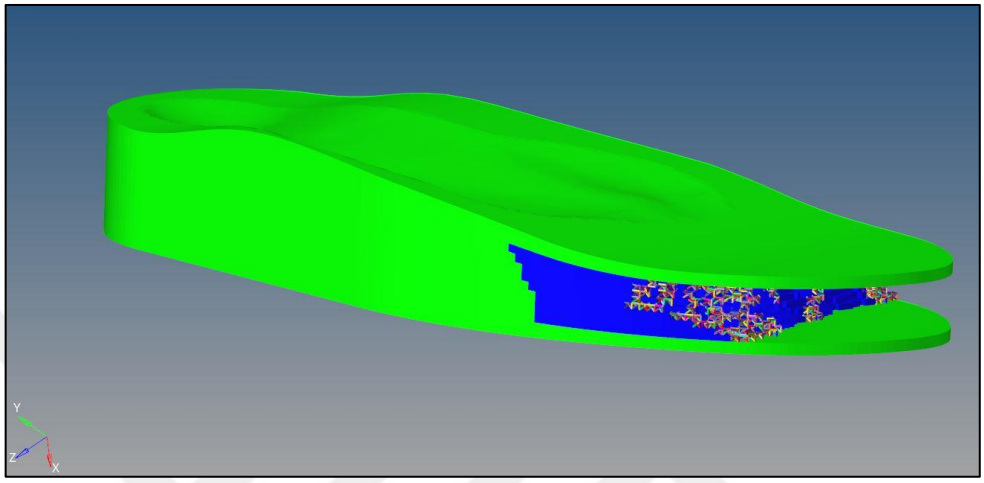


Şekil 5.28 Yeni sınır şartları ve tasarım bölgesi

Kuvvet yeni ağırlık merkezi noktasından ayağın ayak ucu kısmına "rbe3" elemanlar aracılığıyla uygulanmıştır. Ayak tabanı alt bölgesi ve ayak bileği

noktasında yapı sabitlenmiştir. Yeni tasarım alanı bölgesi ayak ucunda oluşan boş bölge olarak değiştirilmiştir ve belirlenmiştir.

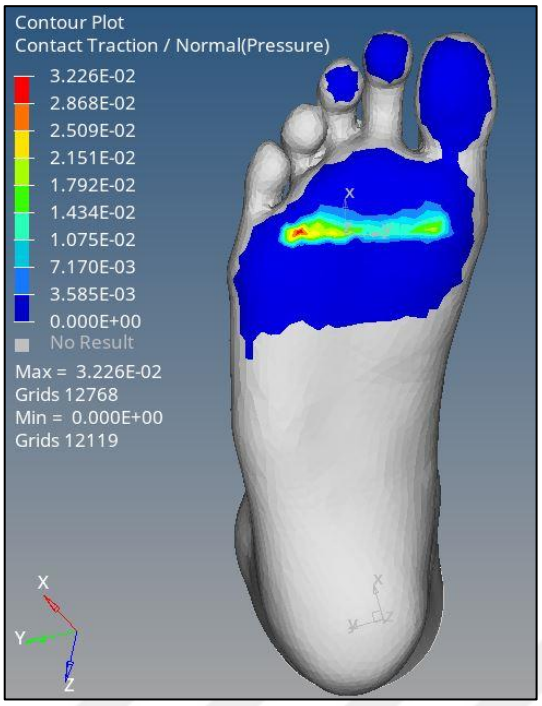
Optimizasyon parametreleri statik ve ayakta durumu ile aynı tutulmuştur ve optimizasyon analizleri yapılmıştır. Optimizasyonlar sonucu elde edilen yapı aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.29 Yeni sınır şartlarına göre oluşan yeni yapı

Oluşan yeni yapı incelendiğinde; statik ve ayak durumu için yapılan analizlere benzer şekilde yük gelen kısımlara yapılar oluşturulmuştur ve yük gelmeyen bölgelerde malzemeler boşaltılmıştır. Bu durumda yine boşluk oluşan bölgelere malzeme eklenmesi yapılabilir. Ayak yapısı ve konumu referanslara göre varsayım yapılarak değiştirilmiştir. Adım atma durumu için ayak modeli taranarak aynı şekilde modele aktarılması durumunda daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir.

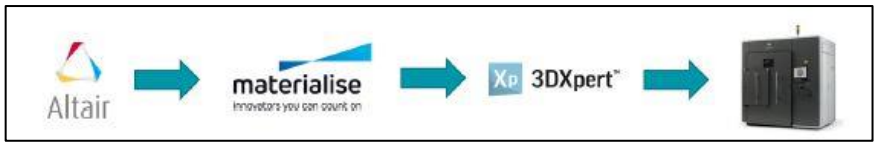
Optimizasyon sonucunda ayak tabanında oluşan temas basıncı dağılımı Şekil 5.30'deki gibidir.



Şekil 5.30 Yeni sınır şartlarına göre oluşan temas basıncı

5.8 Elde Edilen Ayakkabı Tabanı Modelinin Üretime Uygun Verisinin Elde Edilmesi

Oluşturulan yapı, üç boyutlu yazı programları kullanılarak istenilen formatlara dönüştürülüp üç boyutlu yazıcılar ile basım işlemi yapılabilmektedir. Genel iş akışı şeması gibidir.



Şekil 5.31 Üç boyutlu verisi elde etme iş akışı [9]

6
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yapılan çalışmada kafes yapıları kullanarak düztaban ve diyabet hastası bir birey için ayakkabı tabanı tasarımı yapılmıştır. Sınır koşulu olarak vücut kitle endeksi obezite sınırı üzerinde olan durum incelenmiştir ve statik ve ayakta duran bir birey için analiz çalışmaları yürütülmüştür. Yapılan optimizasyon çalışmalarında ilk olarak farklı kafes yapıları kullanılmıştır ve sonrasında sonuçlar değerlendirilerek 1.kafes yapısı ile tasarıma devam edilmiştir. Ayrıca farklı basınç değerleri için optimizasyon kısıtı konulduğunda ayak tabanında oluşan temas basıncı değerleri incelenmiştir ve optimizasyon modeli kritik bir basınç değerine göre temas basıncını optimize etmiştir. Oluşan yapı incelendiğinde mevcut sınır şartı için yük gelmeyen ayak ucu kısmı için tasarım alternatifleri çalışılmıştır. Bunlardan birincisi boş olan bölgeye katı malzeme ekleme alternatifidir. İkinci alternatif ise adım atma durumu varsayımlar ile simüle edilerek yine kafes yapısı optimizasyonu yapısı elde etmektir. İkinci alternatif de yine yük gelmeyen kısımlarda optimizasyon algoritması malzemeleri silmiştir ve yük taşıyan bölgelerde yapılar oluşturmuştur. İkinci alternatif için daha detaylı çalışma yapmak için insan ayağının adım atma konumunda taranarak modele eklemesi ile daha gerçek analiz sonuçları verebilir.

Dong Guoying vd., yaptıkları çalışmada maksimum 200N yüklemede baklava şekli kafes yapısında 0.1 MPa civarında taban gerilmesi görmüştür. Kübik kafes yapısında ise 0.19 MPa, Vintiles ve X şekli kafes yapılarında ise 0.12 MPa taban gerilmeleri görülmüştür [5]. Yunlong Tang vd., yaptıkları çalışmada 350N yüklemede geleneksel düz kafes yapısındaki ayakkabı tabanında 0.313 MPa taban gerilmesi, homojen konformal kafes yapısındaki ayakkabı tabanında 75.6 kPa ayak tabanı gerilmesi ve optimize edilmiş konformal kafes yapısında ise 66.5 kPa ayak tabanı gerilmesi görülmüştür [34]. Jianwei Niu vd., yaptıkları çalışmada 350N yüklemede taban çukuru uyumlu ayakkabı iç tabanında 208.86 kPa maksimum

taban basıncı, düz ayakkabı iç tabanında 210.21 kPa, basınç azaltıcı özel ayakkabı iç tabanında 160.02 kPa ayak tabanı basıncı görmüştür [35].

Çalışmalarda yapılan ayakkabı tabanları ile ulaşılan ayak tabanı basınçları ve bu çalışmada yapılan ayakkabı tabanı ile ulaşılan ayak tabanı basınç değerleri aşağıdaki Tablo 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1 Diğer çalışmalar ile yapılan ayakkabı tabanı tasarımları ile elde edilen ayak tabanı maksimum basınç değerleri

Referans Çalışma	Uygulanan yük	Maksimum ayakkabı tabanı basıncı-1	Maksimum ayakkabı tabanı basıncı-2	Maksimum ayakkabı tabanı basıncı-3
[5] Dong Guoying	200N	0.1 MPa	0.19 MPa	0.12 MPa
[34] Yunlong Tang	350N	0.313 MPa	75.6 kPa	66.5 kPa
[35] Jianwei Niu	350N	208.86 kPa	210.21 kPa	160.02 kPa
Mevcut Yapılan Çalışma	450N	224 kPa	210 kPa	197 kPa

Gelecekteki çalışmalar için insan ayağının yürüme esnasındaki bütün durumlarını bir arada değerlendirilerek kafes yapıların kullanıldığı optimizasyon modeli geliştirilebilir. Her farklı durum için hangi kafes yapısı daha iyi sonuç veriyorsa ayak tabanının farklı bölgelerinde farklı kafes yapıları kullanılabilir veya oluşan gerilme türlerini değerlendirerek bir algoritma yardımıyla kafes yapısı seçilebilir.

KAYNAKÇA

[1] S. A. Bus, R. Haspels, and T. E. Busch-Westbroek, “Evaluation and optimization of therapeutic footwear for neuropathic diabetic foot patients using in-shoe plantar pressure analysis,” Diabetes Care, vol. 34, no. 7, pp. 1595–1600, 2011.

[2] C. Pan, Y. Han, and J. Lu, “Design and optimization of Lattice Structures: A Review,” Applied Sciences, vol. 10, no. 18, p. 6374, 2020.

[3] D. Sharma and S. S. Hiremath, “Bio-inspired repeatable lattice structures for energy absorption: Experimental and finite element study,” Composite Structures, vol. 283, p. 115102, 2022.

[4] B. Li, H. Liu, Q. Zhang, X. Yang, and J. Yang, “Crushing behavior and energy absorption of a bio-inspired bi-directional corrugated lattice under quasi-static compression load,” Composite Structures, vol. 286, p. 115315, 2022.

[5] G. Dong, D. Tessier, and Y. F. Zhao, “Design of Shoe Soles Using Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing,” Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design, vol. 1, no. 1, pp. 719–728, 2019.

[6] J. Jia, D. Da, J. Hu, and S. Yin, “Crashworthiness design of periodic cellular structures using topology optimization,” Composite Structures, vol. 271, p. 114164, 2021.

[7] P. Zhang, J. Toman, Y. Yu, E. Biyikli, M. Kirca, M. Chmielus, and A. C. To, “Efficient Design-optimization of variable-density hexagonal cellular structure by additive manufacturing: Theory and validation,” Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 137, no. 2, 2015.

[8] S. Arabnejad Khanoki and D. Pasini, “Multiscale design and multiobjective optimization of orthopedic hip implants with functionally graded cellular material,” Journal of Biomechanical Engineering, vol. 134, no. 3, 2012.

[9] N. Tanlak, D. F. De Lange, and W. Van Paepegem, “Numerical prediction of the printable density range of lattice structures for additive manufacturing,” Materials &Design, vol. 133, pp. 549–558, 2017.

[10] C. Lopez and J. Stroobants, “Lattice topology optimization and additive manufacturing of a 316l control arm,” in Sim-AM 2019 : II International Conference on Simulation for Additive Manufacturing, 2019, pp. 186–192.

[11] M. F. Ashby, “The properties of foams and lattices,” Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 364, no. 1838, pp. 15–30, 2005.

[12] A. du Plessis, S. M. Razavi, M. Benedetti, S. Murchio, M. Leary, M. Watson, D. Bhate, and F. Berto, “Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A Review,” Progress in Materials Science, vol. 125, p. 100918, 2022.

[13] Dilbaz Öncel, “Eklemeli imalat ile üretilmiş kafes yapıların basma davranışının nümerik olarak incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2022.

[14] M. Benedetti, A. du Plessis, R. O. Ritchie, M. Dallago, S. M. J. Razavi, and F. Berto, “Architected Cellular Materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication,” Materials Science and Engineering: R: Reports, vol. 144, p. 100606, 2021.

[15] D. Bhate, C. Penick, L. Ferry, and C. Lee, “Classification and Selection of Cellular Materials in Mechanical Design: Engineering and Biomimetic Approaches,” Designs, vol. 3, no. 1, p. 19, Mar. 2019.

[16] M. Leary, “Design of titanium implants for additive manufacturing,” Titanium in Medical and Dental Applications, pp. 203–224, 2018.

[17] S. S. Rao, Engineering optimization: Theory and practice. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2009.

[18] P. W. Christensen, Introduction to structural optimization. 2010.

[19] A. Olason and D. Tidman, Methodology for topology and shape optimization in the design process. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2010.

[20] Y. S. Kong, S. Abdullah, M. Z. Omar, and S. M. Haris, “Topological and topographical optimization of Automotive Spring Lower Seat,” Latin American Journal of Solids and Structures, vol. 13, no. 7, pp. 1388–1405, 2016.

[21] W.-han Choi, J.-moon Kim, and G.-J. Park, “Comparison study of some commercial structural optimization software systems,” Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 54, no. 3, pp. 685–699, 2016.

[22] G. Hauenstein, “Better structures with topology optimization,” LinkedIn, 09-03-2018. [Çevrimiçi]. https://www.linkedin.com/pulse/better-strucutres-topology-optimization-gian-hauenstein/. [Erişim tarihi: 13.07.2022].

[23] S. Liu, Q. Li, J. Liu, W. Chen, and Y. Zhang, “A realization method for transforming a topology optimization design into additive manufacturing structures,” Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 277–285, 2018.

[24] “Lattice structure optimization,” 2021.help.altair.com. [Çevrimiçi]. https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/lattice_structure_optimization_intro_r.htm#lattice_structure_optimization_intro_r. [Erişim tarihi: 15.07.2022].

[25] “Free CAD designs, Files & 3D models: The grabcad community library,” Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library. [Çevrimiçi]. https://grabcad.com/library/3d-scanned-flat-foot-left-1. [Erişim tarihi: 23.07.2022].

[26] “Shoe size,” Wikipedia, 06-Jan-2023. [Çevrimiçi]. https://en.wikipedia.org/wiki/Shoe_size. [Erişim tarihi: 24.07.2022].

[27] A. Jurca, J. Žabkar, and S. Džeroski, “Analysis of 1.2 million foot scans from North America, Europe and Asia,” Scientific Reports, vol. 9, no. 1, 2019.

[28] M. Nouman, T. Dissaneewate, D. Y. R. Chong, and S. Chatpun, “Effects of Custom-Made Insole Materials on Frictional Stress and Contact Pressure in Diabetic Foot with Neuropathy: Results from a Finite Element Analysis,” Applied Sciences, vol. 11, no. 8, p. 3412, Apr. 2021.

[29] C. Wang, X. He, Z. Zhang, C. Lai, X. Li, Z. Zhou, and K. Ruan, “Three-dimensional finite element analysis and biomechanical analysis of Midfoot von Mises stress levels in flatfoot, Clubfoot, and Lisfranc Joint Injury,” Medical Science Monitor, vol. 27, 2021.

[30] Cheung, J. T. M., & Zhang, M. (2006, May). Finite element modeling of the human foot and footwear. In ABAQUS users’ conference Vol. 20, No. 6, pp. 145-58.

[31] “Ultimaker TPU 95A material: 3D print durable and flexible parts,” https://ultimaker.com. [Çevrimiçi]. https://ultimaker.com/materials/tpu-95a. [Erişim Tarihi: 12.07.2022].

[32] “Body mass index,” Wikipedia, 05-Jan-2023. [Çevrimiçi]. https://en.wikipedia.org/wiki/Body_mass_index. [Erişim tarihi: 12.07.2022].

[33] Y. Wang, Z. Li, D. W.-C. Wong, C.-K. Cheng, and M. Zhang, “Finite element analysis of biomechanical effects of total ankle arthroplasty on the foot,” Journal of Orthopaedic Translation, vol. 12, pp. 55–65, 2018.

[34] Y. Tang, G. Dong, Y. Xiong, and Q. Wang, “Data-driven design of customized porous lattice sole fabricated by additive manufacturing,” Procedia Manufacturing, vol. 53, pp. 318–326, 2021.

[35] J. Niu, J. Liu, Y. Zheng, L. Ran, and Z. Chang, “Are arch-conforming insoles a good fit for diabetic foot? Insole customized design by using finite element analysis,” Human Factors and Ergonomics in Manufacturing &Service Industries, vol. 30, no. 4, pp. 303–310, 2020.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferansta Bildirileri

1. Demirbaş, İ., Temiztaş, B.A., & Tanlak, N. "Düztaban ve Diyabet Hastası Bireyler için Kafes Yapılar Kullanılarak Ayakkabı Tabanı Tasarımı ve Optimizasyonu", 10th International Congress on Engineering, Architecture and Design, 24-25-26 Aralık, İstanbul, 2022.