



**NTOPOLOGY İLE TASARIM
OPTİMİZASYONLARININ KIYASLANMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet DAYANÇ

Kütahya- 2022

T.C.
KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**NTOPOLOGY İLE TASARIM OPTİMİZASYONLARININ
KIYASLANMASI**

Danışman:
Dr. Öğr. Üyesi Feridun KARAKOÇ

Hazırlayan:
Ahmet DAYANÇ

Kütahya – 2022

Kabul ve Onay

KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında, 801924110128 öğrenci numaralı, Ahmet DAYANÇ'ın hazırlamış olduğu “nTopology ile Tasarım Optimizasyonlarının Kıyaslanması” başlıklı yüksek lisans tez çalışması ile ilgili tez savunma sınavı jüri tarafından yapılmış ve adayın tezinin OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

21/12/2022

Tez Jürisi	İmza	
	Kabul	Red
Dr. Öğr. Üyesi Feridun KARAKOÇ (Danışman)		
Prof. Dr. Ramazan KÖSE		
Prof. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU		

Doç. Dr. Arif KOLAY
Enstitü Müdürü

Bilimsel Etik Bildirimi

Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığım “nTopology ile Tasarım Optimizasyonlarının Kıyaslanması” adlı çalışmanın öneri aşamasından sonuçlandığı aşamaya kadar geçen süreçte bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle uyduğumu, tez içindeki tüm bilgileri bilimsel ahlak ve gelenek çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığımı, bu çalışmamda doğrudan veya dolaylı olarak yaptığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu beyan ederim.

21/12/2022

Ahmet DAYANÇ

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı: Ahmet Dayanç

ALES (Puan ve Yılı): 85,39511 (2021 – ALES/3)

Yabancı Dil (Puan ve Yılı): İngilizce – 78,75 (2021 – YÖKDİL/2)

Aldığı Sertifikalar:

1 TMMOB AA10228	Asansör Avan Proje Hazırlama
2 TMMOB AS06186	Asansör Mühendis
3 TMMOB AYSS00396	Asansör Yetkili Servis Teknik Sorumlusu Mühendis Yetki Belgesi
4 TMMOB APKT00777	Asansör Periyodik Kontrol Muayene Elemanı Yazılı Sınav Başarı Belgesi
5 TMMOB APKU00698	Asansör Periyodik Kontrol Muayene Elemanı Başarı Belgesi
6 TMMOB DG22317	Doğalgaz İç tesisat
7 TMMOB ED05491	Endüstriyel ve Büyük Tüketimli Tesislerin Doğalgaza Dönüşümü
8 TMMOB	Mekanik Tesisat

Uzmanlık alanı:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Makina Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Yüksek Lisans	Makina Mühendisliği	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi	
Doktora			
Doç. / Prof.			

Projelerde Yaptığı Görevler:

Proje: Kütahya Zafer Kalkınma Ajansı ile “Yenilikçi KOBİ Mali Destek Programı (YKMDP)” kapsamında geri dönüşüm sektöründe otomasyon ile üretim projesinde sorumlu Makina Mühendisi

Makine Tasarımları: Shredder, Bag Opener, Ballistic Separator (tek. çizimler ve fiyat teklifleriyle)

Ürün Tasarımları: Endüstriyel Mutfak - Benmari tezgah çizimleri - abkant, lazer kesim, punch opr.

Denetçi: Asansör Yıllık Periyodik Kontrolü - A tipi muayene kuruluşu - Kütahya Belediyesi

ÖZET

NTOPOLOGY İLE TASARIM OPTİMİZASYONLARININ KIYASLANMASI

DAYANÇ, Ahmet

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Feridun KARAKOÇ

Aralık, 2022, 82 sayfa

Dünya üzerindeki sınırlı enerji ve hammadde kaynaklarının akıllıca ve verimli şekilde kullanılması gerektiği için, parçaların minimum koşulları sağlamaya mümkün olduğunca yakın optimize edilmiş şekilde tasarlanması daha uygun olur. Bunu sağlamak için üzerinde durulması gereken en önemli konulardan biri hafif tasarımların oluşturulabilmesidir. Hafif parça tasarlamak için topoloji optimizasyonu yapılabilir veya kafes yapılar kullanılabilir. Bu çalışmada referans bir tasarım hafifletilmiş ve dış kabuklu gyroid kafes yapıya sahip bir parça tasarlanmıştır. Bu tasarım geliştirilirken, kafes yapı ve dış kabukta veri bazlı bir optimizasyon tekniği uygulanmıştır. Ayrıca, geliştirilmiş kafes tasarımlı parça ile aynı ağırlığa sahip olan topoloji optimizasyonu yapılmış bir gövde kıyaslanmıştır. Son olarak hibrit bir tasarım yaklaşımıyla, topoloji geometrisine sahip dış kabuğa ve periyodik kafese sahip bir tasarım, yönlendirilmiş hücre haritasına sahip başka bir versiyon ve kabuksuz yapıda alternatif bir diğer tasarım da maksimum yer değiştirme ve gerilme değerleri açısından kıyaslanmıştır. Elde edilen bulgular, rijitlik açısından gözenekli bir yapıya ihtiyaç duyulmadıkça topoloji optimizasyonu yönteminin seçilmesine yönlendirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gyroid, Kafes Yapı, nTopology, Topoloji Optimizasyonu

ABSTRACT**COMPARISON OF DESIGN OPTIMIZATIONS WITH NTOPOLOGY****DAYANÇ, Ahmet****Master Thesis, Department of Mechanical Engineering****Supervisor: Asst. Prof. Feridun KARAKOÇ****December, 2022, 82 pages**

Since the limited energy and raw material resources in the world must be used wisely and efficiently, it would be more appropriate for the parts to be designed in an optimized way, as closely as possible to meet the minimum conditions. In order to achieve this, one of the most important issues to be considered is the creation of lightweight designs. Topology optimization or lattice structures can be used to design lightweight parts. In this study, a reference design was lightened and a part which has gyroid lattice structure with outer shell was designed. While developing this design, a data-based optimization technique has been applied to the lattice structure and outer shell. In addition, a topology-optimized part which has same weight with the improved lattice designed part was compared to each other. Finally, with a hybrid design approach, a periodic latticed design with outer shell which has topology geometry, another version with warped cell map, and another alternative design with nonshell structure were compared in terms of maximum displacement and stress values. The findings suggest that the topology optimization method should be chosen unless a porous structure is needed in terms of rigidity.

Keywords: Gyroid, Lattice Structure, nTopology, Topology Optimization

ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans Tezinde nTopology yazılımında ürettiğim tasarımların analiz sonuçlarının kıyaslanması ile elde ettiğim bilgileri dikkatinize sunmaktayım.

Başta beni yetiştirmek için büyük emek gösteren ailem, rahmetli annem Refiye DAYANÇ ve rahmetli babam Sami DAYANÇ' ı saygı, minnet ve rahmetle anıyorum.

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Ramazan KÖSE başta olmak üzere, bölümdeki tüm kıymetli Hocalarıma ve tez çalışması sırasında kendimi geliştirmeme katkı sağlayan çok değerli danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Feridun KARAKOÇ' a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
GÖRSEL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	xi
KISALTMALAR.....	xii
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM İMPLİCİT MODELLEME VE OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

1.1 İMPLİCİT MODELLEME.....	10
1.1.1 nTopology Yazılımı.....	10
1.2 OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ	16
1.2.1 Kafes Yapılar	16
1.2.2 Topoloji Optimizasyonu	18

İKİNCİ BÖLÜM MATERYAL VE METOD

2.1 TASARIM VE ANALİZ SÜRECİ	24
2.1.1 Çalışma 1: Referans Tasarım.....	24
2.1.2 Çalışma 2: Kafes Yapıya Sahip Tasarım.....	31
2.1.3 Çalışma 3: Geliştirilmiş Kafes Yapıya Sahip Tasarım.....	33
2.1.4 Çalışma 4: Topoloji Optimizasyonu Yapılmış Tasarım.....	38
2.1.5 Çalışma 5: Hibrit Tasarım	41

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 MESH KRİTERİ VE ANALİZ SONUÇLARI.....	46
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	60
KAYNAKÇA	65
DİZİN	68

GÖRSEL LİSTESİ

Görsel 1.1: nTopology Şeması	10
Görsel 1.2: Sadeleştirilmiş Modelleme Teknolojisi	11
Görsel 1.3: BRep ile Implicit Arasındaki Unsur Farkları	11
Görsel 1.4: nTopology' de İçer Aktarılabilen Dosya Türleri.....	12
Görsel 1.5: Geleneksel Yöntem ile Implicit Yöntem Farkı	12
Görsel 1.6: Implicit Alan Kavramı için Harita Örneği.....	13
Görsel 1.7: Alan Örneği için Çeşitli Veri Kaynakları	14
Görsel 1.8: Implicit Alanda Pozitif ve Negatif Bölgeler.....	15
Görsel 1.9: Negatif Alanın Render Edilerek Görselleştirilmesi.....	15
Görsel 1.10: Alanda Skaler ve Vektörel Farklar	16
Görsel 1.11: Kafes Yapılar.....	17
Görsel 1.12: Yaygın Kullanılan Birim Hücre Tipleri	18
Görsel 1.13: Örnek 3 Boyutlu Kafes Yapılar.....	18
Görsel 1.14: Yoğunluk Eşik Değerinden Oluşturulan IsoSurface	19
Görsel 1.15: Örnek bir Optimizasyon Hedefi	20
Görsel 1.16: Tasarım Kısıtlarının Listesi	20
Görsel 1.17: Topoloji Optimizasyonu Bloğu	21
Görsel 1.18: Sınır Cezası Parametresine göre Farklı Oluşan Geometrilere.....	22
Görsel 2.1: "Import Part" Bloğunun Kullanımı	24
Görsel 2.2: Yükleme Yüzlerinin Seçilmesi.....	25
Görsel 2.3: Sabitlenen Yüzlerin Seçilmesi.....	26
Görsel 2.4: CAD Verinin Implicit Gövdeye Dönüştürülmesi.....	26
Görsel 2.5: Mesh İşlemi için Keskin Unsurları Belirleyen Kabuk Geometri	27
Görsel 2.6: Meshleme İşlemi	28
Görsel 2.7: Remesh İşlemi	29
Görsel 2.8: Hacim Meshi Oluşturma.....	30
Görsel 2.9: Sınır Koşullarının Girilmesi	31
Görsel 2.10: Hafif Parçanın X-Y Düzlemindeki Kesiti	32
Görsel 2.11: Hafif Parçanın Y-Z Düzlemindeki Kesiti.....	32
Görsel 2.12: 2. Tasarımın Meshlenmesi.....	33
Görsel 2.13: Skaler ve Nodal, Nokta Bulutu Verileri	34
Görsel 2.14: Nokta Bulutundan Oluşturulan Implicit Alan	34
Görsel 2.15: Implicit Alanda Noktasal Prob Değerleri	35
Görsel 2.16: Gyroid Birim Hücrelerin Değişken Duvar Kalınlığı.....	36
Görsel 2.17: Değişken Duvar Kalınlığına Sahip Diğer Bölge	36
Görsel 2.18: Y-Z Kesitinden Gözlemlenen Lokal Değişim.....	37
Görsel 2.19: Y-Z Kesitinden Gözlemlenen Diğer Bir Lokal Değişim.....	37
Görsel 2.20: Değişken Dış Kabuk.....	38
Görsel 2.21: Topology Optimizasyonu Sonucu	39
Görsel 2.22: Optimizasyon Hedefinin Yakınsaması	39
Görsel 2.23: Hacim Kısıtının Yakınsaması.....	40
Görsel 2.24: Gövde Yüzeyindeki Pürüzlerin Giderilmesi	41
Görsel 2.25: Hibrit Gövdede Gyroid Kafes Yapı.....	42
Görsel 2.26: Periyodik Kafes Yapının Bükülmesi	42
Görsel 2.27: Birim Hücrelerdeki Uzamsal Değişim	43
Görsel 2.28: Uzamsal Değişimin X-Y Kesitindeki Görünümü.....	43
Görsel 2.29: Periyodik Kafes ile Uzamsal Değişmiş Kafesin Farkı	44
Görsel 3.1: Skewness Kriteri (Eşkenar Hacim Sapması).....	46

Görsel 3.2: Skewness Kriteri (Normalleştirilmiş Açık Sapması)	47
Görsel 3.3: Orthogonality Kriteri	48
Görsel 3.4: 1. Tasarımda Maksimum Yer Değiştirme	49
Görsel 3.5: 1. Tasarımda Ölçeklendirilmiş Yer Değiştirme.....	49
Görsel 3.6: 1. Tasarımda Von Mises Gerilme Verileri	50
Görsel 3.7: 1. Tasarımda Noktasal Singularity	50
Görsel 3.8: 2. Tasarımda Maksimum Yer Değiştirme	51
Görsel 3.9: 2. Tasarımda Von Mises Gerilme Verileri	51
Görsel 3.10: 3. Tasarımda Maksimum Yer Değiştirme	52
Görsel 3.11: 3. Tasarımda Von Mises Gerilme Verileri	53
Görsel 3.12: 3. Tasarımın Y-Z Düzlemine Ait Kesitte Gerilme Dağılımı.....	53
Görsel 3.13: 4. Tasarımda Maksimum Yer Değiştirme	54
Görsel 3.14: 4. Tasarımda Von Mises Gerilme Verileri	54
Görsel 3.15: 5. Tasarımda Maksimum Yer Değiştirme	55
Görsel 3.16: 5. Tasarımda Von Mises Gerilme Verileri	56
Görsel 3.17: 5. Tasarımda Yönlendirilmiş Kafeste Maksimum Yer Değiştirme.....	56
Görsel 3.18: 5. Tasarımda Yönlendirilmiş Kafeste Von Mises Gerilme Verileri.....	57
Görsel 3.19: 5. Tasarımda Dış Kabuksuz Kafeste Maksimum Yer Değiştirme	57
Görsel 3.20: 5. Tasarımda Dış Kabuksuz Kafeste Von Mises Gerilme Verileri	58

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1: Sonuçların Karşılaştırılması.....	59
---	----



KISALTMALAR

BREP Boundary Representation

CAD Computer Aided Design

CSV Comma Separated Values

CT Computerized Tomography

FE Finite Element

kN kiloNewton

mm milimetre

mPA megaPascal

nTop nTopology

Pa Pascal

SEM Scanning Electron Microscope

SIMP Solid Isotropic Material with Penalization

STEP Standard for the Exchange of Product Data

TPMS Triply Periodic Minimal Surfaces

X_B Parasolid File (Binary version)

X_T Parasolid File (Text version)



TEZ METNİ

GİRİŞ

Üretilmesi planlanan ürünlerin amacına uygun tasarlanması oldukça önemlidir. Dünya üzerindeki sınırlı enerji ve hammadde kaynaklarının akıllıca ve verimli şekilde kullanılması gerektiği için, parçaların minimum koşulları sağlamaya mümkün olduğunca yakın optimize edilmiş şekilde tasarlanması daha uygun olur. Bunu sağlamak için üzerinde durulması gereken en önemli konulardan biri hafif tasarımların oluşturulabilmesidir.

Günümüzde 3 boyutlu tasarım için kullanılan CAD programlarının yardımıyla tasarlanan parçalar, amaçlarına uygun olup olmadığının simüle edilebildiği programların yardımıyla yapılacak analizlere istinaden, tasarımlarının optimal olup olmadığı kıyas edilebilir ve davranışları öngörülebilir duruma gelir. Analiz sonuçları birer çıktı olup, parçanın tasarımı optimal durumdan uzaksa, analiz verileri tasarımın yeniden dizaynında mühendisler için yol gösterebilmektedir.

Yeniden tasarım sürecinde bir mühendisin mevcut tasarıma çok sayıda alternatif tasarımlar oluşturarak ve analiz ederek optimal tasarıma yaklaşmaya çalışması, mühendisin işgücünü verimsiz kullanmasına sebep olabilir ve ideal tasarıma yaklaşması oldukça zaman alabilir. Hafif parça tasarlamak için kullanılabilecek bazı pratik yöntemlerle ise bu işgücünün verimli kullanılması sağlanabilir ve zaman yönetimi açısından avantaj getirebilir. Bu yöntemlerden biri, topoloji optimizasyonu yapmaktır.

Topoloji optimizasyonu, belirli bir geometrik alanın sınırları içerisinde, geometrik alandaki malzemenin bir kısmının boşaltılması sonucunda malzemenin yalnızca ihtiyaç duyulan yerlerde bulunmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem algoritma ile tamamlanan ve iterasyon içeren bir süreç olup, gereksiz malzemeyi kaldırma işlemini belirli sınır koşullarının çerçevesi içerisinde yapmaktadır. Optimizasyon hedefleri ve kısıtları tasarımın amaçlarına göre belirlendikten sonra ortaya çıkan geometri, ideal duruma en yakın yapı olmaktadır.

Hafif parça tasarımında kullanılabilecek bir diğer yöntem ise kafes yapı oluşturmaktır. Kafes yapıların tasarım sürecinde bir birim hücrenin tüm eksenlerde çoğaltılarak periyodik yapılar oluşturulması nispeten daha kolay olsa da, kafes yapının değiştirilmesi zorlaşabilir. Periyodik kafes yapılarda uzamsal yönlendirmeler yapmak istediğimizde, stokastik yapılar oluşturmak istediğimizde veya spesifik özelleştirmeler

gerektiğinde yeniden tasarım süreci zahmetli, çok zor veya imkansız duruma gelebilmektedir.

Bu sebeple çok kompleks olabilecek kafes yapılarda CAD tasarım yöntemindeki süreç veya zorluklardan kaçınmak için bir alternatif olarak Implicit modelleme yöntemi kullanılabilir.

Tezin Amaç ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında referans alınan bir CAD tasarım için, belirli sınır koşulları içerisinde tasarım optimizasyonları yapılmıştır. Yapılan tasarım optimizasyonları için kullanılacak yöntemler farklılık göstermektedir.

Tasarımlar öncelikle CAD verisinin Implicit gövdeye dönüştürülmesiyle oluşturulmuştur. Bu çalışmada Implicit modellemenin CAD modelleme sürecine göre farklılık gösterdiği kısımlar açıkça görülmektedir.

Tasarım optimizasyonlarının kapsamı, belirli bir ağırlık kazancının sağlandığı yeni ve hafif tasarımlarla ilgilidir ve yeni tasarımların yapısal analiz edilmesi sonucunda elde edilen veriler, konstrüksiyonlarındaki farklar dikkate alınarak kıyaslanmıştır. Kıyaslanmanın kapsamında ise maksimum yer değiştirme ve gerilmeler arasındaki farkların tespit edilerek, iki farklı hafifletme yönteminin kendi arasında kıyas edilmesi ve sonuçlarla ilişkili olarak çıkarım yapılması yer almaktadır.

Çalışmaya ait ilk tasarım, referans bir tasarım olup analiz edilmiştir. İkinci tasarım, ilk tasarımın hafifletilmesi sonucu 15x15x15 mm gyroid birim hücrelerden periyodik bir kafese ve 1.5 mm dış kabuğa sahiptir. Üçüncü tasarım, ikinci tasarımdaki kafes yapının ve kabuk kalınlığının data-driven design tekniği ile veri bazlı optimizasyonu işlemidir. Dördüncü tasarım, üçüncü tasarım ile aynı ağırlıkta olan, topoloji optimizasyonu yapılmış bir gövde tasarımıdır. Beşinci tasarım, dördüncü tasarım ile aynı ağırlıkta olan, hibrit bir tasarım olarak, topoloji geometrisine sahip dış kabuk içinde periyodik kafes yapı içermektedir.

Ayrıca beşinci tasarımdan yola çıkarak iki farklı alternatif tasarım daha oluşturulmuştur. İlk alternatif, periyodik hücre haritasının topoloji gövdesine büküldüğü yönlendirilmiş bir hücre haritası içermektedir. İkinci alternatif, dış kabuk etkisini tespit etmek için kabuksuz bir tasarım içermektedir.

Literatür Araştırması

(Alkhatib vd., 2023) “Simple Cubic” ve “Body Centered Cubic” türündeki kafesleri karşılaştırma için incelemişlerdir. Kafes yapıların basma davranışını incelemek için sonlu elemanlar analizini kullanırken, deneysel yöntemlerle doğrulamak üzere kafes yapıları üretmek için lazer toz yatağı füzyonu eklemeli imalat yöntemini kullanmışlardır. Kafesin topolojisi ve bağlı yoğunluğun mekanik davranış üzerindeki etkilerini, sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca kafeslerin enerji soğurma izotropisini değerlendirmek için farklı yönlerde yüklemişlerdir. Çalışmanın sonuçları topolojisi optimize edilmiş kafesin karışık bir eğilme deformasyonu ve esneme davranışı sergilediğini göstermiştir. Ayrıca topolojisi optimize edilmiş yapılar, üçlü periyodik minimal yüzeylere göre daha yüksek enerji absorpsiyonu göstermiştir.

(Cantaboni vd., 2022) Çalışmalarında Co-Cr-Mo alaşımı kullanarak lazer toz yatağı füzyonu eklemeli imalat yöntemi ile farklı kafes yapılarına sahip numuneler üretmişlerdir. Mekanik davranışlarını belirlemek için sıkıştırma testleri yapmışlardır. Ayrıca mekanik davranışı tahmin etmek için Abaqus ile FE simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Son olarak incelenen birim hücrelerin geometrisine göre kafes yapıların sertliğini incelemek için nTopology yazılımı kullanmışlardır.

(Chandrasekhar & Suresh, 2021) Sinir ağları ve makine öğrenme tekniklerini kullanmış ve veri odaklı eğitim ile görüntü işleme yoluyla topoloji optimizasyonu yürütebileceklerini ve optimizasyon sürecini hızlandırabileceklerini göstermişlerdir. Bu çalışmada “solid isotropic material with penalization” yoğunluk alanını temsil etmek için sinir ağlarının aktivasyon fonksiyonlarını kullandıkları için sonlu eleman ağından bağımsızdır.

(da Silva vd., 2022) Topoloji optimizasyonunda önceden belirlenmiş kırılma noktaları kavramını ele almışlardır. Çalışmanın amacında, aşırı yük durumunda arızanın ilk olarak nerede meydana geleceğini kontrol edebilen bir topoloji optimizasyonu formülasyonu önermek ve bunu araştırmak vardır. Ayrıca topoloji optimizasyonu yapılmış geometri, hasarlı kısım çıkarıldıktan sonra tasarım yüküne dayanmalıdır. Bu amaca ulaşmak için malzeme dağılımlarını Von Mises gerilme kısıtıyla iki kademedeyi gerçekleştirmişlerdir. İlk kademe nominal tasarımı ve ikinci kademe hasarlı tasarımı eder. Nominal tasarımda aşırı yük durumunda arızanın ilk meydana geleceği bölge, önceden belirlenmiş hasar bölgesi olarak tanımlanır. Buradaki tasarım kısıtına göre maksimum

Von Mises eşdeğer gerilmesi, yapının geri kalanındaki gerilmelerden biraz daha büyük olacak şekilde tanımlanır. Kırılmadan sonra hasarlı kısım olmadan ortaya çıkan geometrinin uygulanan yüke hala dayanmasını sağlamak için farklı gerilme kısıtı kullanmıştır. Çalışmanın sonucunda algoritma, kırılmanın önceden bilinen bir bölgede gerçekleşmesini sağlayacak şekilde yapılar oluşturabildiğini ve hasarlı kısım çıkarıldıktan sonra yapının güvenli kaldığını göstermiştir.

(Dong, 2021) Çalışmasında “Simple Cubic” ve “Body Centered Cubic” Ti-6Al-4V yapıları snap-fit metodolijisini kullanarak kombine etmiştir ve eklemlerinden metalürjik olarak birleştirmek için vakumlu lehimleme yöntemini kullanmıştır. Snap-fit yapıların mekanik davranışlarını test etmek için farklı bir yaklaşım uygulamıştır ve hem deneysel, hem de sonlu eleman analizinin sonuçları kenar etkisini dikkate almış ve aralarında iyi uyum bulunmuştur ve bu yapıların yüksek sıcaklıkta hafif yük taşıma uygulamaları için potansiyel aday olabilecekleri sonucuna varmıştır.

(Efremov vd., 2021) Periyodik kafes yapıların bir hacimde elastik davranışları tetiklemesine izin verdiğini göstermek üzere, periyodik kafeslere uzamsal değişiklikler yaparak ve kristalografi teorisindeki simetrilerin standart sınıflandırmalarından yola çıkarak elastik davranış ile arasında tutarlı bir uyum olduğunu ortaya koymuşlardır.

(Freitag vd., 2022) Çalışmalarında belirsiz yük ve belirsiz malzeme parametrelerinin dikkate alındığı bir topoloji optimizasyonu yaklaşımı sunmaktadır. Uyum minimizasyonu, yani rijitlik maksimizasyonu sonlu eleman formülasyonuna dayalı olarak uygulanır fakat belirsiz yapısal yük parametrelerini ve belirsiz malzeme davranışını hesap etmek için farklı bir optimizasyon yaklaşımını benimsemişlerdir. Yapısal parametreler ve tasarım değişkenleri, rastgele değişken, aralık ve olasılık kutuları olarak sayısallaştırıldığı için optimizasyon problemini çözmek, yüksek bir hesaplama eforu ortaya çıkarmakta ve sonlu elemanlar formülasyonu amaç fonksiyonlarını ve kısıtlamalarını milyonlarca kez değerlendirmek zorundadır. Bu sebeple optimizasyon sürecini hızlandırmak için sonlu eleman formülasyonunun yerini yapay sinir ağları almıştır ve tasarım alanı içinde kısıt olarak maksimum gerilmeleri ve yer değiştirmelerini kullanan malzeme yoğunluğu dağılımını elde etmişlerdir.

(Guimarães vd., 2021) Üçlü periyodik minimal yüzey olan gyroid oluşturmak için nTopology yazılımını ve yapısal analizleri tamamlamak için Ansys’ i kullanmışlardır. Farklı gyroid yoğunluklarını sayısal olarak analiz etmişlerdir ve deneysel doğrulama için

DIN5120 malzeme ile en iyi ağırlık/gerilme oranına sahip numuneleri ASTM E9 standardına göre sıkıştırma testine tabi tutmuşlardır. Sonuçlar gyroid yoğunluğunun, ağırlık ve gerilme arasında lineer bir bağ ile ilişkili olmadığını göstermiştir. Bunun yanı sıra malzeme dağılımının, gerilme konsantrasyonu olgusundan etkilenen numune performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve sayısal model ile deneyler arasında iyi bir uyum olduğunu gözlemlemişlerdir.

(Jafferson & Sharma, 2021) Pnömatik olmayan havasız lastikleri 12 farklı giriş tipi kafes yapısında, 16 farklı üçlü periyodik minimal yüzey tipi kafes yapısında ve çeşitli hibrit yapıdaki formlarda tasarlamak ve ağırlıklarını kıyaslamak üzere, farklı kafes yapı varyasyonlarını oluştururken implicit modellemenin avantajını kullanan nTopology’ de oldukça hızlı ve kolayca tasarlanabileceğini ve ağırlıklarının kıyaslanabileceğini göstermiştir.

(Jankovics & Barari, 2019) Otomotiv bileşeni tasarımı için eklemeli imalat baskı sürelerini ve gereksiz destek yapısı kullanımı azaltan bir yaklaşıma dikkat etmiş ve eklemeli imalat sürecinde minimum yüksekliğin sağlanmasını gözeterek, çıkıntı açılarını da dikkate alan bir topoloji optimizasyonu çalışması yapmıştır.

(Karakoç, 2016) Tasarladığı hücresel kafes yapıları kobalt-krom toz metali kullanan ve “Direkt Metal Lazer Sinterleme” teknolojisine sahip metal yazıcı ile üretmiş olup, SEM ve CT analizi yaptığı numuneleri basma testine tabi tutmuştur. Test sonuçları ile hücre boyutunun, hacim oranının, kabuk etkisinin, ısıtma işlem etkisinin ve kullandığı hücre tiplerinin etkisini kıyaslamıştır.

(Kladovasilakis vd., 2023) Farklı tipte birim hücreleri kullanarak bir hibrit mimari içinde, tek bir birim hücre oluşturmuştur. Oluşturduğu 4 farklı hibrit mimarinin mekanik özelliklerini bağıl yoğunluklarına bağlı olarak kıyaslamıştır. Oluşturduğu yapıların kalınlığının bağıl yoğunluk üzerindeki etkisini incelemiş ve normalleştirilmiş elastik modüllerini kıyaslamıştır. Test numunelerini seçici lazer sinterleme tekniği ve Polyamid 12 malzemesini kullanarak üretmiş olup, deneysel verilerden yararlanarak her bir hibrit mimari için hiper-elastik sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur. “Schwarz Diamond” ve “Face-Centered Cubic” ile oluşturduğu hibrit yapı, tek başına “Schwarz Diamond” yapısından yaklaşık iki kat daha fazla mekanik dayanım sergilemiştir.

(Kneissl vd., 2022) Otomotiv alanında elektrik tahrikli motor sporlarında kullanılan fren sistemleri için bir hidrolik muhafaza geliştirmiştir. Hidrolik muhafaza, tüm elektrikli ve hidrolik cihazları birbirine bağlayan karmaşık bir kanal sistemi barındırdığından fren sisteminin temel bir bileşenidir ve genel olarak hafif bir tasarımın yanı sıra, mekanik ve hidrolik gereksinimleri de karşılamalıdır. Tasarımın kendisi için “Creo Parametric”, topoloji optimizasyonu ve FEM analizi için “Inspire” ve kafes yapıları oluşturmak için nTopology yazılımını kullanmışlardır. Ürettikleri iki prototip de alüminyum alaşımı AlSi10Mg’ den lazer toz yatağı füzyonu yöntemi ile üretilmiş olup, prototiplerden biri geleneksel olarak üretilen bir muhafazadan türetilmiş ve diğeri ise eklemeli imalatın tüm avantajlarını kullanmış ve kıyaslanmıştır.

(Liu vd., 2018) Üretim odaklı topoloji optimizasyonu algoritmalarındaki gelişmelere yönelmiş olup, destek yapıların inceltilmesi, çıkma açılarının minimum destek yapı gereksinimi açısından büyük olması, remark, gözenekli yapı dolgusu, malzeme anizotropisi, mikroyapı kontrolü ve çok malzemeli topoloji optimizasyonu gibi bazı çalışmaları ve gelişmeleri derlemişlerdir.

(Low vd., 2018) Ticari olarak mevcut bir 3D bio baskı yöntemi kullanarak hepatic perfüzyonda standardizasyon için kontrol edilebilir geçirgenliğe sahip ve karaciğeri doğru şekilde taklit edecek fantomların üretimini ele almışlardır. Altıgen kanallı fantomlar nTopology’ de tasarlanmış olup, 0.9 – 1.5 g/cm³ yoğunluğa sahip malzemeler ile basılmıştır. “Fused Deposition Modelling” için polilaktik asit seçilirken, “Multijet Printing” adı verilen mürekkep püskürtmeli baskı işlemi için tescilli reçineler kullanılmıştır. Darcy yasasına uyan akış hızlarını gözlemlemek için numuneler üzerinde geçirgenlik testi yapılmış olup, her iki baskı yönteminde de numunelerdeki gözenek boyutunu analiz etmek için taramalı elektron mikroskobu kullanılmış ve gözenek ara bağlantısını analiz etmek için CT taramaları yapılmıştır.

(Miki, 2023) Eklemeli imalatla üretilebilirliği iyileştirmek için bozulmaları ve aşırı ısınmayı dikkate alan ve kendi kendini destekleyecek bir optimizasyon yöntemi oluşturmak üzere, çıkıntı açısı olarak verilen kısıta ve ısı yayılımına dikkat eden termal kısıta bağlı olacak şekilde bir optimizasyon algoritması oluşturmuşlardır.

(Nandakumar Harithsa vd., 2022) Mermi etkisine maruz kalan, tek katmanlı bir kafese sahip ince Ti6Al4V parçaların davranışını değerlendirebilmek için hesaplamalı bir yaklaşım uygulamıştır. Kafes yapıların homojenleştirilmesi nTopology yazılımında

yapılmıştır. Etki analizi, ikisi topoloji optimizasyonundan türetilen sekiz kafes yapısı üzerinde ve karşılaştırma için ölçüt olarak bir katı levha ile bir içi boş levha üzerinde gerçekleştirilmiştir. 250m/s yüksek hızlı darbe Ansys’ deki “Explicit Dynamics” modülü ile simüle edilmiştir ve daha yoğun kafeslerin daha yüksek yavaşlamayla sonuçlandığını göstermiştir.

(Şekercioğlu, 2018) Hafif parça tasarlamak için eşit zorlamalı tasarım tekniğinin kullanılabileceğini belirtmiştir. Mil için bir tasarım örneği vererek, milin eksenini boyunca oluşan eğilme gerilmesi eşit olmadığından, alınacak kesitlerde gerilmelerin yaklaşık olarak birbirine eşit olmasının sağlanması için malzeme boşaltılarak her kesite ait çaplarda değişiklik yapılabileceğini ve bu yolla yaklaşık iki kat ağırlık avantajı elde edilebileceğini göstermiştir.

(Thore vd., 2019) Topoloji optimizasyonunda çıkıntı açısı için girilen kısıtın tam olarak karşılanamadığı durumlarda bir dezavantaj olarak, gerilme tekillikleriyle sonuçlanan keskin iç köşelerin üretilebildiği durumları önlemek için çalışma yapmışlardır. Bu kapsamda algoritma, ceza faktörü seçimi ile çıkıntı kısıtlamasının ne kadar yakından karşılandığını düzenleyen bir ceza formülasyonu ile değiştirilir. Ceza fonksiyonunda belirli ağırlık faktörlerini uygun şekilde seçerek, destek yapılarının maliyeti formülasyona basit ve düşük hesaplama yükü ile yansıtılmıştır.

(Wu vd., 2022) Yapıların dinamik kırılma direncini iyileştirmek için bir topoloji optimizasyonu yaklaşımı önermişlerdir. Kırılma için faz alanı yöntemi ile topoloji optimizasyonundaki cezalandırmalı katı izotropik malzeme yöntemi birleştirilmiştir. Bu durumda topoloji optimizasyonu, çatlakların başlangıcından yapının tamamen yıkılmasına kadar, hacim ve uygunluk kısıtlamaları altında tüm dinamik yükleme süreci boyunca kırılma enerjisinin en aza indirilmesi olarak tanımlanır. Darbe yüklemesine maruz kalan yapıları içeren sayısal örnekler incelenmiş olup, mevcut çerçevenin statik optimizasyonla elde edilen tasarımlara kıyasla kırılma enerjisinde önemli bir azalmaya izin verdiği gösterilmiştir.

(Yap vd., 2022) Ultra hafif mikro-ihya’ ların tasarım ve üretim süreci üzerine çalışma yapmışlardır. Seçici lazer sinterleme kullanarak Polyamid 12 malzemeden üretilen yapının sonlu elemanlar simülasyonu, 3 noktalı ve 4 noktalı eğilme testlerinin mekanik tepkisi ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Sonrasında optimize edilmiş tasarım yazdırılmış ve yük testine istinaden doğrulama yapıp, sayısal ve deneysel veriler

arasında yakın bir korelasyon bulunmuştur. Genel olarak topoloji optimizasyonu farklı spesifikasyonlara ve gereksinimlere de hitap edebilirken, ek olarak mikro-ihaların tasarım ve hızlı prototiplenmesi için de kullanılabileceğini göstermiştir.





BİRİNCİ BÖLÜM

IMPLICIT MODELLEME VE OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

1.1 IMPLICIT MODELLEME

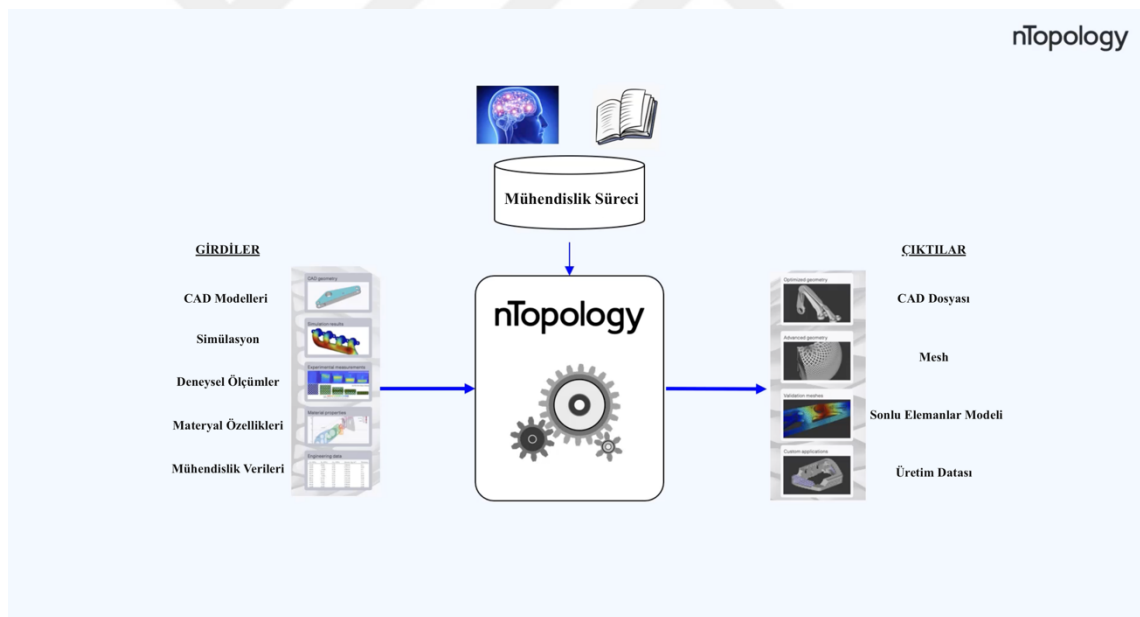
1.1.1 nTopology Yazılımı

nTopology, mevcut mühendislik yazılım ve araçlarından alınan çıktılar üzerinde çalışarak, tamamlayıcı bir role sahiptir. Bu sebeple iş akışları nTopology’ de sıfırdan başlamaz. Bunun yerine mevcut CAD, mesh ve bazı mühendislik verileri veya dosyaları tek başına ya da kombine olarak nTopology’ e aktarılır.

nTopology’ e aktarılan dosyalar başka araçlarla yapılması zor veya imkansız olan karmaşık geometrileri oluşturmak için referans niteliğinde olup, çalışmanın sonuçları ile üretim verisi elde edilebilir veya harici yazılımlarda daha fazla analiz yapmak için dışa aktarılabilir.

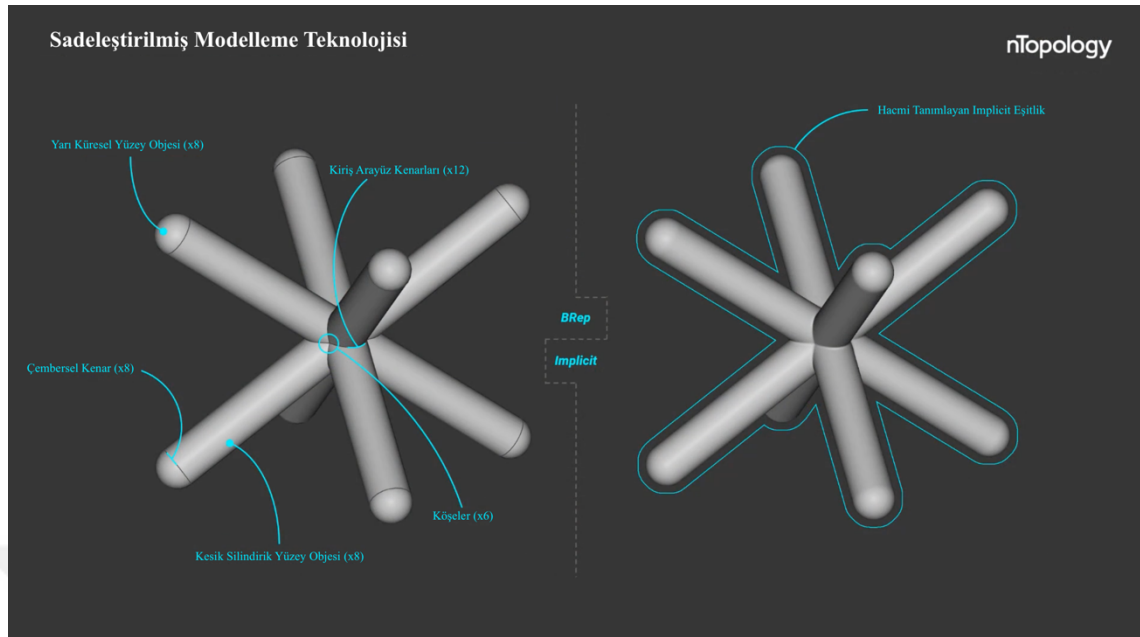
Bu sebeple nTopology spesifik bir parça için değil, herhangi bir geometri üzerinde çalışabilen iş akışlarını içerir.

Görsel 1.1: nTopology Şeması



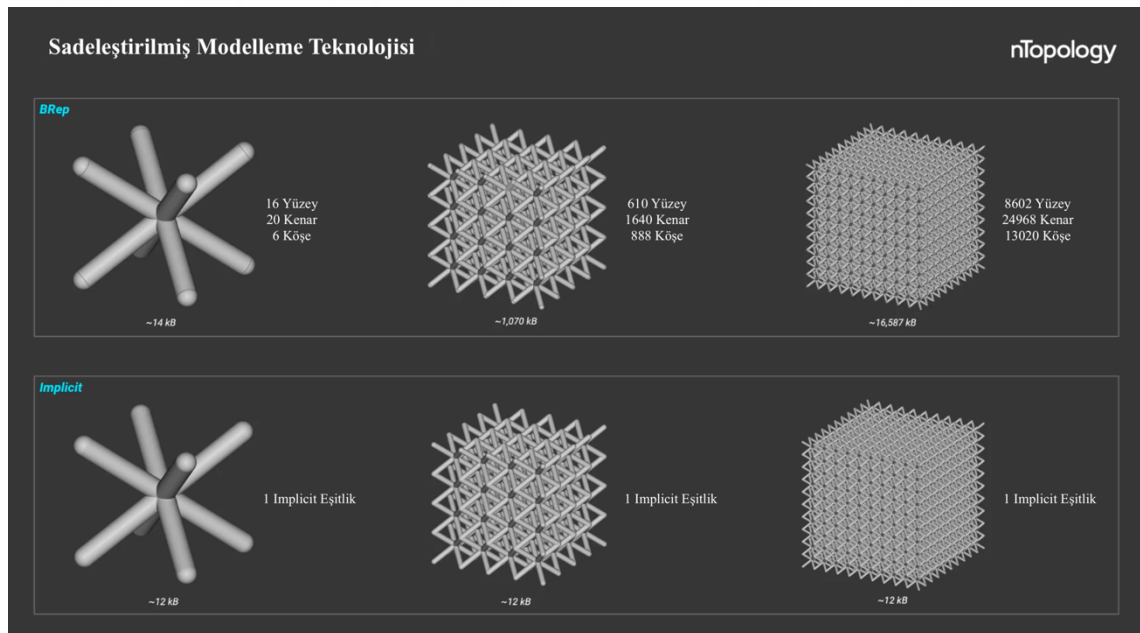
Bu iş akışları yeniden kullanılabilir, otomatikleştirilebilir ve takım arkadaşları ile paylaşılabilir özelliktedir. nTopology’ in bu özelliklere sahip olması, geometrinin yazılım içinde tanımlanma metodundaki farktan gelmektedir. Geleneksel metod olan “Boundary Representation” metodu ile geometride tasarladığımız yüzeyler, birbirine kenar ve köşe unsurları ile birleştirilir. Tasarladığımız yüzeyler katı parçanın iç ve dış kısmı için ayırıcı bir sınırdır. nTopology’ deki metod farklı çalışır. “Implicit” olarak bilinen metod, BREP’ te aynı geometriye sahip hacmi bir matematiksel eşitlik ile tanımlar.

Görsel 1.2: Sadeleştirilmiş Modelleme Teknolojisi



Bu metod geometri verisinin sadeleştirilmesi anlamına gelir. Implicit eşitlik ile çalıştığı için kompleks yapılar çok hızlı bir şekilde oluşturulabilir ve bu başarımlar dosya boyutları çok artmadan sağlanır.

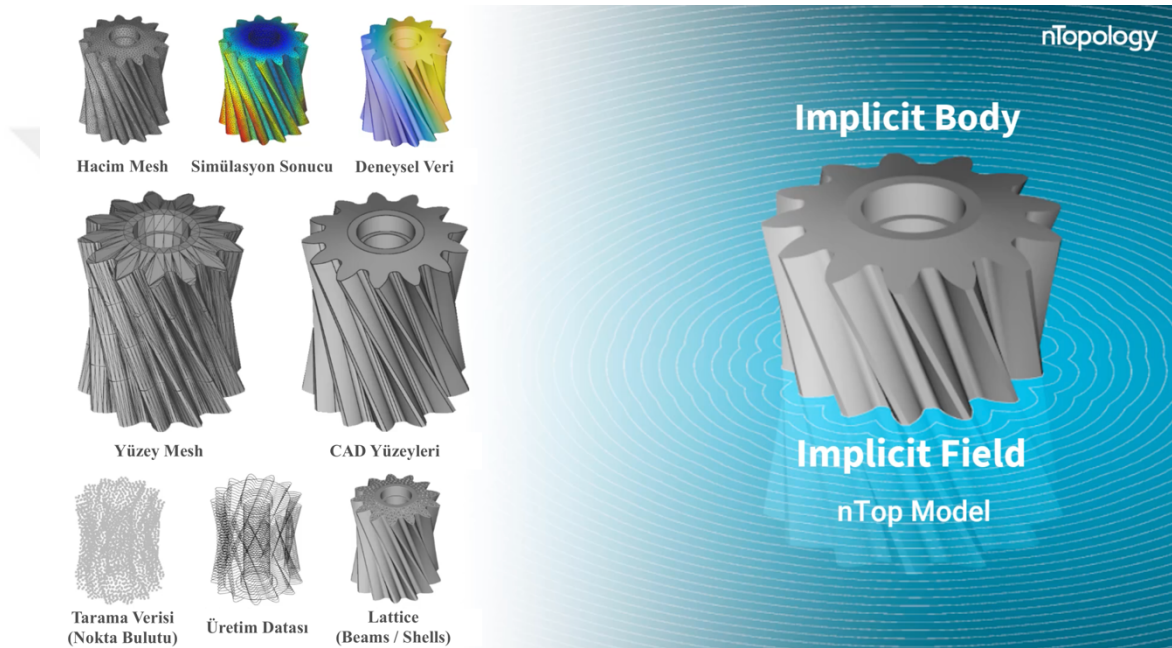
Görsel 1.3: BRep ile Implicit Arasındaki Unsur Farkları



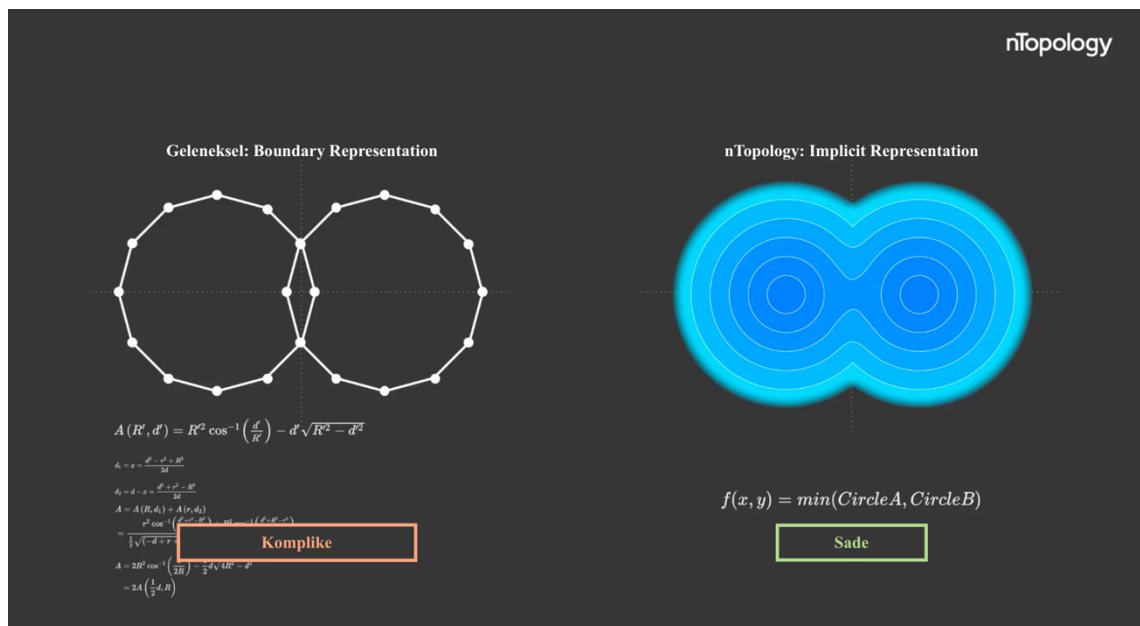
nTopology, hacmi tanımlayan implicit eşitliği yazılımın arka planında saklı tutar. Giriş parametreleri değiştiğinde bu eşitliği yeniden hesaplar ve ekranda görselleştirmek üzere render eder. nTopology' nin ana formatı olan bu görselleştirilmiş objeye “Implicit Body” denir.

Her “Implicit Body” ile ilişkili olan bir “Implicit Field” alanı vardır. Implicit Field, eşitliğin alan temsilidir. Eşitliğin render alınmasında ve görselleştirilmesinde kullanılan bir unsurdur.

Görsel 1.4: nTopology' de İçe Aktarılabilen Dosya Türleri

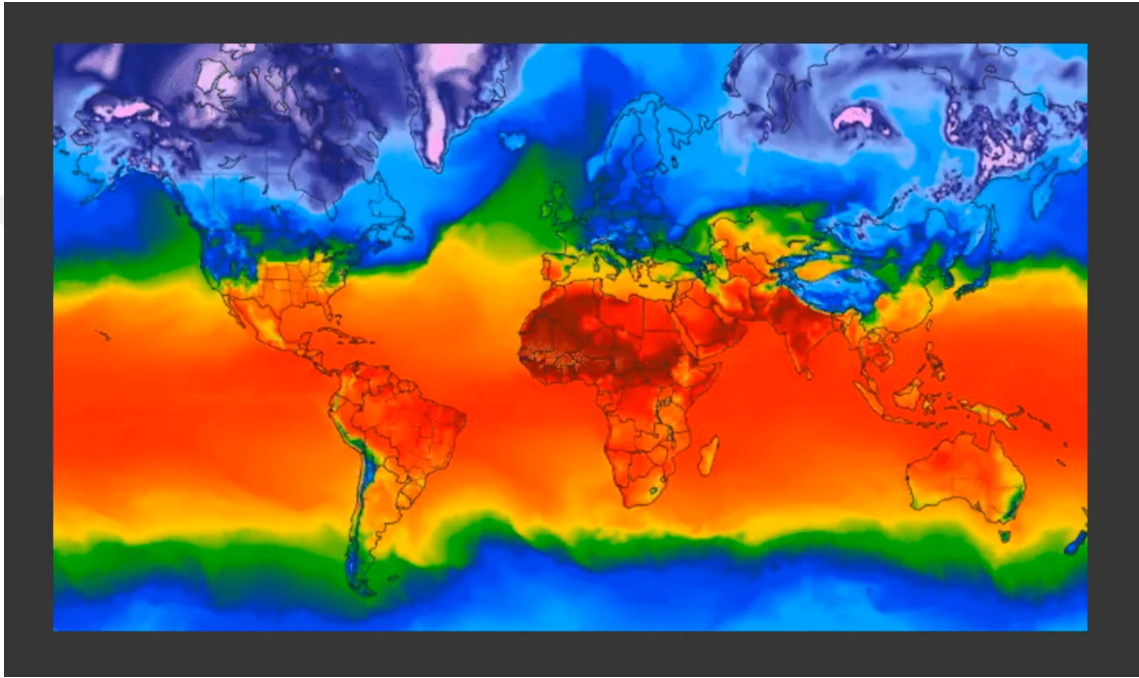


Görsel 1.5: Geleneksel Yöntem ile Implicit Yöntem Farkı



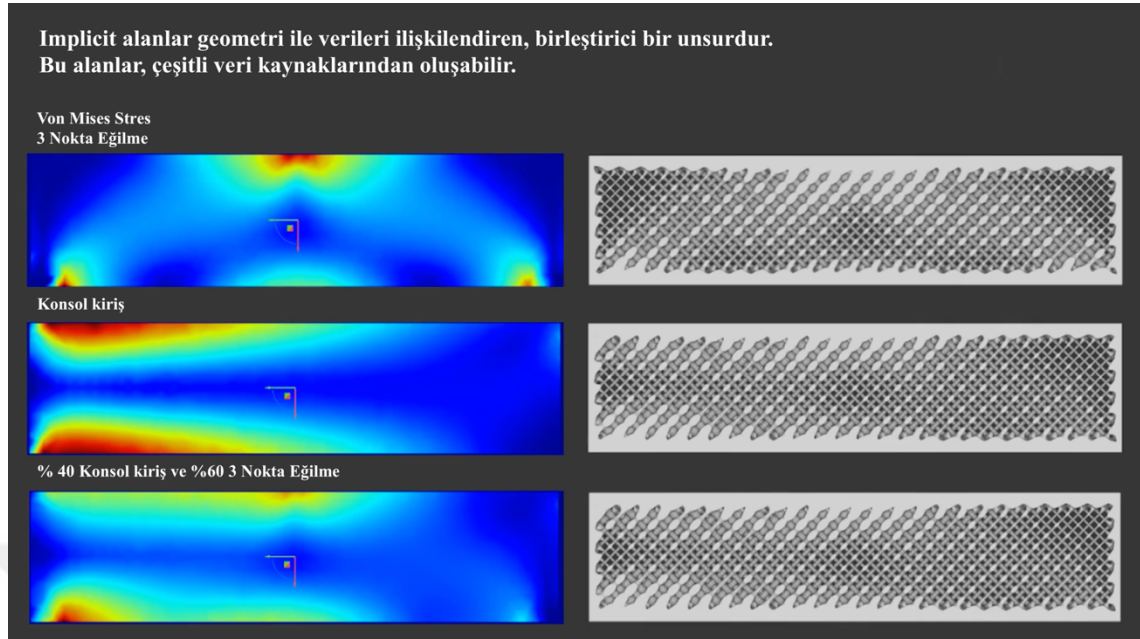
nTopology, kompleks geometri modellerken de “Implicit Field” teknolojisini kullanan bir yaklaşım benimsemiştir. Bu teknolojinin güçlü yanlarını anlamak ve kullanabilmek için implicit alanların iyi anlaşılması gerekir. Bunun için aşağıdaki görsel 1.6 gibi hava durumu bilgisini gösteren harita örneği verilebilir. Harita üzerindeki her noktanın kendine özgü nem, sıcaklık ve hız değerleri vardır. Bu veriler haritanın tüm alanında kesintisizdir ve süreklilik gösterir.

Görsel 1.6: Implicit Alan Kavramı için Harita Örneği



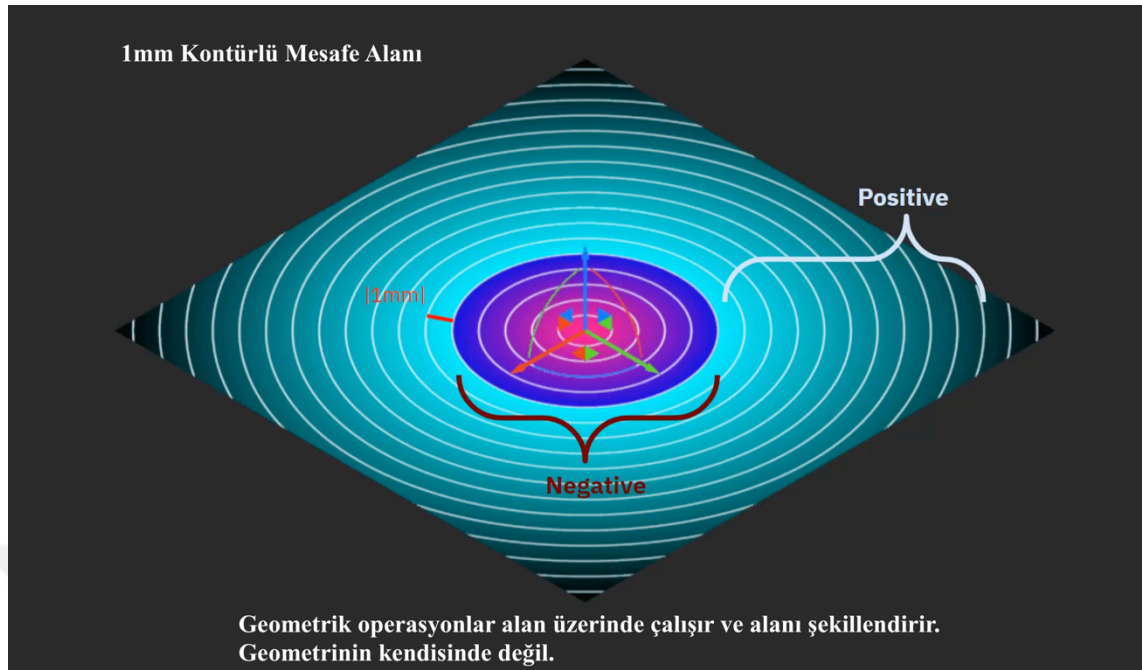
Implicit alanlar da benzer şekilde gerilme, mesafe gibi farklı veri tiplerini birlikte bulundurabilir ve veri değerleri alan içerisinde temsil edilebilir. Bu veriler, görsel 1.7’deki gibi implicit geometriyi optimal performansa modellemek için tek başına veya kombine edilerek kullanılabilir.

Görsel 1.7: Alan Örneği için Çeşitli Veri Kaynakları



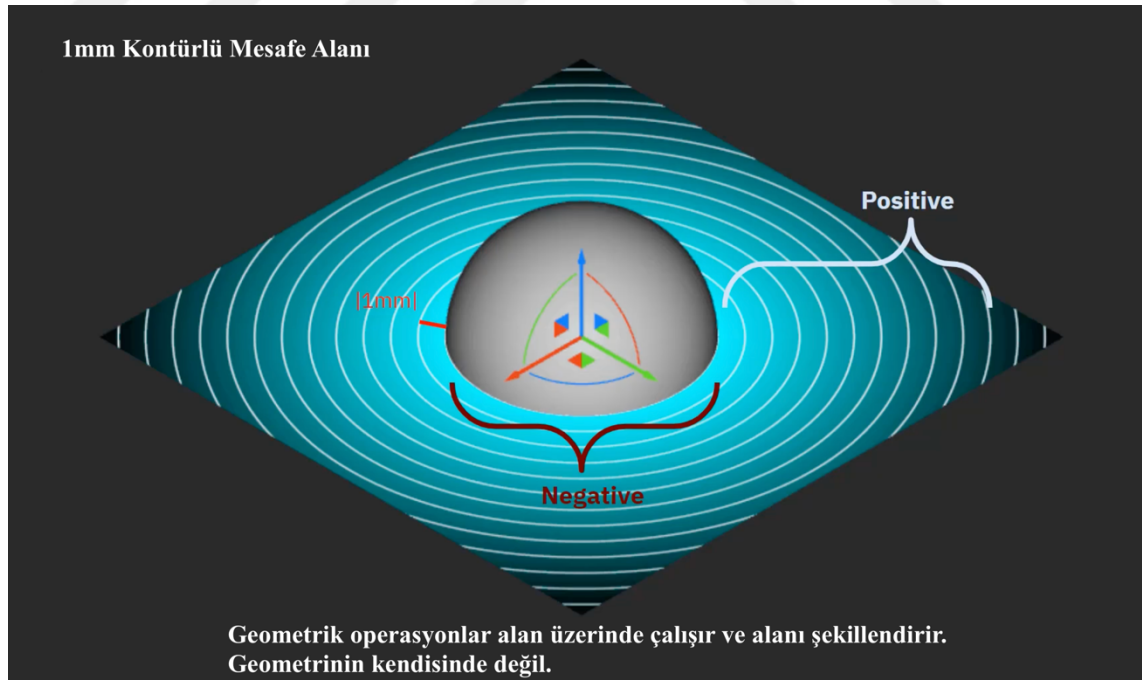
nTopology’ de geometriyi oluşturan unsur olan implicit alanın temelinde, “Distance Field” kaynağı vardır. “Distance Field” yani mesafe alanı, sınırsız 3 boyutlu uzaydadır ve her yöndeki her bir nokta, implicit geometri sınırına olan uzaklığının tanımlı olduğu birer unsurdur. Özünde bu nokta değerleri, geometriyi tanımlayan matematiksel eşitlik fonksiyonunun birer çıktısıdır. Bu değerlerin negatif olanları “Implicit Body” katısının iç yapısını temsil ederken, pozitif olanları katının dışındaki alanı temsil eder. Değerin sıfır olduğu yerler Implicit Body katısının sınırlarıdır.

Görsel 1.8: Implicit Alanda Pozitif ve Negatif Bölgeler



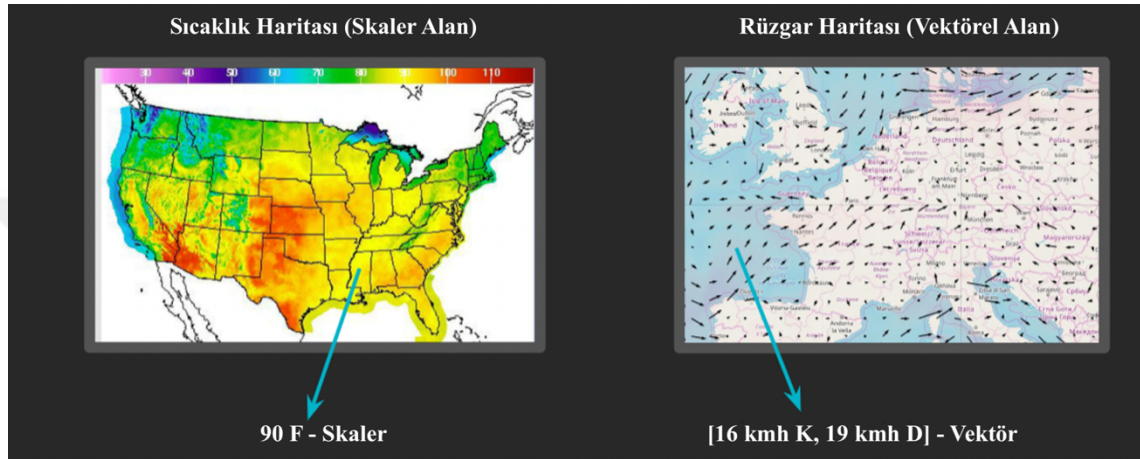
Implicit Field' ın pozitif alanları hariç tutularak ve Scalar Field olarak render edildiğinde, Implicit Body katısı elde edilir.

Görsel 1.9: Negatif Alanın Render Edilerek Görselleştirilmesi



Alan, 3 boyutlu uzaydaki her nokta için bir değer ilişkilendirdiği için, matematiksel bir fonksiyon F tarafından tanımlanan bir skaler alan, her $P=(x,y,z)$ noktasında nümerik bir $F(x,y,z)$ değeri döndürür. Ancak bu değerler her zaman skaler değildir. Örneğin vektör alanı oluşturan vektörler olabilir. Hava raporu örneğindeki sıcaklık ve nem skaler alan kabul edilebilirken, rüzgar hızı bir vektör alanı olarak kabul edilebilir.

Görsel 1.10: Alanda Skaler ve Vektörel Farklar



1.2 OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

1.2.1 Kafes Yapılar

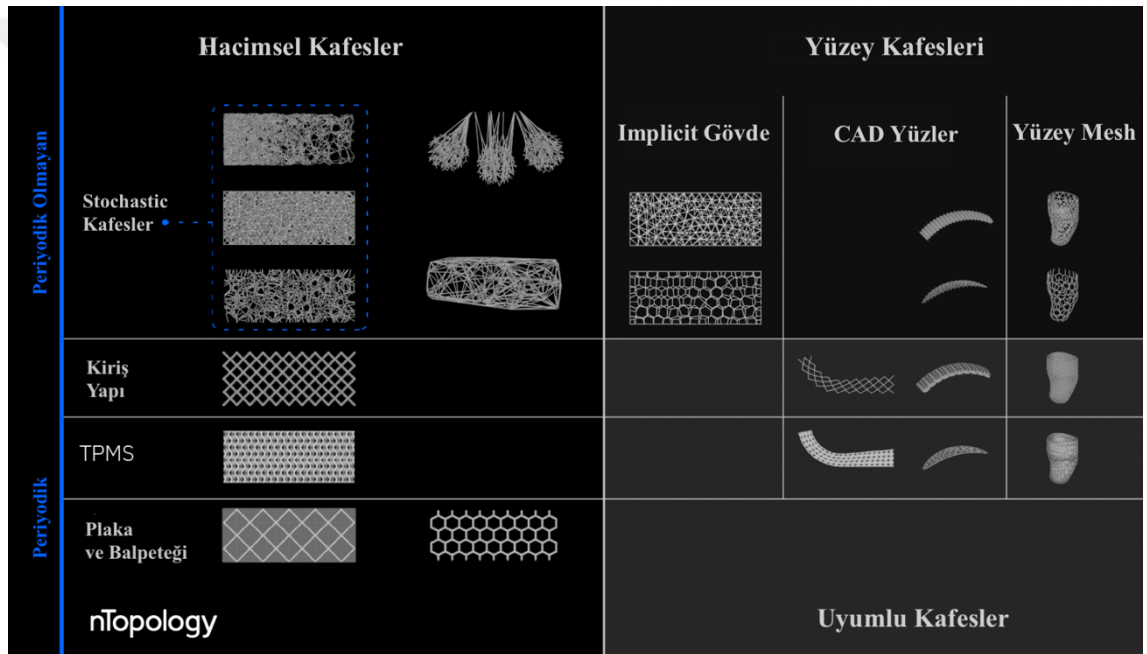
Kafes yapılar, bir hacmi dolduran veya bir yüzeye uyum sağlayan ve tekrar eden desenlere sahip olan veya doğadaki bazı örneklerden ilham alan, birim hücrelere sahip yapılardır. Arı kovanlarının petekleri veya kemiklerin iç yapıları doğada bulunan biyolojik kafeslere örnektir. Mühendislikteki kullanımına ise uçak kanatlarındaki sandviç paneller örnek verilebilir.

Kafes yapıların mühendislik tasarımlarında kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Sahip oldukları desenler, periyodik veya stokastik bir model izleyerek birbirine uyan kirişlerden, üçlü periyodik minimal yüzeylerden (TPMS) veya plakalardan oluşurlar. Hacim veya yüzeyde oluşturulabildiği gibi bir mesh, CAD gövde veya implicit gövdeye ait bir tasarım alanı içine kırılarak da oluşturulabilir. Ancak bu yapıları yüksek performanslı ürün geliştirmek üzere kullanmak ve kafes yapıların yaygınlaşan kullanımından yararlanmak için araştırmalar devam etmektedir.

Birim hücreler ise kafesin yapısındaki yinelenen en temel yapılardır. Kafeslerin tipleri, birim hücrelerin tipleri ile tanımlanabilmektedir. Kafes yapılar oluşturulurken, 3 boyutlu uzayda hücre haritası kullanılır ve birim hücreler bu harita üzerinde düzenlenir. Hücre haritaları dikdörtgen, silindirik, küresel veya iki yüz arasında uyum sağlamak üzere eğri olabilir.

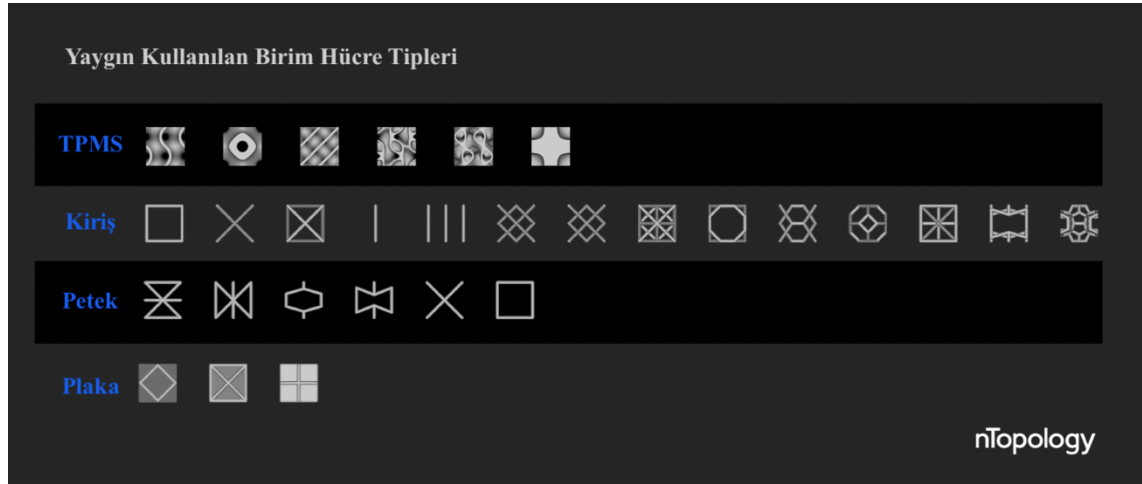
Kafeslerin mekanik, termal veya akustik özellikleri, birer parametre olarak birim hücre boyutlarına, birim hücre tiplerine, hücre haritalarına, kiriş veya yüzeylerin kalınlığına bağlı olarak değişebilir. Aşağıdaki görsel 1.11’ de kafes yapılara ait bazı örnekleri sunmaktadır.

Görsel 1.11: Kafes Yapılar



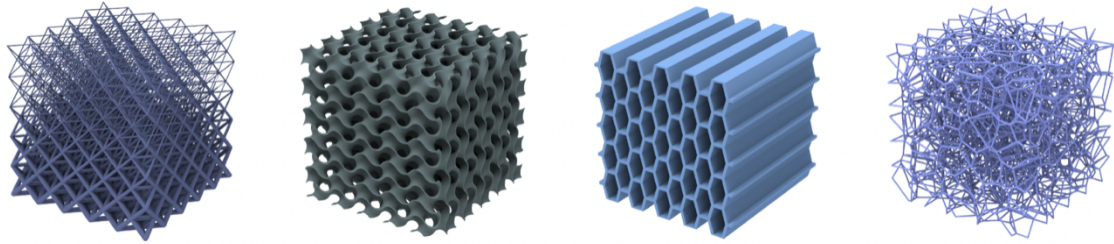
Birim hücrenin tipine göre kiriş kafesleri, ağırlığına göre kıyaslarsak yüksek bir mukavemet sunabilir veya elastik ve esnek bir yapıda olabilir. Bunun yanısıra üçlü periyodik minimal yüzeylerden (TPMS) oluşan kafesler (Örneğin Gyroid Kafes) her yönüyle iyi mekanik özellikler sunarken, plaka ve petek şeklindeki kafesler ise spesifik bir yönde yüksek bir mukavemet sunarlar. Aşağıdaki görsel 1.12’ de yaygın kullanılan bazı birim hücreler gösterilmiştir.

Görsel 1.12: Yaygın Kullanılan Birim Hücre Tipleri



Aşağıdaki görsel 1.13’ te ise 3 boyutlu birer örnek olarak ve sırasıyla field-driven tekniği ile kalınlıkların gradyan değiştiği kiriş kafes, Gyroid TPMS kafes, balpeteği kafes ve bir hacim içindeki rastgele noktaları merkez olarak türetilen stokastik yapıdaki voronoi kafes gösterilmiştir.

Görsel 1.13: Örnek 3 Boyutlu Kafes Yapılar

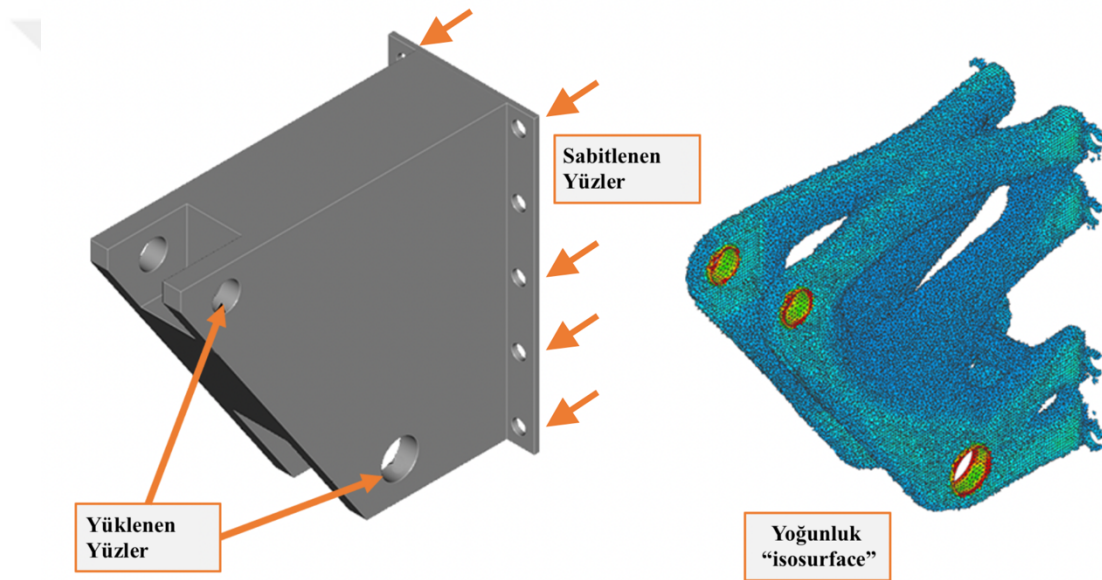


1.2.2 Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu tekniği uzun süredir bilinmesine rağmen, günümüzde hesaplama teknolojisindeki ilerlemeler ve eklemeli imalattaki gelişmeler sayesinde kullanımı oldukça yaygınlaşmakta ve tüm süreç daha pratik bir hale gelmektedir. Topoloji optimizasyonu belirli kısıtlamalara tabidir ve algoritması bu çerçeve içinde sonuç verir. Kısıtları gözeterek, bir yapıya ait başlangıç tasarım alanında, optimal malzeme dağılımını öngörmemizi sağlar. Örneğin, eklemeli imalat için bir tasarım yapılmak istendiğinde gerilme, maksimum yerdeğiştirme ve sarkma (overhang) açısının sınırlandırıldığı bir çerçevede ve tüm bu kısıtları tek bir geometri altında aynı anda karşılayacak şekilde, bir yapının ağırlığını en aza indirebilir.

Bu teknikte kullanılan algoritmalarla bir örnek olarak “Solid Isotropic Material with Penalization” yani (SIMP) metodu verilebilir. Bu metod yoğunluk tabanlıdır ve temelinde 0 (malzeme yok) ile 1 (katı malzeme) arasında değişebilen yoğunluklar, başlangıç tasarım alanı içerisinde tespit edilir ve seçilen bir yoğunluk eşik değerindeki elemanlardan oluşturulan bir “isosurface” ile optimal geometri oluşturulur. nTopology yazılımının bir avantajı olarak bu geometri, uzamsal olarak değişen bir skaler değerler kümesinden oluşan bir yoğunluk implicit alanını temsil ettiği için, bu çıktı kullanılarak kafes yapıların kalınlıkları data-driven tekniği ile manipüle edilebilir. Aşağıdaki görsel 1.14’ te topoloji optimizasyonu sonucu oluşturulan bir “isosurface” bulunmaktadır.

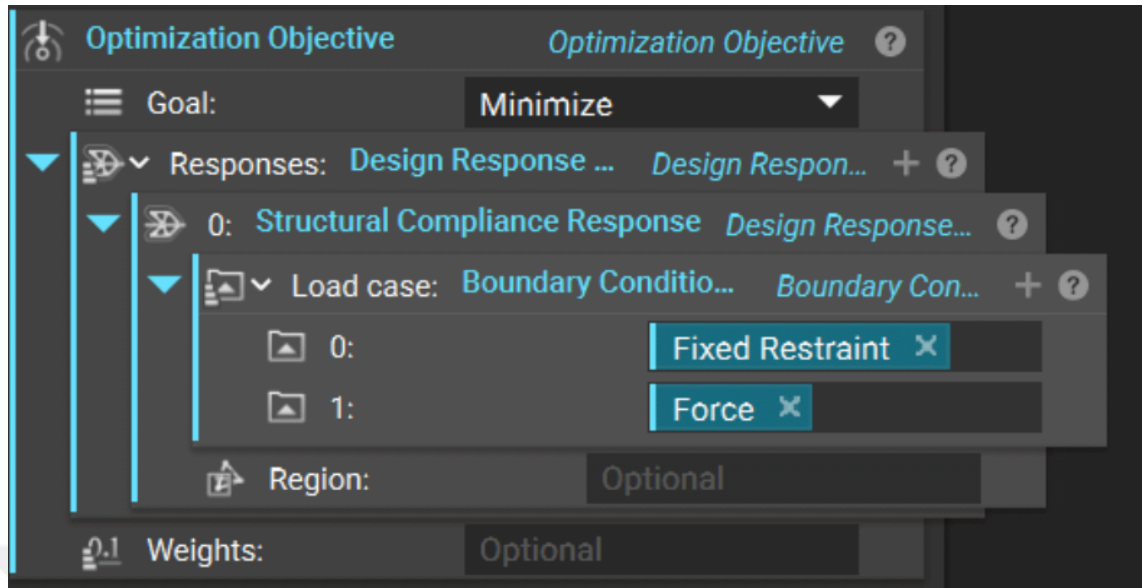
Görsel 1.14: Yoğunluk Eşik Değerinden Oluşturulan IsoSurface



nTopology’ de bir topoloji optimizasyonu kurmak için ulaşılmaması istenen bir hedef ve çözüm için bir kısıt belirtilmelidir. Örneğin, “The Structural Compliance Response” bloğu parça sertliği üzerinde kontrol sağlanmasına olanak tanır ve “compliance” katılığın tersi olduğu için, bu optimizasyon hedefi koyulduğunda “compliance” minimize etmek üzere algoritma çalıştırılır ve modelin sağlamlığı en üst düzeye çıkarılır.

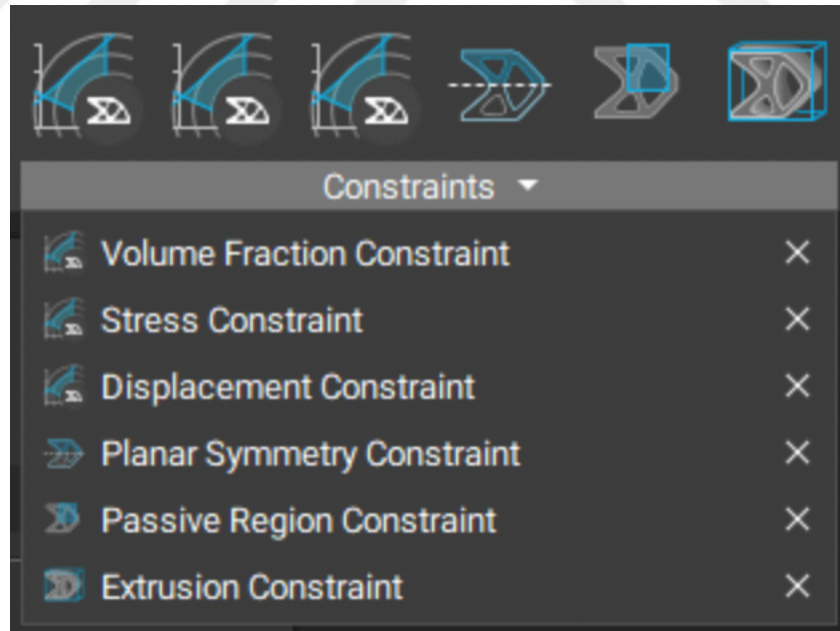
Aşağıdaki görsel 1.15’ te optimizasyon hedefi parametresi için örnek bir kurulum gösterilmiştir.

Görsel 1.15: Örnek bir Optimizasyon Hedefi



Ayrıca aşağıdaki görsel 1.16 gerilme, yer değiştirme, hacim ve pasif bölgelerin korunması gibi algorithmda değerlendirilebilen tasarım kısıtlarının bir listesi gösterilmiştir.

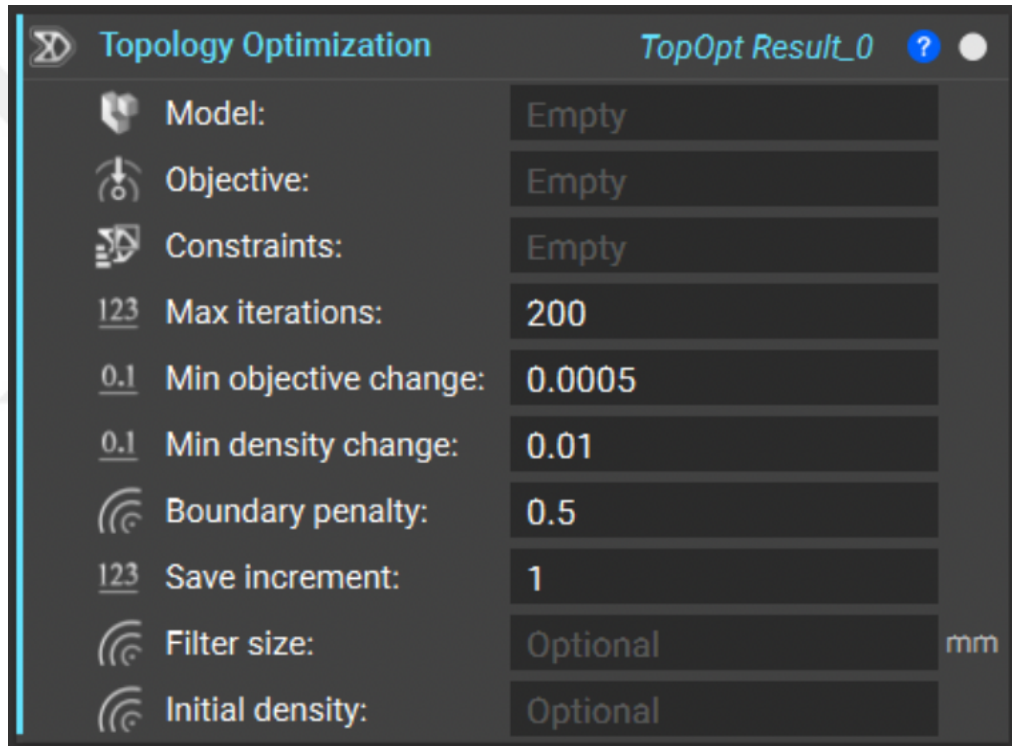
Görsel 1.16: Tasarım Kısıtlarının Listesi



Topoloji optimizasyonu algoritmasının çalışması için opsiyonel olmayan ve zorunlu girilmesi gereken başka parametreler de vardır. Maksimum iterasyon sayısı, amaca ulaşana kadar ve kısıtlamalar karşılanana kadar topolojinin güncellendiği yinelemeli sürecin toplam sayısını etkiler. Yakınsama, ilgili parametrede girilen değerden düşük sayıda gerçekleştiğinde maksimum değere ulaşmadan iterasyonlar durdurulur.

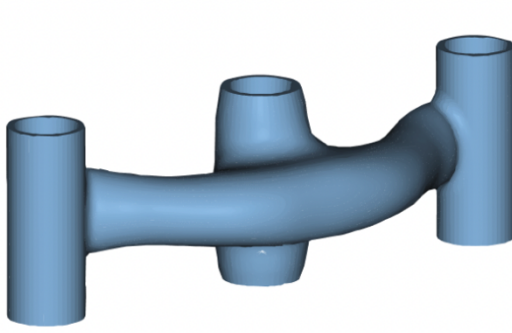
Minimum hedef ve yoğunluk değişimi parametrelerine girilen değerler de birer yakınsama eşiğidir ve her yinelemenin bir diğerine göreli değişimi için olup, iki parametre de aynı anda sağlandığında yakınsama gerçekleşmiş olur. Ayrıca “Save increment” parametresi optimizasyon tamamlandıktan sonra kayıt edilen her iterasyonun sayısını kontrol eder ve kayıt edilen tüm iterasyonlardaki verilere erişimi sağlar. Varsayılan değer olarak 1 değerinin girilmesi her iterasyonu kayıt ederken, 0 değeri ile sadece ilk ve son iterasyonlar kayıt edilir. 1’ den büyük herhangi bir “n” tam sayısı için her n. iterasyon ve mutlaka sonuncu iterasyon kayıt edilir. Aşağıdaki görsel 1.17’ de ilgili parametreler gösterilmiştir.

Görsel 1.17: Topoloji Optimizasyonu Bloğu

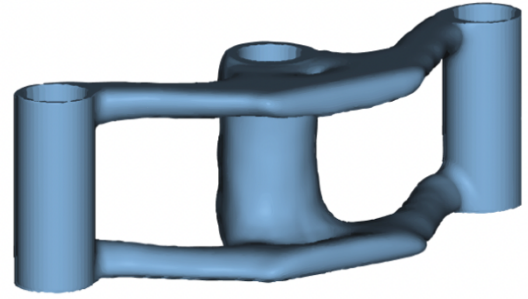


“Boundary Penalty” parametresi ile tasarım alanının kenarlarında yoğunluk değerlerinin nasıl ayarlanacağı kontrol edilir. Parametre cezalı olarak, yani 1 değeri ile girildiğinde kenarlarda malzeme olmayacağı ve yoğunluğun 0 olacağı anlamına gelir. Böylece malzeme hiçbir yük veya sabit yüzün olmadığı sınırlarda, tamamen kısıtlanmış ve kaldırılmış olacaktır. Aşağıdaki görsel 1.18’ de iki farklı değerde girilen parametrenin etkisi gösterilmiştir.

Görsel 1.18: Sınır Cezası Parametresine göre Farklı Oluşan Geometriler



Boundary Penalty: 1



Boundary Penalty: 0





İKİNCİ BÖLÜM
MATERYAL VE METOD

2.1 TASARIM VE ANALİZ SÜRECİ

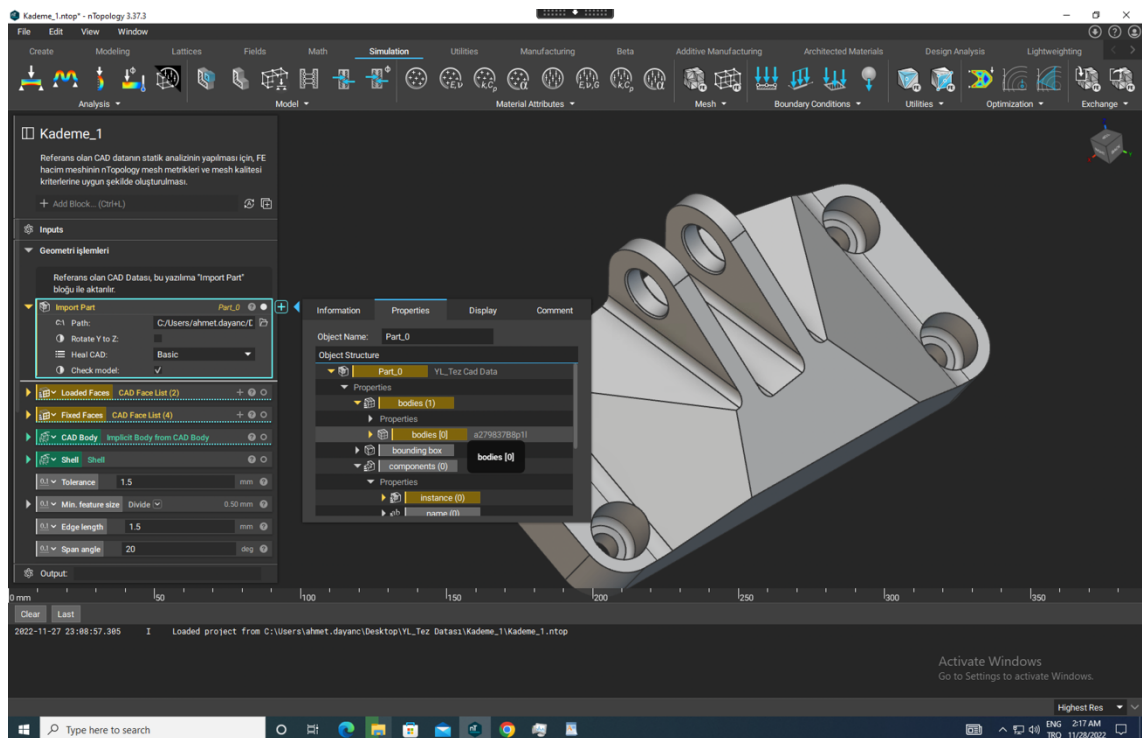
2.1.1 Çalışma 1: Referans Tasarım

Bu çalışmada GrabCAD internet sitesinden referans alınan CAD verisi, öncelikle programın içine aktarılmalıdır. Bunun için “Import Part” isimli blok kullanılmalıdır. İçerilebilen dosya türleri Parasolid (x_t, x_b), step, creo, solidworks, NX ve catia dosyalarıdır. Montaj dosyaları da, bloğun özellikler listesindeki komponentlerin tam görünümü ile birlikte, bloğun 2.0.0 versiyonunda aktarılabilir.

Aktarım sırasında modelin doğrulanması için, kendisiyle kesişen (self-intersecting) veya bozulmuş unsurlar (degenerate features) olup olmadığını kontrol etmek için “check model” bool tipi giriş parametresi aktif edilmelidir. Bu seçeneğin kapatılmasıyla model daha hızlı içe aktarılabilir olsa da, modelleme sorunlarına yol açabilecek kusurları algılamayacağı için genellikle açık tutulması önerilir. “Heal CAD” giriş parametresi ile içe aktarma sırasında otomatik iyileştirmenin düzeyleri ayarlanabilir fakat bu .x_t ve .x_b formatındaki parasolid dosyaları için geçerli değildir.

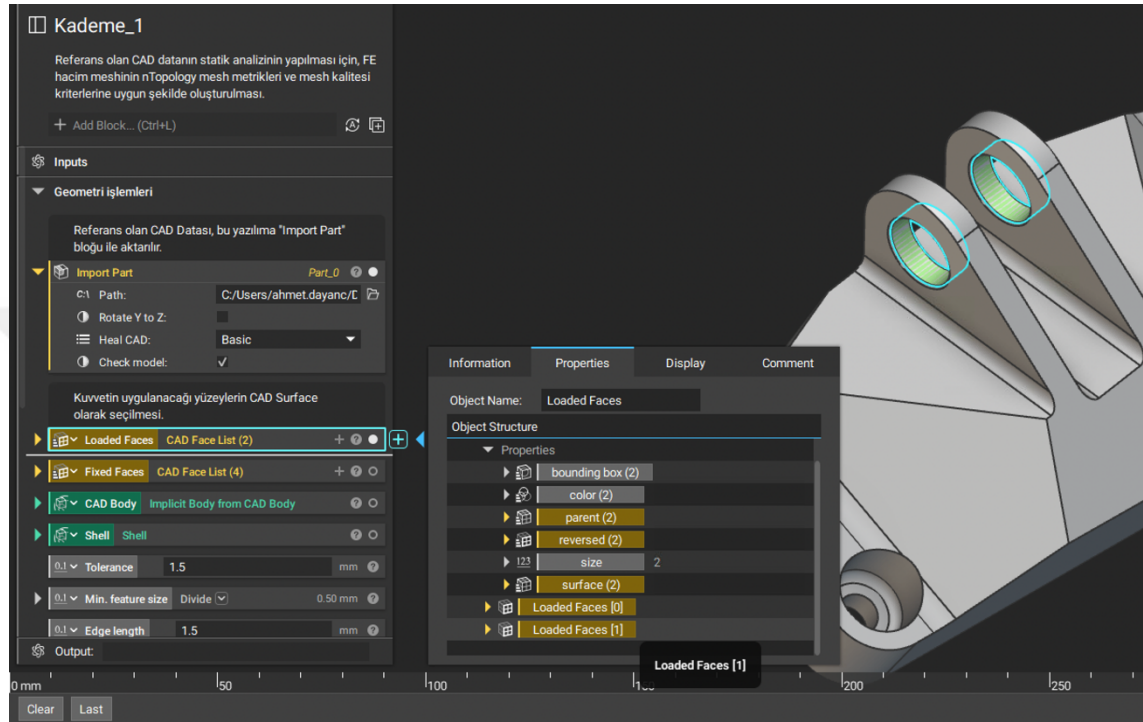
Ayrıca bloğun bilgi panelindeki ön belleğe alma seçeneği ile aktarılan CAD verisi .ntop içine gömülebilir ve bu .ntop dosyası CAD verisi ile paylaşılabilir olur, dosya dizinlerinden etkilenmez.

Görsel 2.1.1: "Import Part" Bloğunun Kullanımı



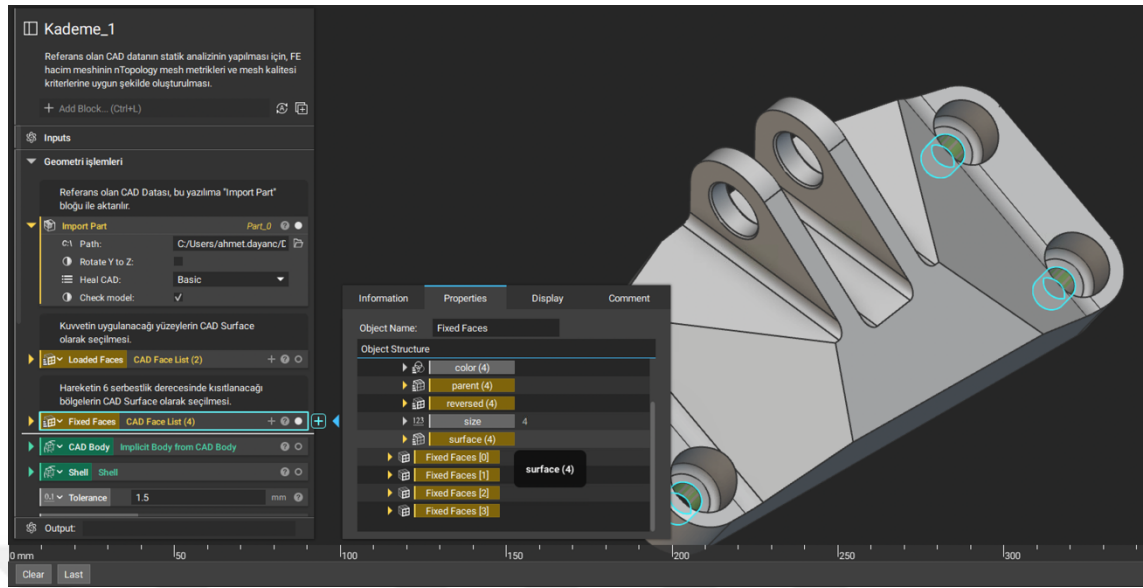
CAD verisi içe aktarıldıktan sonra, kuvvetin uygulanacağı yüzler “CAD surface” olarak görsel 2.2’ deki gibi seçilmiştir. Simülasyon için sınır koşulları belirlenirken, sonlu elemanlar hacim meshinde yük uygulanacak düğümlerin seçilebilmesine yardımcı olacak bu CAD yüzleri, “CAD Face List” bloğu ile sonradan kullanılmak üzere saklanır.

Görsel 2.1.2: Yükleme Yüzlerinin Seçilmesi



Ayrıca simülasyonun sınır koşullarında tanımlanmak üzere sabit yüzlerin seçilmesi gerekir. Bu yüzler hareketin 6 serbestlik derecesinde kısıtlanacağı bölgeler olup, “CAD Face List” bloğunda saklanmıştır.

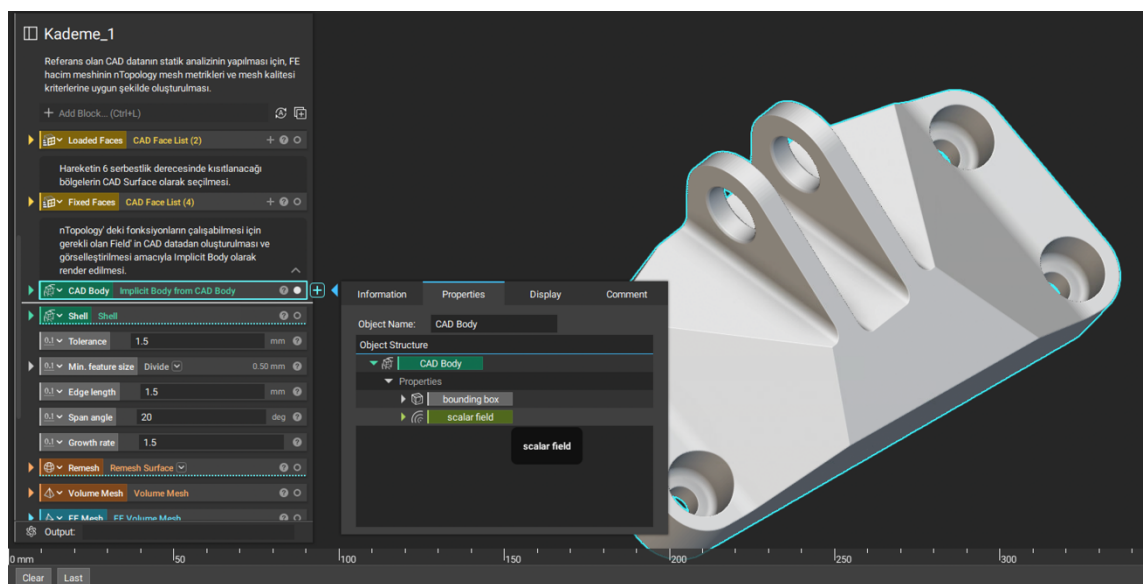
Görsel 2.1.3: Sabitlenen Yüzlerin Seçilmesi



nTopology’de kullanılan blokların birçoğunun fonksiyonları, Implicit alanlardan yararlanarak bir sonuç verdiği için, referans CAD verisinin Implicit gövdeye dönüştürülmesi gerekir. Bu işlem “Implicit Body from CAD Body” bloğu ile mümkün olmaktadır.

Tolerans parametresi, dönüşümden elde edilecek Implicit gövdenin, CAD gövdesinin yüzeyinden olan uzaklığını belirler. Bu dönüşüm ile elde edilen skaler alan render edilerek, nihai Implicit gövde ekranda görselleştirilir.

Görsel 2.1.4: CAD Verinin Implicit Gövdeye Dönüştürülmesi

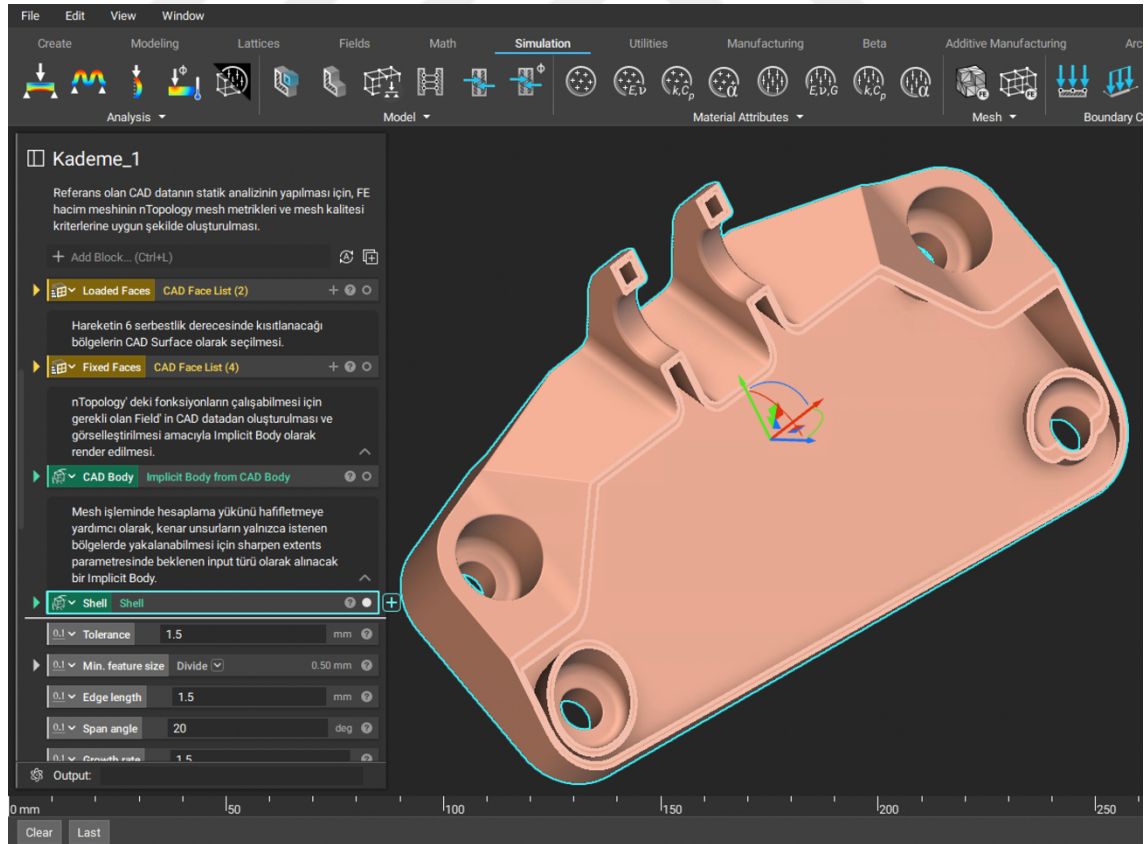


Çalışmanın ileri aşamalarında kompleks iç yapılar oluşturulduğunda, mesh işlemi sırasında iç yapıdaki keskin kenarlı unsurların da yakalanması sırasında oluşabilecek iş yükünü azaltmak için, yalnızca parçanın dış tarafındaki keskin hatları seçecek mesh iterasyonları yapılabilir. Bu işlem için CAD parçadan kabuk bir yapı oluşturulması ve bunun mesh işlemini yapan blokta bir giriş parametresinde (sharpen extents) kullanılması gerekmektedir.

Kabuk yapı oluşturmak için “Shell” bloğu kullanılır. Bu blok, giriş parametresi olarak aldığı Implicit gövdeden, kalınlaştırılmış dış duvara sahip içi boşaltılmış bir versiyonunu oluşturur. Bu blok, duvar kalınlığı (thickness) parametresinde skaler bir değer kabul eder. Bu sebeple kabuk kalınlığı parçanın her yerinde aynı olur. Değişken kalınlığa sahip kabuk yapı oluşturmak için farklı bir teknik kullanılması gerekmektedir.

“Direction” parametresi ise duvar kalınlığı üretebileceğimiz yönü seçebilme imkanı sunar. Parçanın içine doğru, dışına doğru veya parçanın sınırını merkez almak üzere her iki yöne doğru kalınlaştırma imkanı sunar.

Görsel 2.1.5: Mesh İşlemi için Keskin Unsurları Belirleyen Kabuk Geometri

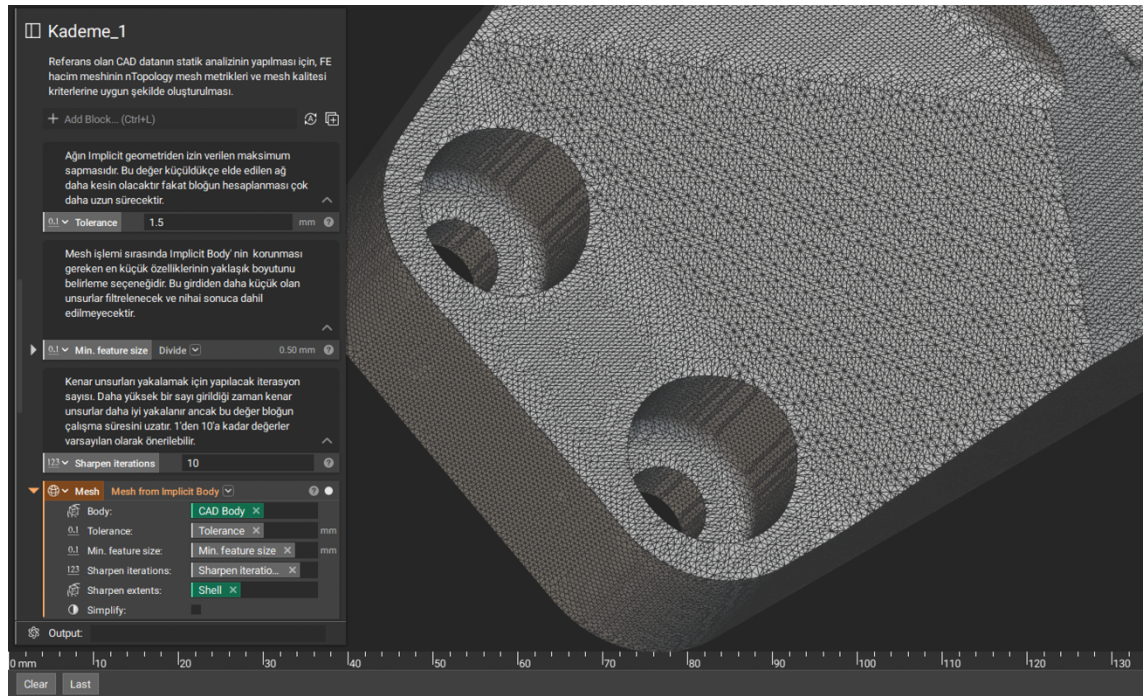


Mesh işlemine başlamak üzere “Mesh from Implicit Body” bloğu, iş akışına eklenir. Bu blok “Dual Contouring” mesh algoritmasını kullanmaktadır. v2.0.0 ve üst sürümü daha yüksek hesaplama yüküne sahip olmasına rağmen daha karmaşık geometrileri işleyebilir ve daha temiz mesh üretir. “Sharpen” parametresi (10 iterasyon) keskin unsurların korunmasını sağlarken “Sharpen extents” ile bunun kapsamı spesifik bir bölgede sınırlandırılarak işlem lokalize edilebilir. Çoğu durumda mesh kalitesinde kusur olmamaktadır ancak bazı durumlarda oldukça küçük dihedral açılara sahip üçgenler, keskin unsurlar üzerinde cepler oluşturabilir. Sharpen seçeneği bloğun çalışma süresini etkiler. “Simplify” parametresi ile nihai mesh’ in üçgen sayısı azaltılabilir ancak bu blokta öğeler %90 azaltıldığı için geometrik doğruluğun kaybolmasına sebep olabileceği için tercih edilmemiştir.

Tolerans parametresi, kendi giriş değerinin yarısını voxel boyutuna çevirir. Tolerans her yarıya düştüğünde üçgen sayısı 4 katına çıktığı için değer dikkatle seçilmelidir.

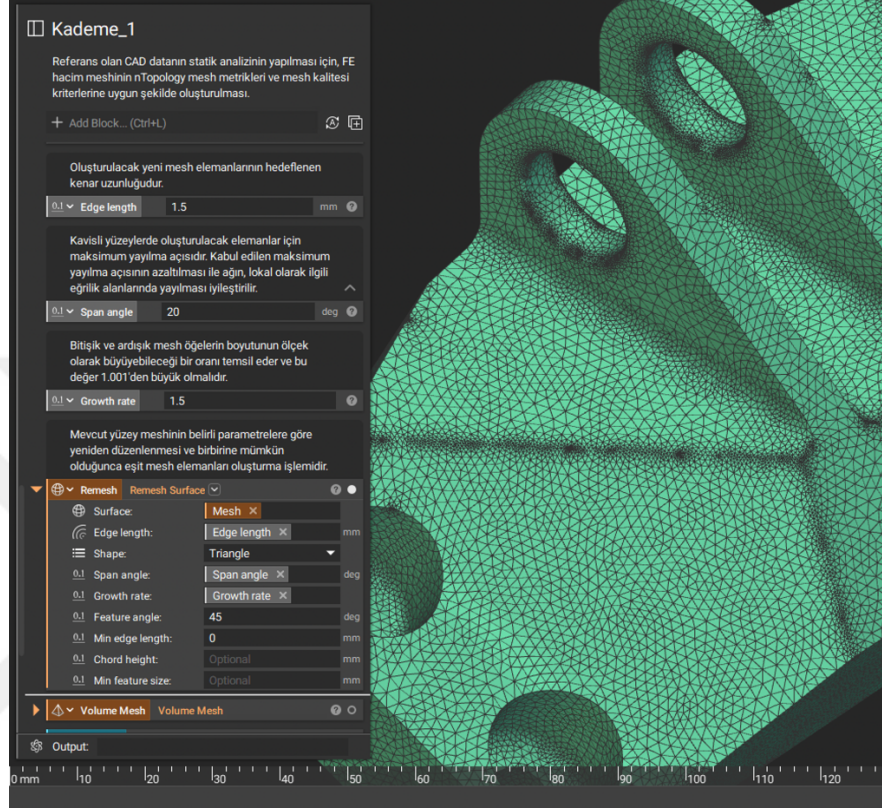
Bu bloktaki “Min. Feature Size” parametresi opsiyonel girdi olup, boş bırakılırsa üretilmeyecek kadar küçük mesh detaylarını yakalayıp silmektedir.

Görsel 2.1.6: Meshleme İşlemi



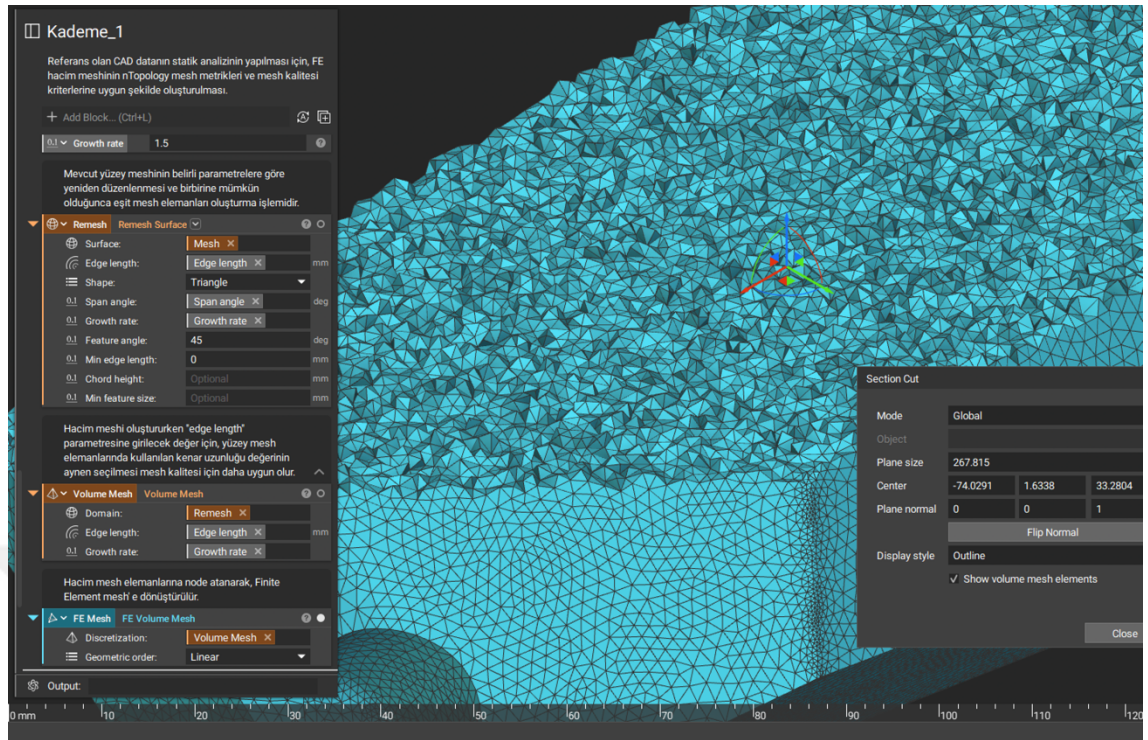
“Remesh” bloğu ile ilk oluşturulan meshin yapısal analize uygun ve birbirine mümkün olduğunca eşit elemanlardan oluşması sağlanır. Mesh öğelerini boyut, şekil ve yoğunluğa göre düzenleyerek, mevcut yüzey meshini optimize eder.

Görsel 2.1.7: Remesh İşlemi



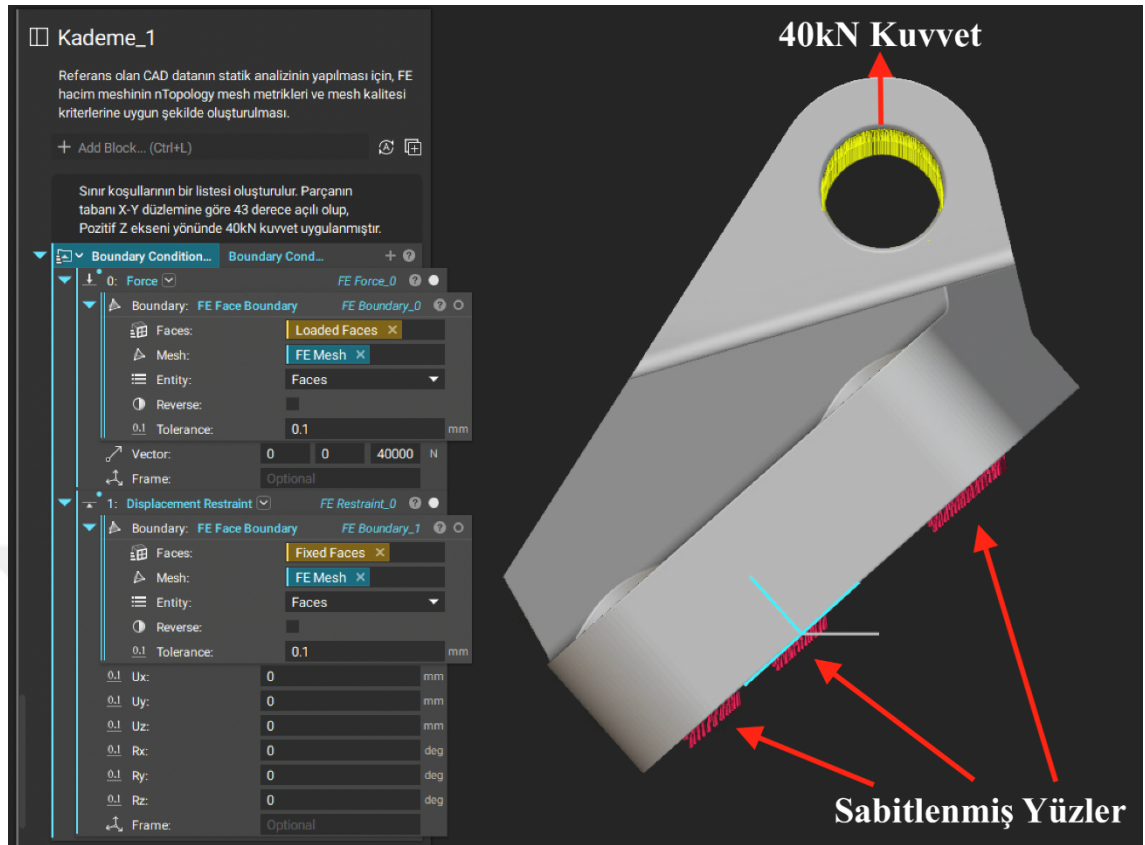
Hacim meshi oluştururken remesh işlemi yapılmış yüzey meshinde kullanılan parametrelerin aynısı kullanılırsa, hacim meshi elemanlarının kenar uzunlukları yüzey meshi elemanları ile aynı olur. Bu sayede hacim meshi daha düzgün ve hızlı oluşturulabilir. FE hacim meshi bloğu ile mesh elemanlarına node atanır. “Geometric order” parametresi “Linear” olduğunda ağın kesişim noktalarına node atanırken, “Quadratic” olduğunda ağ elemanlarının kenarlarına ait orta noktalarına node atanır. “Linear Geometric Order” daha hızlı çalışır.

Görsel 2.1.8: Hacim Meshi Oluşturma



Sınır koşulları tanımlanırken kuvvet pozitif Z ekseninde 40 kN girilmiş olup, parçanın tabanı X-Y düzlemi ile 43 derece açı yapacak şekilde konumlandırılmıştır. Sabitlenen yüzeyler ise 6 serbestlik derecesinde sınırlandırılmıştır. Analiz için seçilen ve farklı yönlerde test edildiğinde termal ile mekanik özellikleri her yönde aynı kalan izotropik bir malzeme olarak Al6061-T6, FE modelinde malzeme olarak kullanılmak üzere nTopology' nin malzeme kütüphanesinde ön tanımlıdır.

Görsel 2.1.9: Sınır Koşullarının Girilmesi



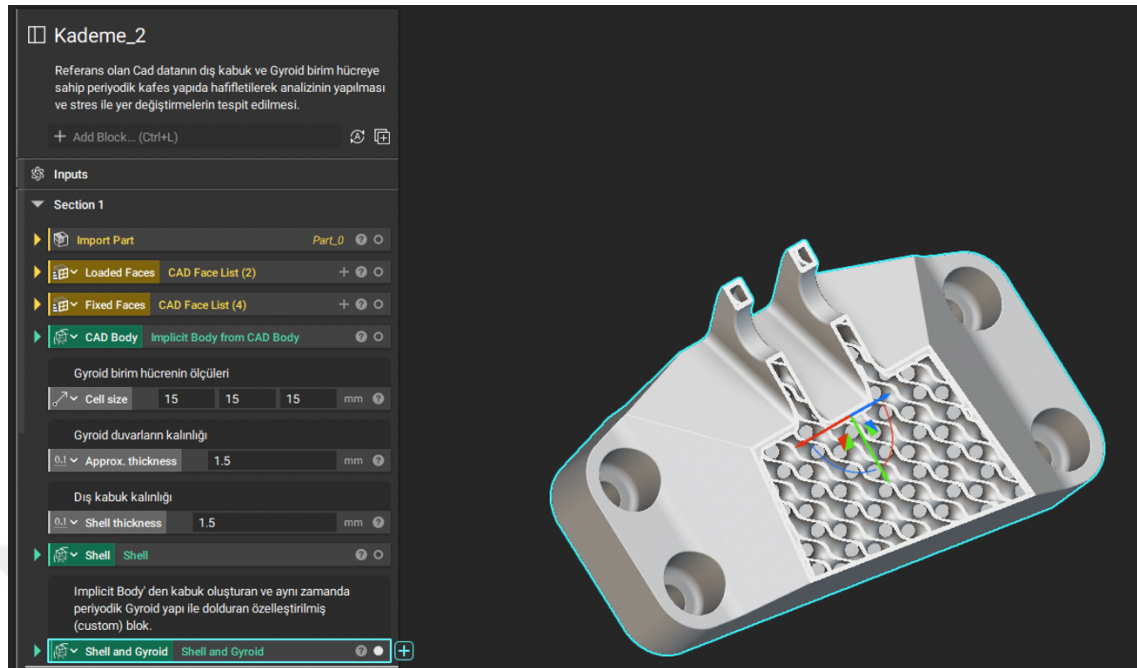
Analiz sonucunda elde edilen maksimum yer değiştirme ve gerilme değerleri sonuç bölümünde açıklanmıştır.

2.2 Çalışma 2: Kafes Yapıya Sahip Tasarım

Tasarım sürecinin 2. aşamasında periyodik kafes yapıda olan, sabit duvar kalınlığına sahip gyroid birim hücrelerden oluşan ve sabit kabuk kalınlığında sahip olan hafifletilmiş bir parça tasarlanmıştır. Birim hücreler 15 mm x 15 mm x 15 mm ölçülere sahip olup, parçanın kabuk kalınlığı 1.5 mm ve gyroid duvarların kalınlığı 1.5 mm seçilmiştir.

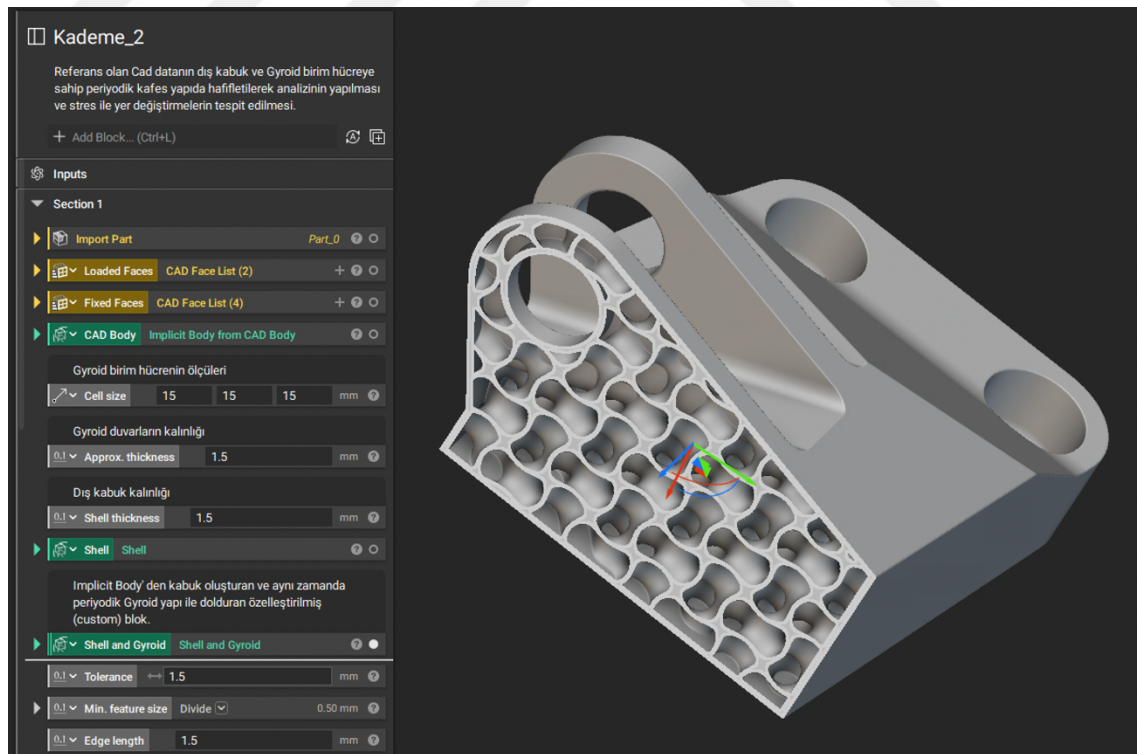
Parçanın X-Y düzlemindeki kesiti aşağıdaki görsel 2.10' da ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.

Görsel 2.1.10: Hafif Parçanın X-Y Düzlemindeki Kesiti



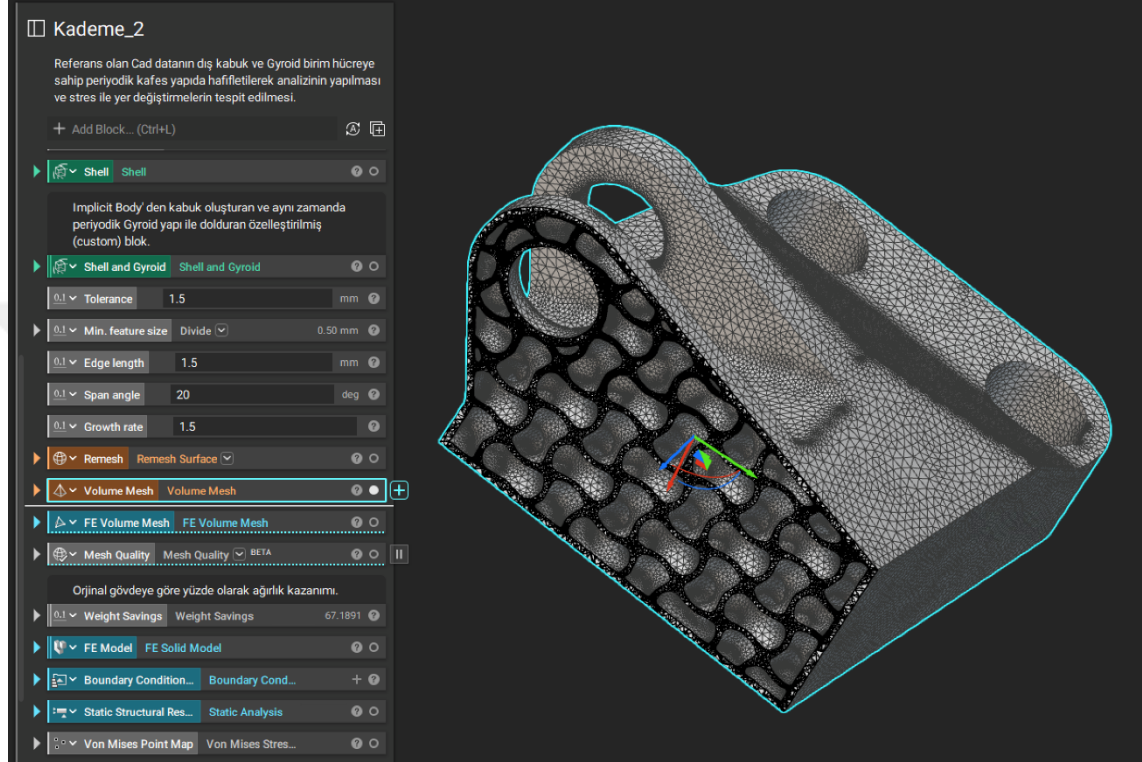
Parçanın ayrıca Y-Z düzlemindeki kesiti aşağıdaki görsel 2.11’ de ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.

Görsel 2.1.11: Hafif Parçanın Y-Z Düzlemindeki Kesiti



Parçaya analiz yapılabilmesi için, 1. tasarımda mesh işlemleri için kullanılan parametreler değiştirilmeden alınmış ve 2. aşamadaki parçaya da aynı şekilde uygulanmıştır. Mesh parametreleri, çalışmanın her aşamasında unsurları yakalayacak şekilde seçilmiştir.

Görsel 2.1.12: 2. Tasarımın Meshlenmesi



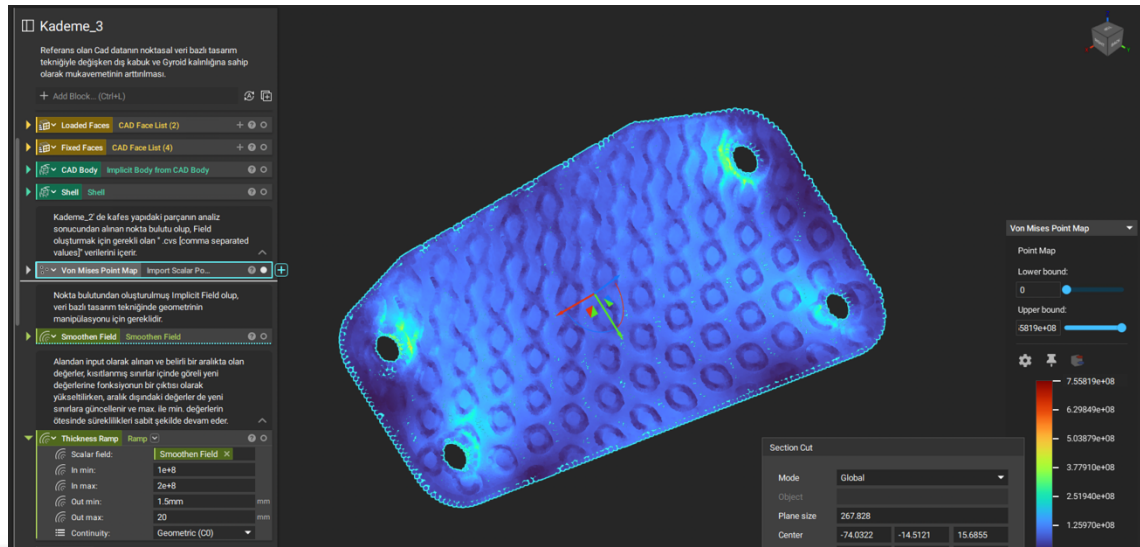
Analiz için sınır koşulları programa 1. tasarımda olduğu gibi tanımlanmıştır. Sonuç ve Öneriler kısmında 2. tasarıma ait analiz çıktıları ayrıntılı şekilde ele alınmıştır.

2.3 Çalışma 3: Geliştirilmiş Kafes Yapıya Sahip Tasarım

Çalışmaya ait 3. tasarımın tamamlanması için harici kaynaktan bir veriye ihtiyaç vardır. Bu verinin kaynağı, 2. tasarımın analiz sonuçlarının bir çıktısıdır. Yazılımda 2. tasarımın yapıldığı dosyadan export edilen [comma separated values] yani .csv dosyası, 3. tasarımı oluşturmaya yardımcı bir kaynak olmak üzere, yeni açılan 3. tasarım dosyasının içine aktarılır. Burada “Von Mises Point Map” bloğu yardımıyla skaler ve nodal nokta bulutu verileri görselleştirilebilir.

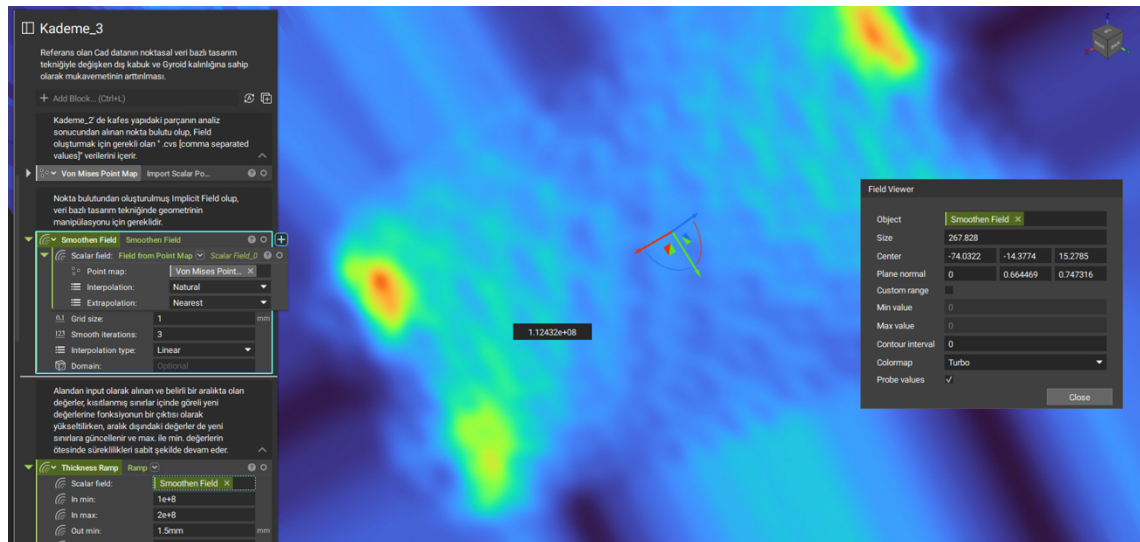
Bu blok girdi olarak analiz sonucunu aldığında, analizin seçilen bir iterasyonundaki değerleri de gösterme kabiliyetine sahiptir. “Step number” parametresi opsiyonel olup bu girdi boş bırakılırsa, varsayılan olarak analizin son iterasyonundaki değerleri çıktı olarak verir. Aşağıdaki görsel 2.13’ te nokta bulutunun bir kesiti verilmiştir.

Görsel 2.1.13: Skaler ve Nodal, Nokta Bulutu Verileri



Önceki tasarıma ait mevcut geometriyi temel alarak, analiz sonucundan da alınan nokta bulutu verilerini kullanarak tasarımı geliştirmek için, bu noktasal verilerin öncelikle implicit alana dönüştürülmesi gereklidir. Bu dönüşüm “Field from Point Map” bloğu ile sağlanabilir. Geçişleri yumuşatmak için temelinde “Gauss Bulanıklığı Fonksiyonu” çalıştıran “Smoothen Field” bloğu kullanılmıştır.

Görsel 2.1.14: Nokta Bulutundan Oluşturulan Implicit Alan



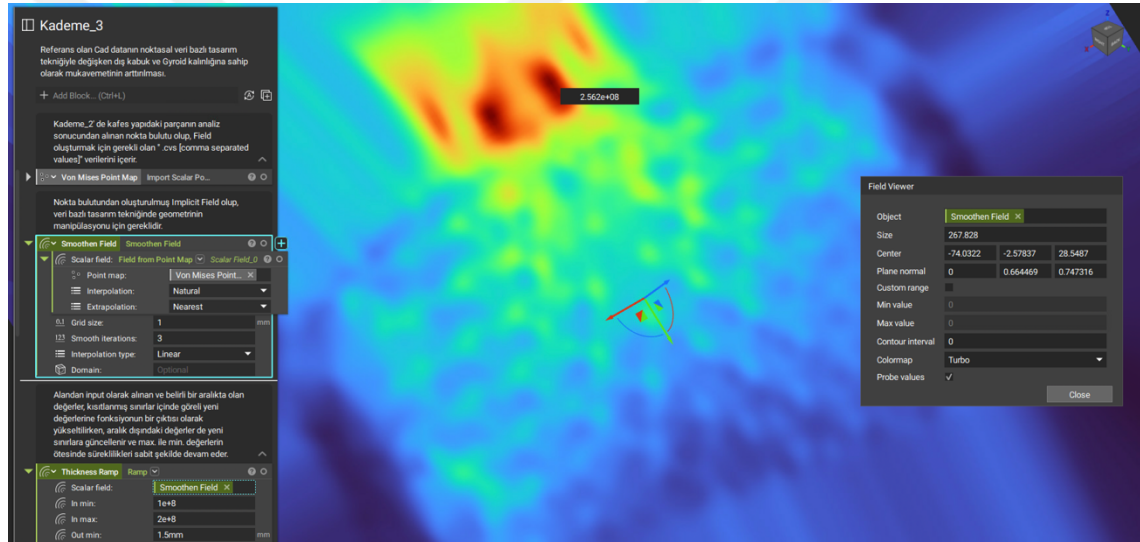
Implicit alan oluşturulduktan sonra geometrinin manipüle edilebilmesi için, implicit alanın Pa birimindeki skaler gerilme değerleri ile referans geometrinin “Distance Field”, yani mm birimindeki skaler mesafe değerleri, birbirlerinde karşılık görecektir şekilde, “Ramp” bloğunda eşleştirilmelidir.

“Ramp” bloğunun çıktısı, yeni bir implicit alandır. Bu alan, birim hücrenin duvar kalınlığını sabit ve skaler olarak girdiğimiz parametrede kullanılabilir ve buradaki sabit skaler girdi yerine bir skaler alan girdisi olması, değişken duvar kalınlığının oluşumuna imkan tanır.

Gerilme haritasında açık yeşil tona sahip bölgeler yaklaşık 100 MPa değer gösterirken, bu eşik ve altında birim hücre duvar kalınlığının 1.5 mm’ de korunacağı şekilde ilgili parametreler girilmiştir.

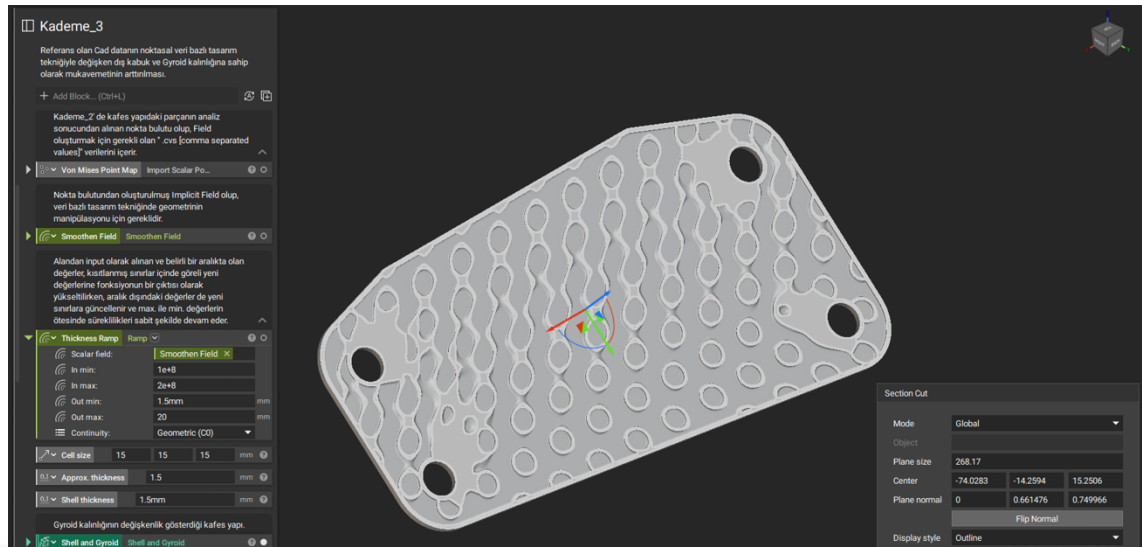
Ayrıca, gerilme haritasında açık kırmızı-turuncu tona sahip bölgeler yaklaşık 200 MPa değer gösterirken, bu eşik ve üzerinde birim hücre duvar kalınlığının 20 mm’ de olacak şekilde ilgili parametreler girilmiştir.

Görsel 2.1.15: Implicit Alanda Noktasal Prob Değerleri



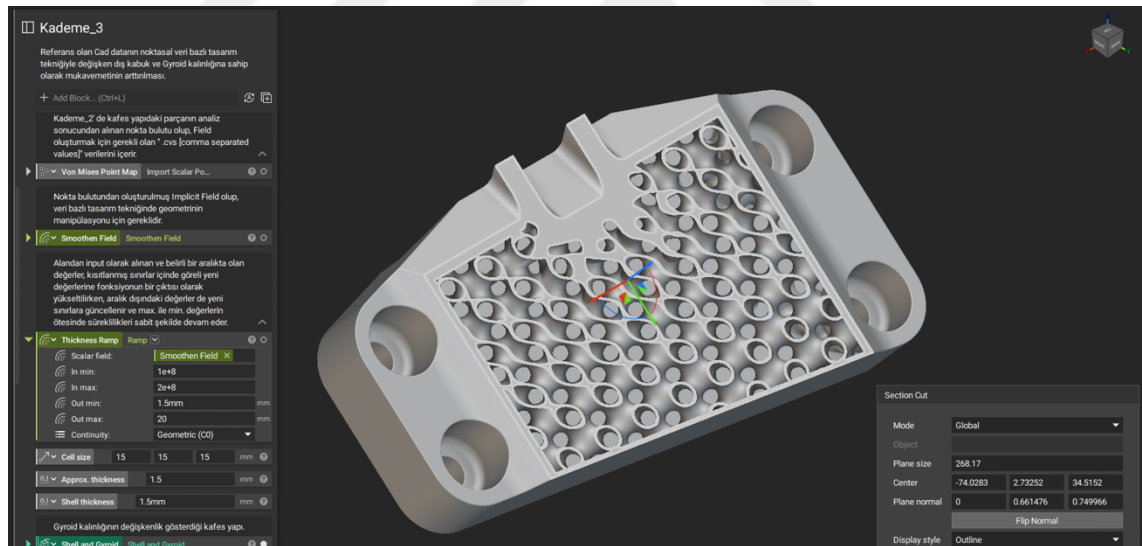
“Ramp” bloğunun, gyroid birim hücre duvar kalınlığının belirlendiği parametrede kullanılması doğal bir sonucu olarak, aşağıdaki görsel 2.16’ da referans geometrideki lokal değişimler, X-Y kesitinden gözlemlenmektedir.

Görsel 2.1.16: Gyroid Birim Hücrelerin Değişken Duvar Kalınlığı



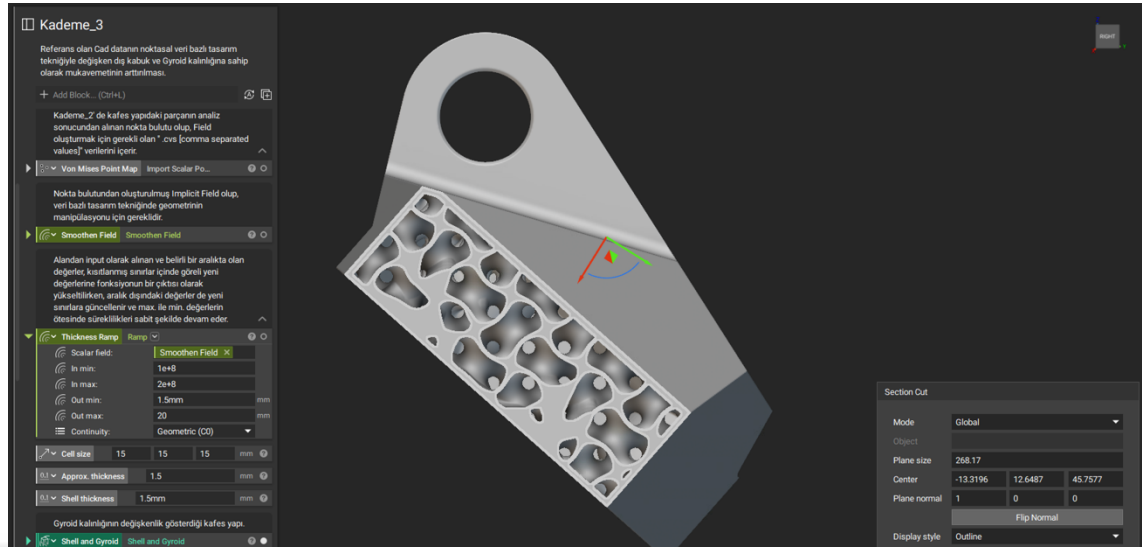
X-Y kesitinden gözlemlenen, geometrinin değiştiği bir diğer lokal bölge, aşağıdaki görsel 2.17’ de verilmiştir.

Görsel 2.1.17: Değişken Duvar Kalınlığına Sahip Diğer Bölge



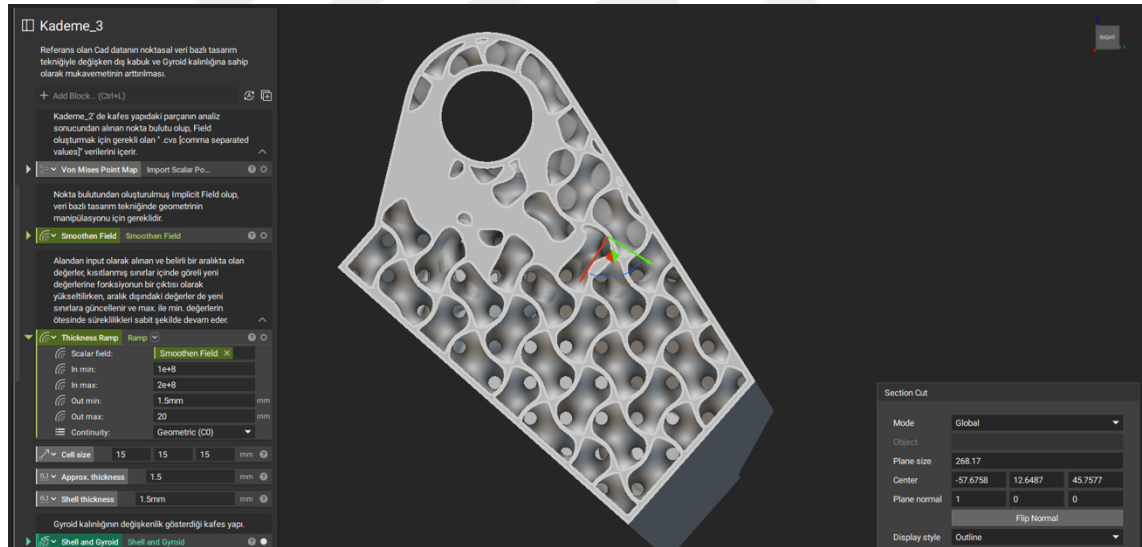
Geometrideki değişimin sabitlenmiş yüzlerin etrafında ve Y-Z kesitinden gözlemlendiği görsel, aşağıda görsel 2.18’ de verilmiştir.

Görsel 2.1.18: Y-Z Kesitinden Gözlemlenen Lokal Değişim



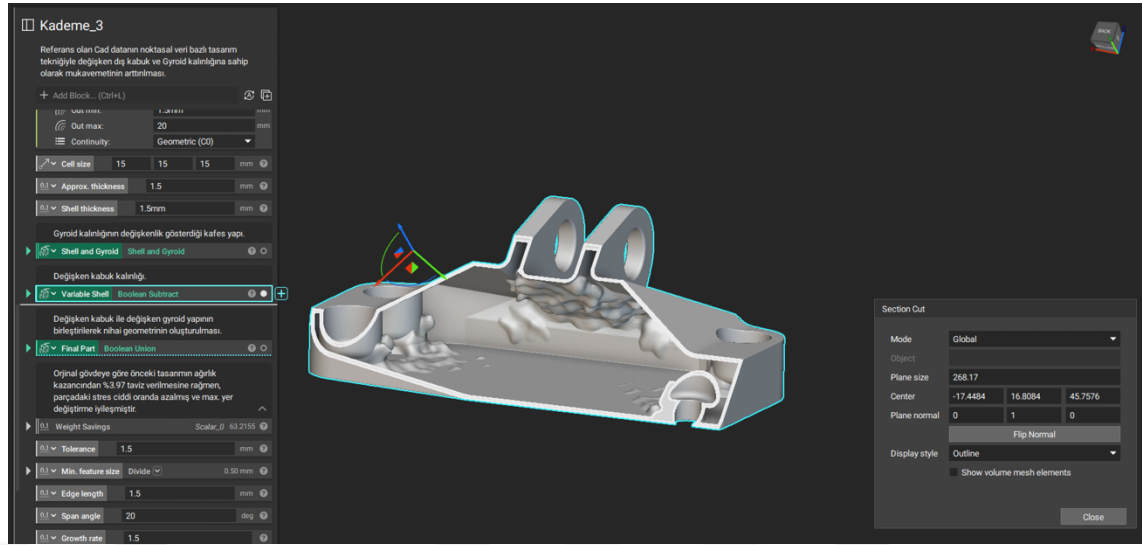
Y-Z kesitinden gözlemlenen, geometrinin değiştiği bir diğer lokal bölge, aşağıdaki görsel 2.19’ da verilmiştir.

Görsel 2.1.19: Y-Z Kesitinden Gözlemlenen Diğer Bir Lokal Değişim



Gyroid birim hücre duvar kalınlığının değişken olmasına ek olarak, dış kabuk geometrisinde de veri bazlı manipülasyon yapıldığında oluşan değişim, aşağıdaki görsel 2.20’ de verilmiştir.

Görsel 2.1.20: Değişken Dış Kabuk



Parçaya analiz yapılabilmesi için önceki mesh işlemleri için kullanılan parametreler değiştirilmeden alınmış ve 3. aşamadaki parçaya da aynı şekilde uygulanmıştır. Mesh parametreleri, çalışmanın her aşamasında unsurları yakalayacak şekilde seçilmiştir.

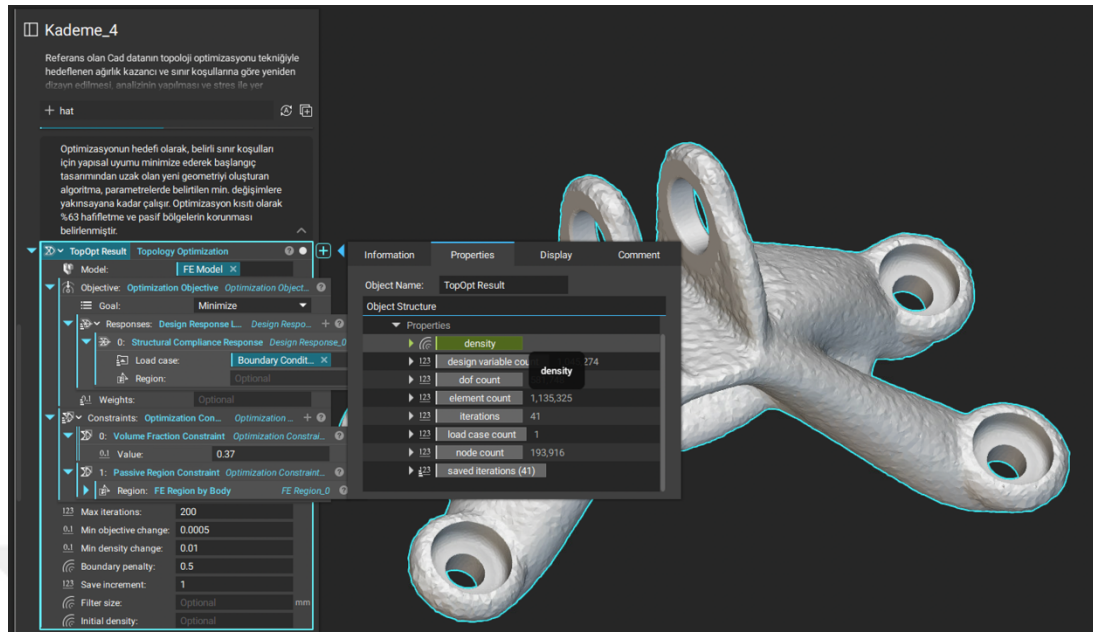
Analiz için sınır koşulları programa önceki tasarımlarda olduğu gibi tanımlanmıştır. Sonuç kısmında 3. tasarıma ait analiz çıktıları ayrıntılı şekilde ele alınmıştır.

2.4 Çalışma 4: Topoloji Optimizasyonu Yapılmış Tasarım

Çalışmaya ait 4. parçanın tasarımı için, topoloji optimizasyonu yönteminin kurulumuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntem, belirli hedefler ve kısıtlar koyulduğunda amacına uygun ve anlamlı geometriler ortaya çıkarabilir.

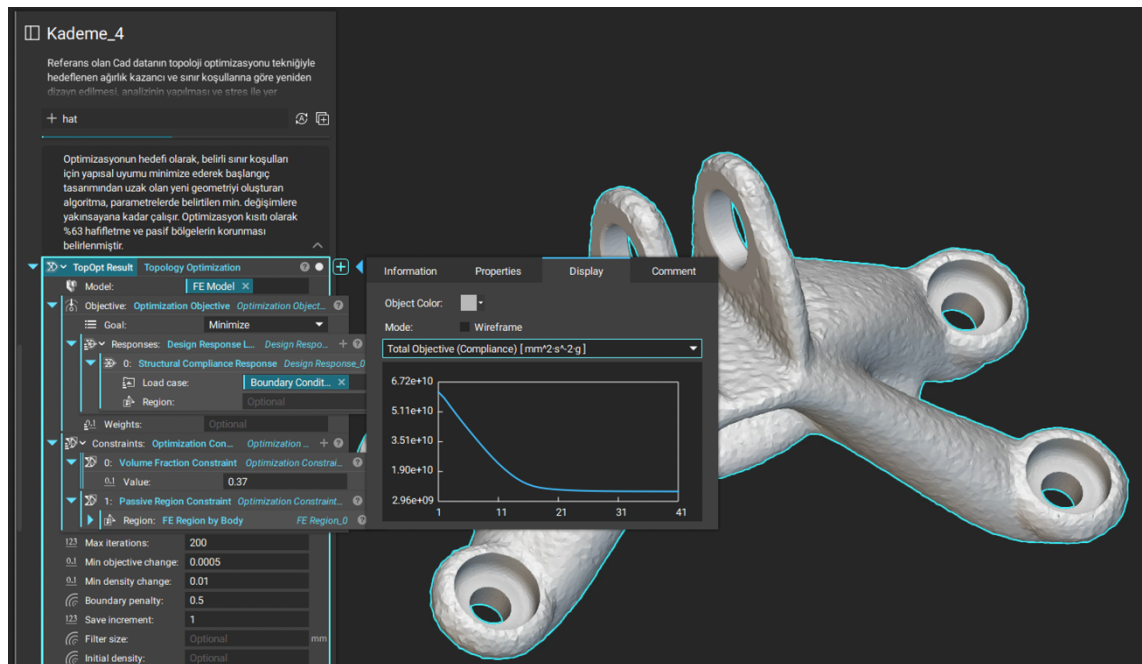
Optimizasyonun hedefi olarak, belirli sınır koşulları için yapısal uyumu minimize ederek başlangıç tasarımından uzak olan yeni geometriyi oluşturan algoritma, parametrelerde belirtilen minimum değişimlere yakınsayana kadar çalışır. Optimizasyon kısıtı olarak %63 hafifletme ve pasif bölgelerin korunması belirlenmiştir. Hafifletme için seçilen bu oran, 3. tasarım ile eşit ağırlığı yakalama amacıyla yapılmıştır. Topoloji optimizasyonu 41 iterasyonda tamamlanmıştır.

Görsel 2.1.21: Topology Optimizationu Sonucu



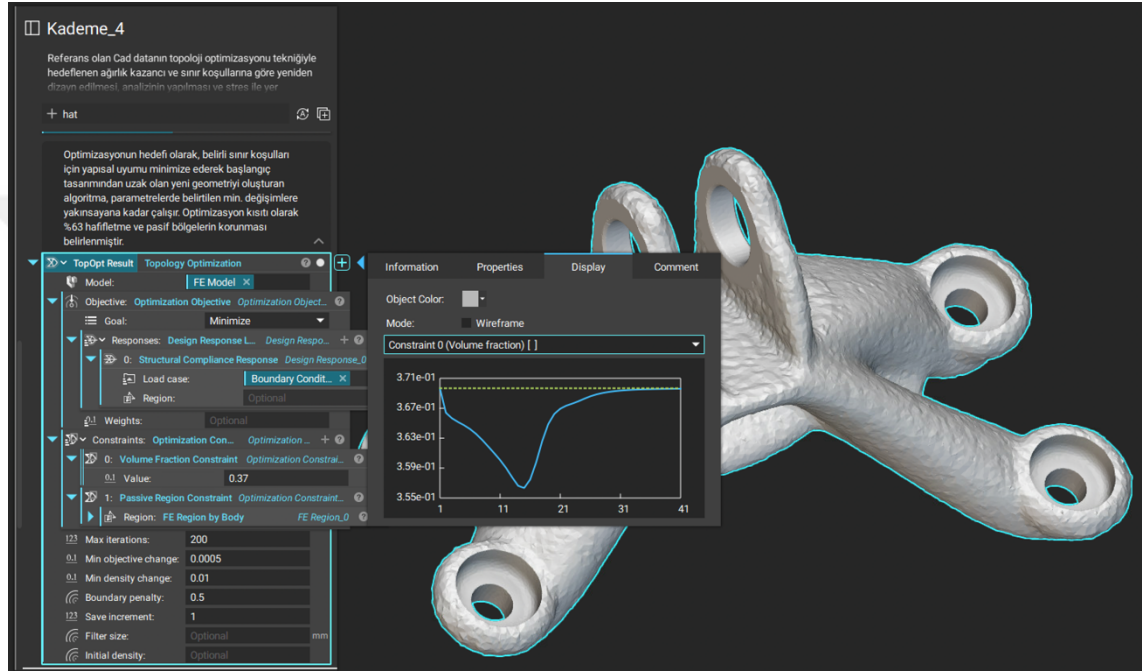
“Minimum Objective Change” parametresinde önerilen bir değer olarak 0.0005 olan girdi için, her iterasyonda bir önceki ile olan değişim kıyaslanır ve artık iterasyonlar arasındaki fark, bu değerden küçük olursa optimizasyon yakınsamış olur ve maksimum iterasyon sayısı kadar iterasyon yapmaya gerek olmadan sonuç alınmış olur. Aşağıdaki görsel 2.22’ de yakınsama grafiği ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.

Görsel 2.1.22: Optimizasyon Hedefinin Yakınsaması



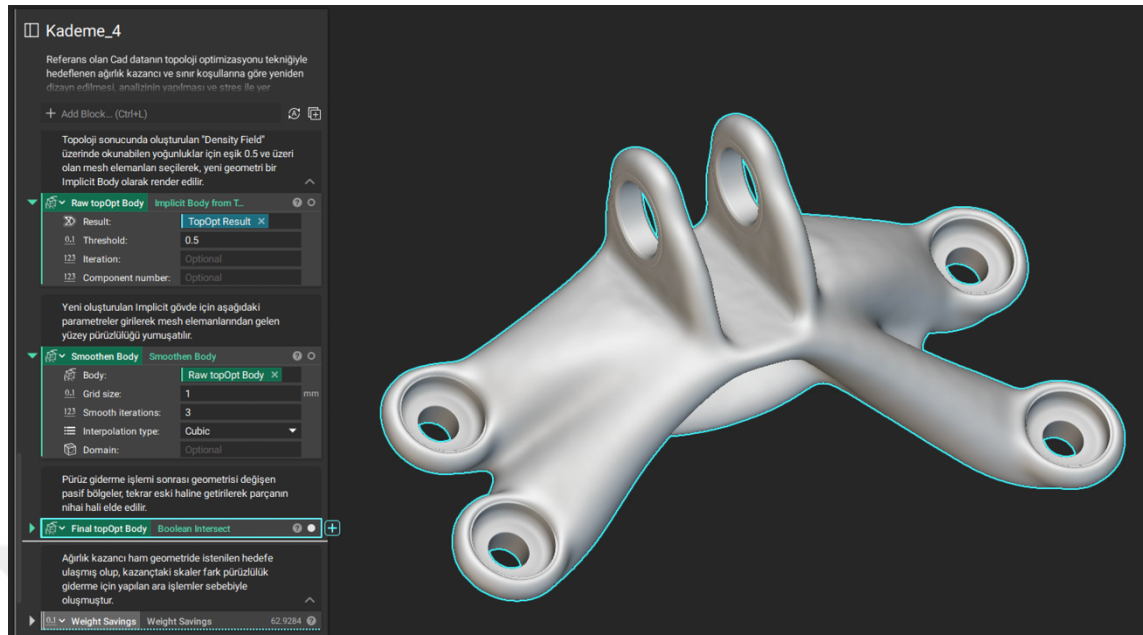
“Minimum Density Change” parametresinde önerilen bir değer olarak 0.01 olan girdi için, iterasyonlar arası yoğunluk kıyaslaması yapılır ve her iterasyonda bir önceki ile olan değişim kıyaslanır ve artık iterasyonlar arasındaki fark bu değerden küçük olursa optimizasyon yakınsamış olur ve maksimum iterasyon sayısı kadar iterasyon yapmaya gerek olmadan sonuç alınmış olur. Aşağıdaki görsel 2.23’ de yakınsama grafiği ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.

Görsel 2.1.23: Hacim Kısıtının Yakınsaması



Topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen tasarım, bulk tasarıma ait meshlerden belirli bir eşik altında kalan mesh elemanlarının kaldırılması sebebiyle, pürüzlü bir yüzeye sahiptir ve ham haldedir. Parçanın nihai tasarımında bu pürüzlülüğün giderilmesi için “Smoothen Body” bloğunun kullanılması gerekir. Elde edilen yeni yüzey aşağıdaki görsel 2.24’ te ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

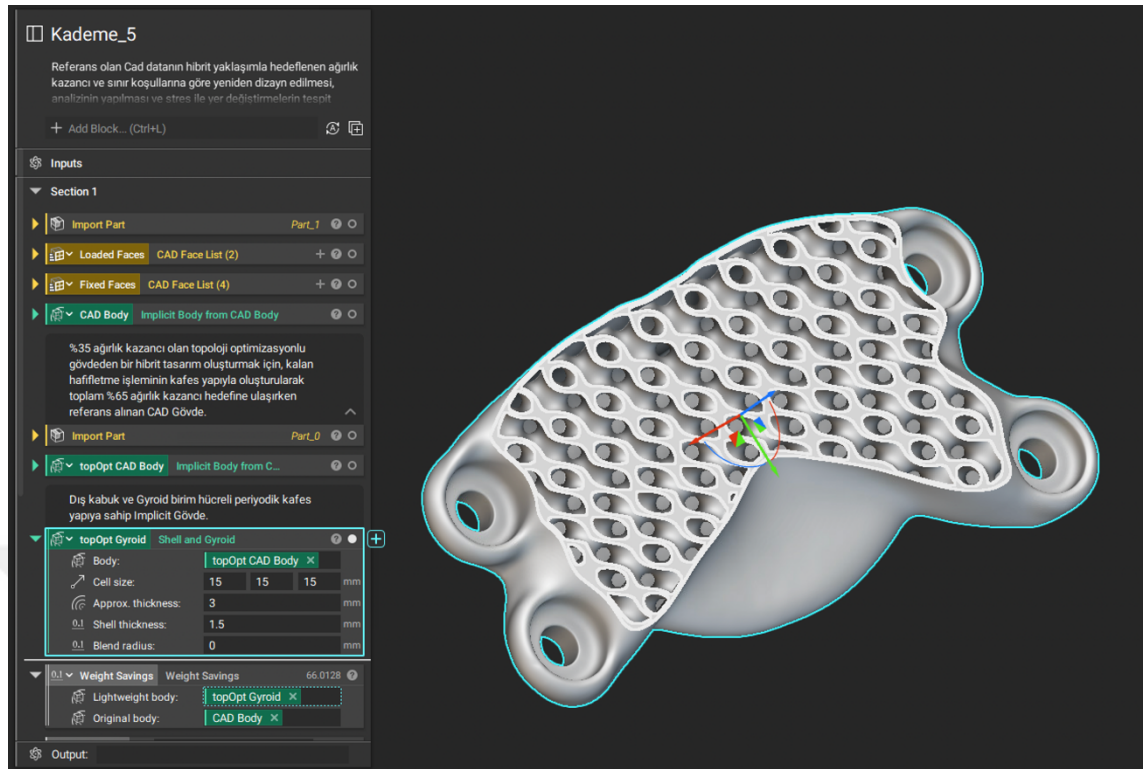
Görsel 2.1.24: Gövde Yüzeyindeki Pürüzlerin Giderilmesi



2.5 Çalışma 5: Hibrit Tasarım

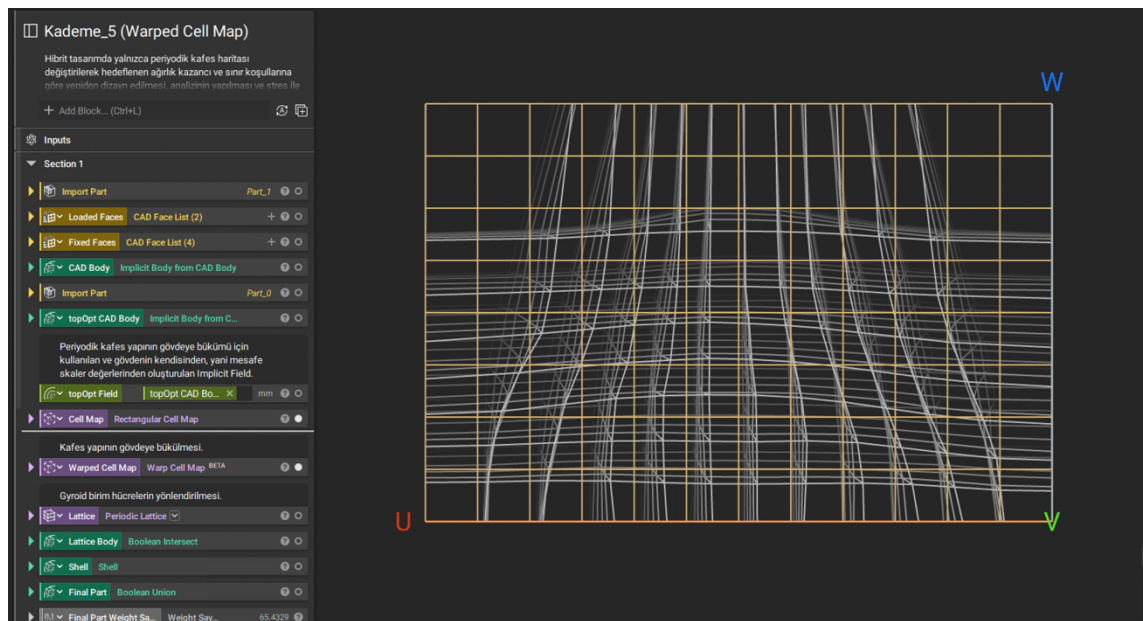
Çalışmaya ait 5. parçanın tasarımı için hibrit bir tasarım olarak, %35 hafifletilmiş topoloji optimizasyonlu gövde yapısı içinde gyroid birim hücreli periyodik bir kafes yapısı oluşturularak, toplamda %66 ağırlık kazancı sağlayan bir tasarım elde edilmiştir. Bu yapı için tamamlanan analizin çıktılarına sonuç bölümünde değinilmiştir.

Görsel 2.1.25: Hibrit Gövdede Gyroid Kafes Yapı



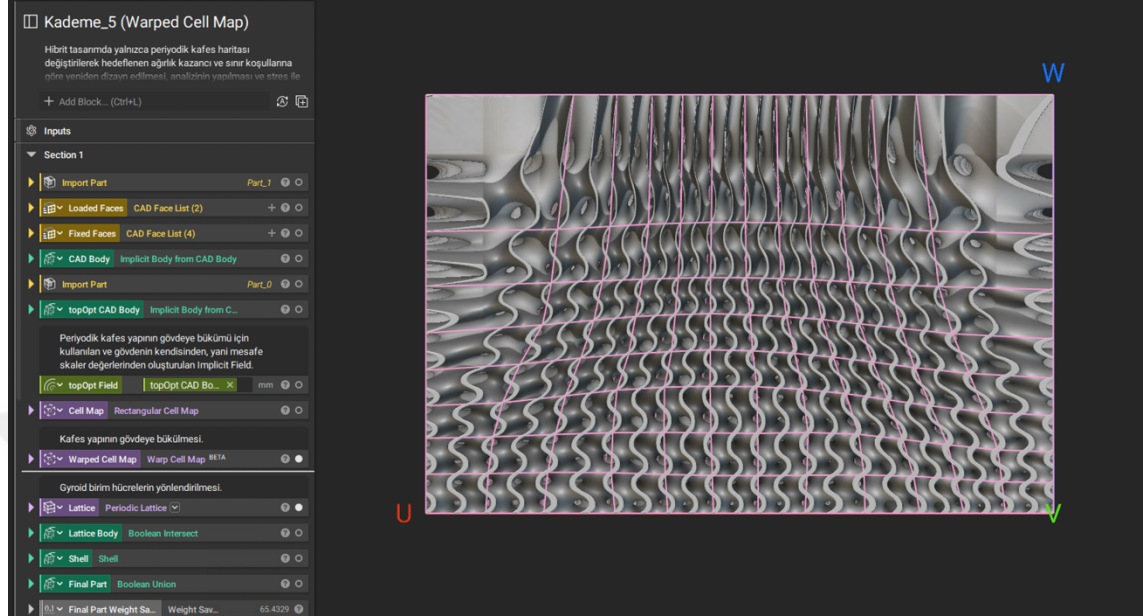
Hibrit yapının sahip olduğu periyodik dizilime bir alternatif olarak periyodik birim hücrelerin haritası, topoloji gövdesine bükülerek yeni bir kafes yapısı oluşturmak ve bunun dayanıma etkisini tespit etmek amacıyla, topoloji gövdesinin mesafe skaler alanı kullanılmış ve tüm eksenlerde ölçeklendirmesi yapılmıştır.

Görsel 2.1.26: Periyodik Kafes Yapının Bükülmesi



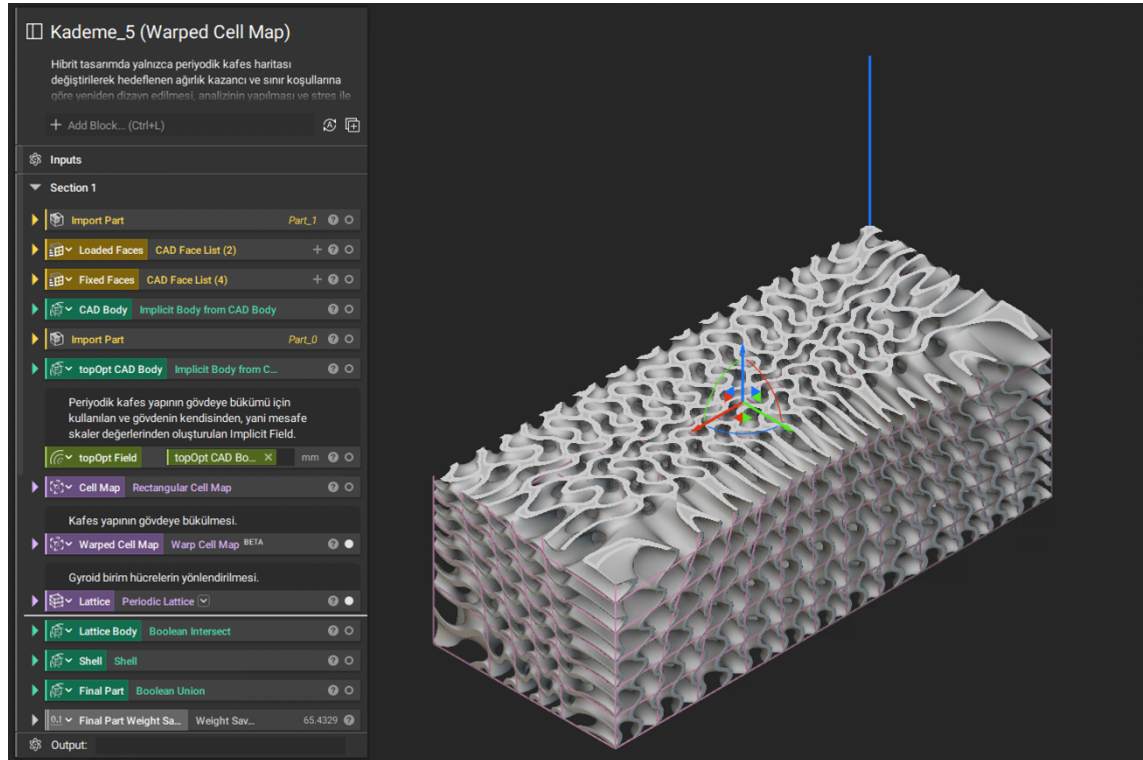
Ölçeklendirme yapılmış birim hücrelerdeki uzamsal değişim, aşağıdaki görsel 2.27’ de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Görsel 2.1.27: Birim Hücrelerdeki Uzamsal Değişim



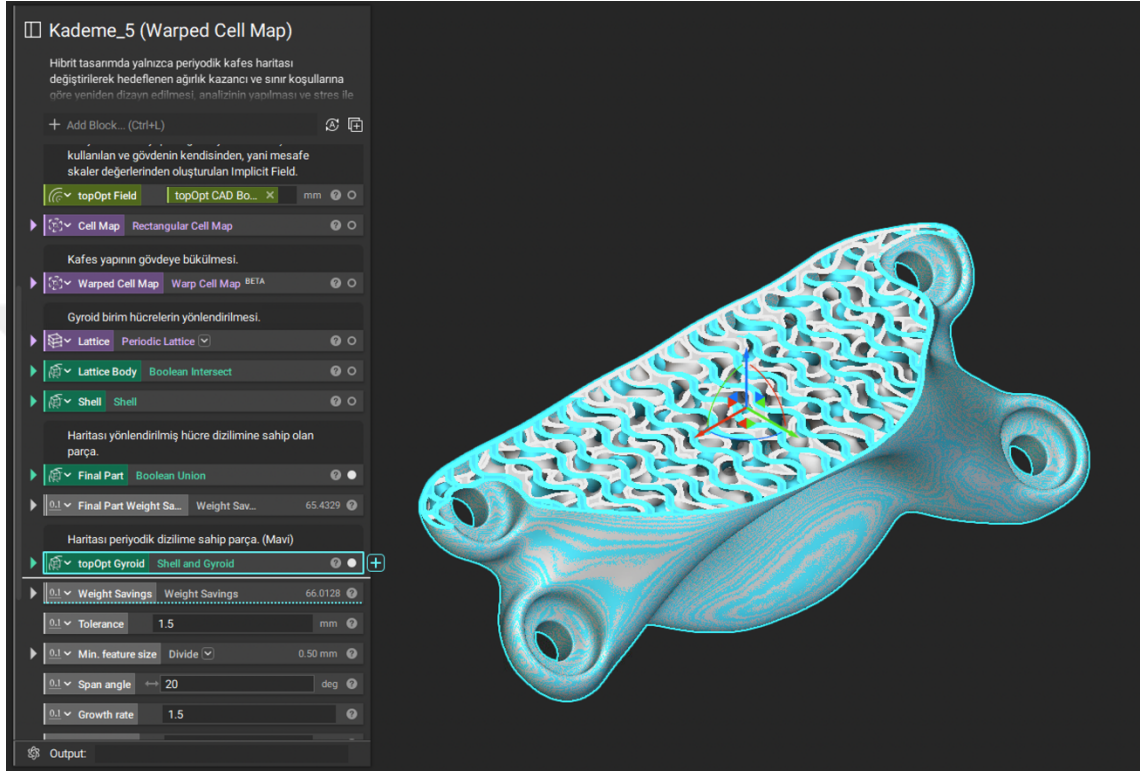
Değişimin gerçekleştiği birim hücrelerin X-Y düzleminden alınmış bir kesiti aşağıda görsel 2.28’ deki gibidir.

Görsel 2.1.28: Uzamsal Değişimin X-Y Kesitindeki Görünümü



Topoloji gövdesinde bulunan önceki periyodik dizilim mavi renk ile gösterilmiş olup, yeni uzamsal değişim ile arasındaki farkın gözlemlenebilmesi için iki geometri farklı renklerde ve birbiri üzerinde render edilmiş olup, X-Y düzlemindeki kesiti aşağıda görsel 2.29' daki gibidir.

Görsel 2.1.29: Periyodik Kafes ile Uzamsal Değişmiş Kafesin Farkı



Yapılan tasarımların analiz çıktıları Sonuç ve Öneriler bölümünde verilmiştir.



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
BULGULAR VE TARTIŞMA

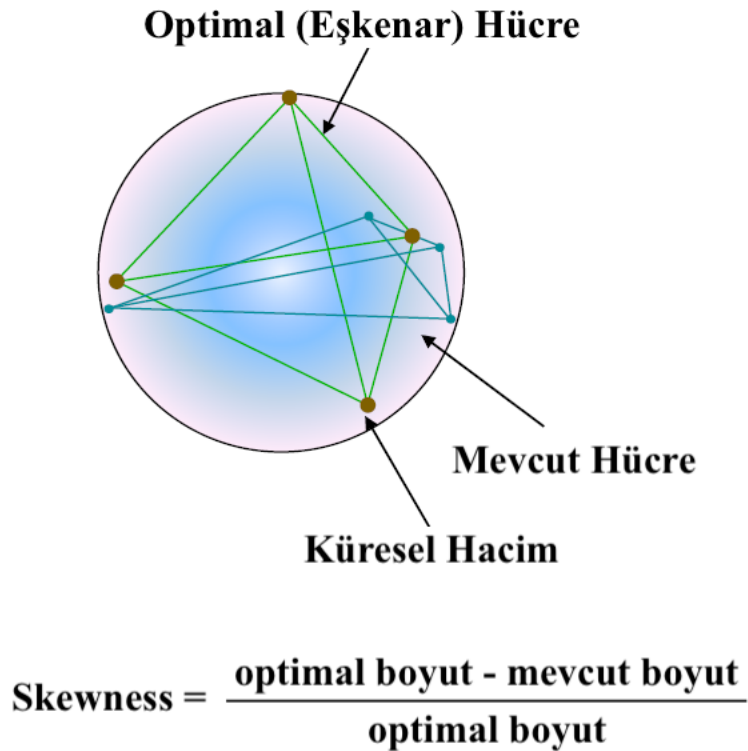
3.1 Mesh Kriteri ve Analiz Sonuçları

Alternatif tasarımlar oluşturulduğunda her bir tasarım için girilen mesh parametreleri, tüm tasarımlarda sabit tutularak farklı mesh parametrelerinin sonuçlar üzerinde dolaylı bir etki oluşturma ihtimali engellenmeye çalışılmış olup, girilen parametreler, tüm tasarım alternatiflerinde geometrik unsurları tutarlı bir şekilde yakalayacak hassasiyette ayarlanmıştır. Sonuçlar alternatif tasarımlarda sırası ile kıyaslanacak olup, her bir tasarım için maksimum yer değiştirme ve von mises gerilme verileri karşılaştırılmıştır.

İlk tasarım için hazırlanan mesh elemanlarının sayısı 1,135,325 olup, “Skewness” kriterinin ortalaması 0.3583’ tür.

Bu kriter değerlerinden “Skewness” için bir karşılaştırma yaptığımızda ortalama değerin 0.25 - 0.5 arasında olması, mesh kalitesini “Skewness” kriteri açısından “çok iyi” gruba dahil etmektedir. “Skewness” kriteri, ideal mesh elemanına göre mevcut mesh elemanındaki açisal çarpıklığa göre bir değerlendirme yapar. Aşağıdaki görsel 3.1, eşkenar hacim sapmasına göre skewness kriterini göstermektedir.

Görsel 3.1: Skewness Kriteri (Eşkenar Hacim Sapması)

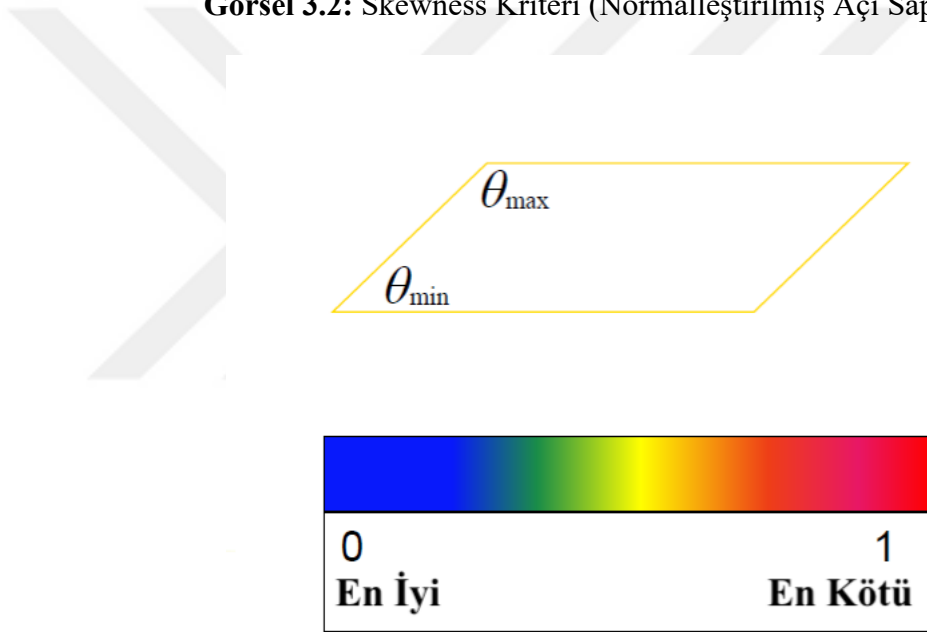


Normalleştirilmiş açı sapması konseptinde ise tüm hücre türleri için, mesh elemanının karşılıklı yüzlerinin orta kısımlarını birleştiren iki çizgi arasındaki minimum açı bulunarak “skewness” kriteri bulunur. 90 dereceden (tetrahedral elemanlar için 60 dereceden) minimum açı çıkarılarak veya maksimum açıdan normalleştirilmiş açı çıkarılarak mesh elemanın eğimi bulunabilir. Aşağıdaki formül 3.1’ de “ e ” simgesi, eşaçılı yüzlere ait normalleştirilmiş açıyı temsil etmektedir.

$$Skewness = \max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad [3.1]$$

Aşağıdaki görsel 3.2’ de normalleştirilmiş açı sapması skewness kriteri ve açıları gösterilmektedir.

Görsel 3.2: Skewness Kriteri (Normalleştirilmiş Açı Sapması)

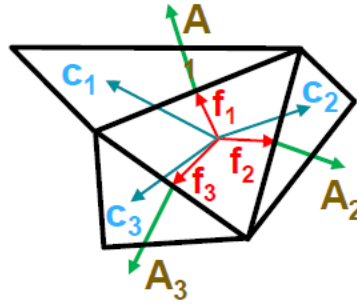


“Orthogonality” kriterinin ortalaması ise 0.8280’ dir. Bu kriter değerlerinden “Orthogonality” için bir karşılaştırma yaptığımızda ortalama değerin 0.70 - 0.85 arasında olması, mesh kalitesini “Orthogonality” kriteri açısından “çok iyi” gruba dahil etmektedir. “Orthogonality” kriteri, mesh elemanın merkezinden kenarlarına olan uzaklık ile komşu mesh elemanın merkezine olan uzaklık arasındaki dikey çarpıklığa göre bir değerlendirme yapar. Aşağıdaki formül 3.2, Orthogonality kriterinin formülünü göstermektedir.

$$Orthogonality = \min \left(\frac{A_i \cdot f_i}{|A_i| |f_i|}, \frac{A_i \cdot c_i}{|A_i| |c_i|} \right) \quad [3.2]$$

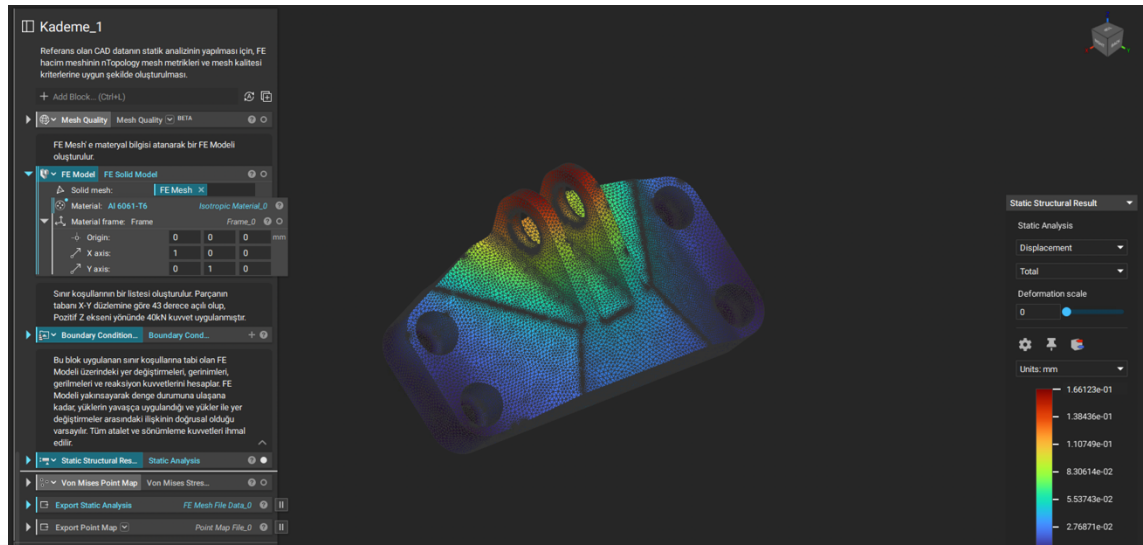
Aşağıdaki görsel 3.3’ de formülde kullanılan terimler gösterilmiştir.

Görsel 3.3: Orthogonality Kriteri



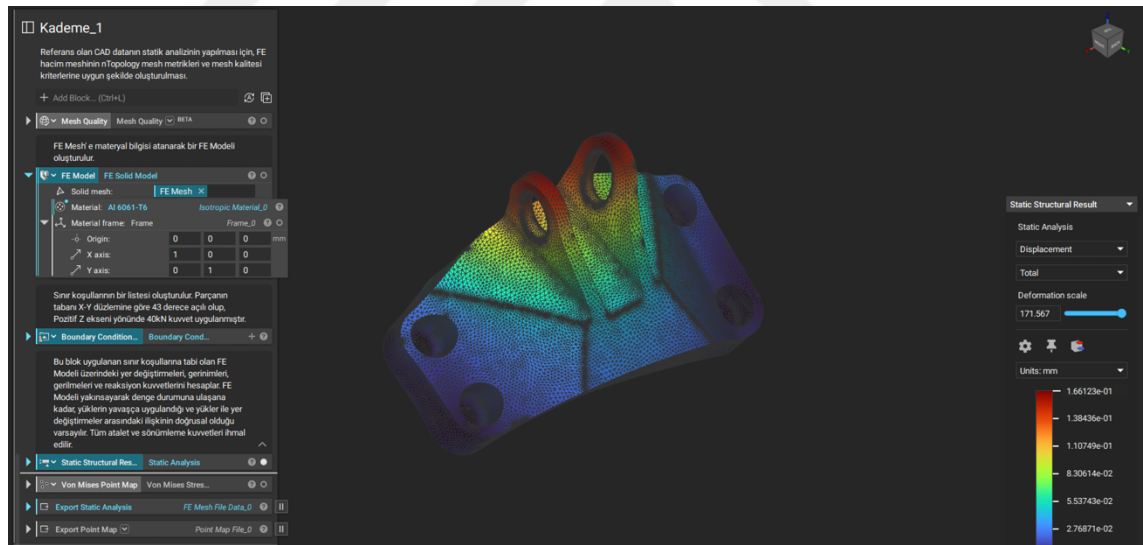
Tasarım alternatiflerinden birincisi için yapılan analizde, içi tamamen dolu bir geometri kullanılmıştır. Görsel 3.4’ te görüldüğü üzere bu analiz sonucunda 0.1661 mm max. yer değiştirme gözlemlenmiştir. Yer değiştirmenin en fazla gerçekleştiği kısım sabitlenen yüzlerden en uzak, kuvvetin uygulandığı yüzlere de en yakın alandır.

Görsel 3.4: 1. Tasarımda Maksimum Yer Değiştirme



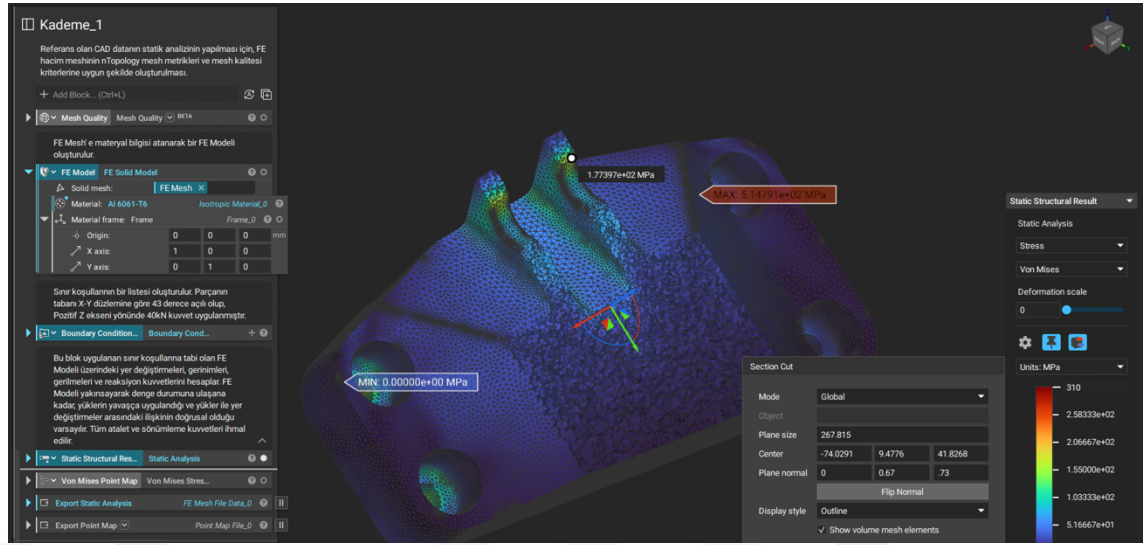
Aşağıdaki görsel 3.5’ te ise maksimum yer değiştirme yaklaşık 170 kat ölçeklendirilerek temsil edilmiştir.

Görsel 3.5: 1. Tasarımda Ölçeklendirilmiş Yer Değiştirme



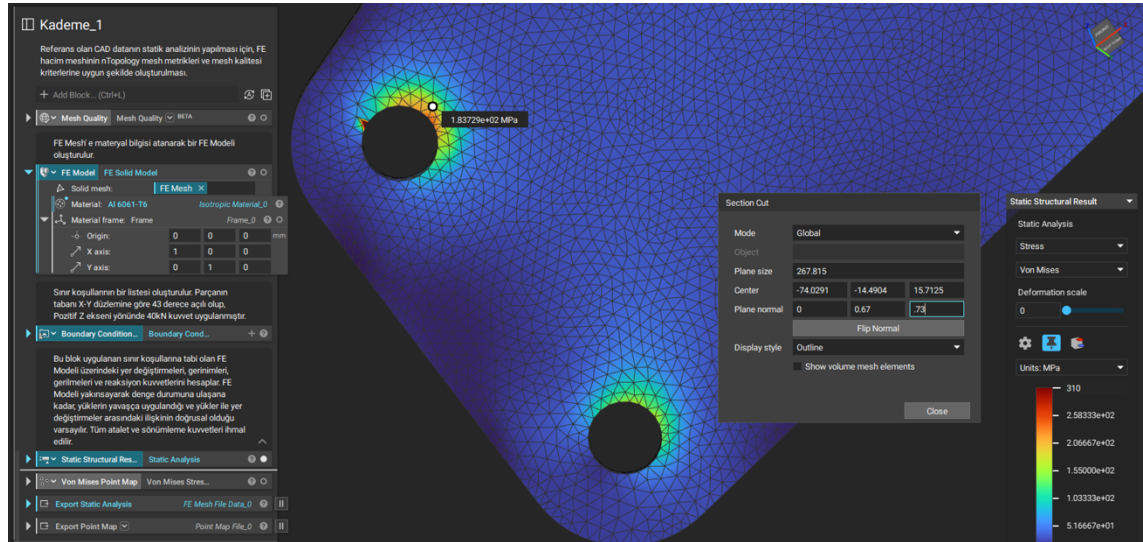
Analiz sonucunda Von Mises gerilme verilerine göre parçanın genelinde düşük gerilmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Aşağıdaki görsel 3.6’ da gerilmenin yoğun olduğu renkte 180 MPa civarı gerilme gözlemlenmiştir.

Görsel 3.6: 1. Tasarımda Von Mises Gerilme Verileri



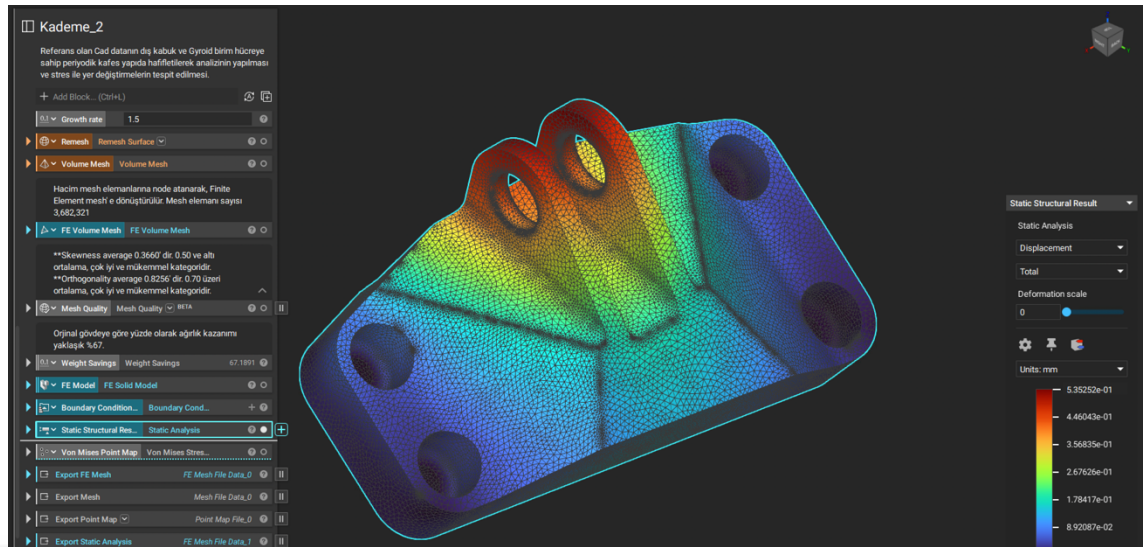
Keskin unsurların kenarlarında büyük mesh elemanları olması sebebiyle “mesh singularity” oluşabildiği için, parça üzerindeki renk gradyanını doğru dağıtmak amacıyla, maksimum değer aralığında ayarlama yapılmıştır. Bu ayarlama, singularity bölgelerini daha net göstermektedir. Aşağıdaki görsel 3.7’ de noktasal singularity görülmekte olup 514 MPa okunmuştur.

Görsel 3.7: 1. Tasarımda Noktasal Singularity



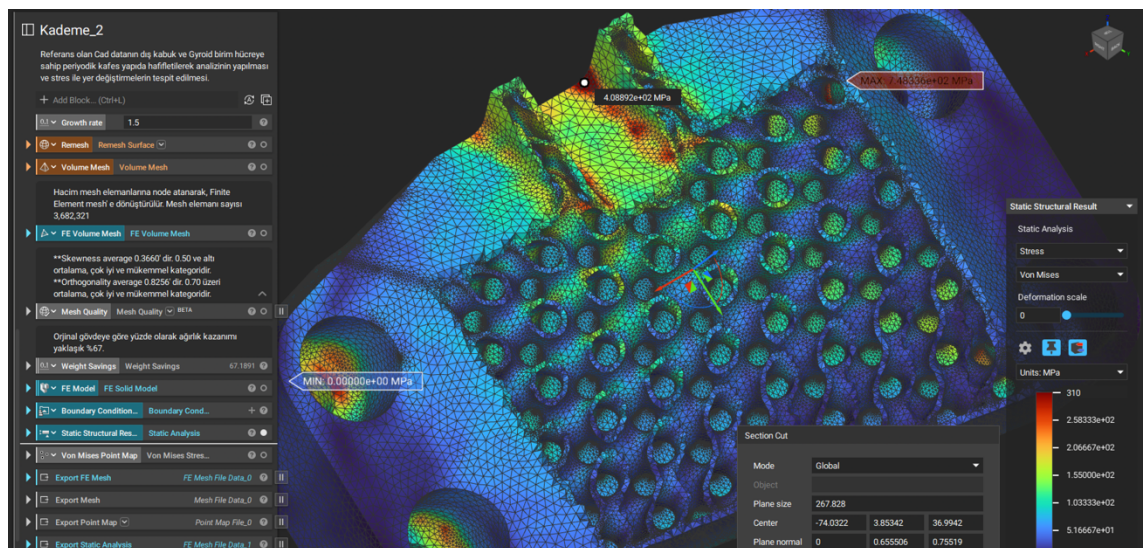
Tasarımların 2. alternatifinde, içi dolu olan parça boşaltılmış olup, 1.5 mm dış kabuğa sahip yapı içinde gyroid birim hücreleri olan, periyodik kafes yapılı bir geometri oluşturulmuştur. Bu geometride elde edilen ağırlık kazancı, içi dolu geometriye göre %67’ dir. Aşağıdaki görsel 3.8’ de hafif yapıdaki geometride maksimum yer değiştirmenin 3.22 kat artırarak 0.5352 mm’ e ulaştığı görülmüştür.

Görsel 3.8: 2. Tasarımda Maksimum Yer Değiştirme



Analiz sonucunda Von Mises gerilme verilerine göre parçanın genelinde yüksek gerilmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Aşağıdaki görsel 3.9’ da gerilmenin yoğun olduğu renkte 400 MPa civarı gerilme gözlemlenmiştir. Yüksek gerilmenin olduğu bölgeler, parçanın periyodik kafes yapısında iç bölgelere kadar ilerlemiş olup, büyük bir alanda görülmektedir ve akma değeri olan 280 MPa’ ı geçtiği için plastik şekil değiştirmenin gözlemleneceği düşünülmektedir. Bu değerler, mevcut yük altında parçanın dış kabuk ile gyroid birim hücrenin birleştiği arayüzde güvensiz olduğuna işaret etmektedir. Aşağıdaki görsel 3.9’ da noktasal singularity de görülmekte olup 748 MPa okunmuştur. Meshleme işlemi, dış kabuğun aynı olduğu geometride aynı mesh parametreleriyle yapılmıştır. Bu sebeple mesh singularity aynı mesh yapısında aynı bölgede oluşmuştur.

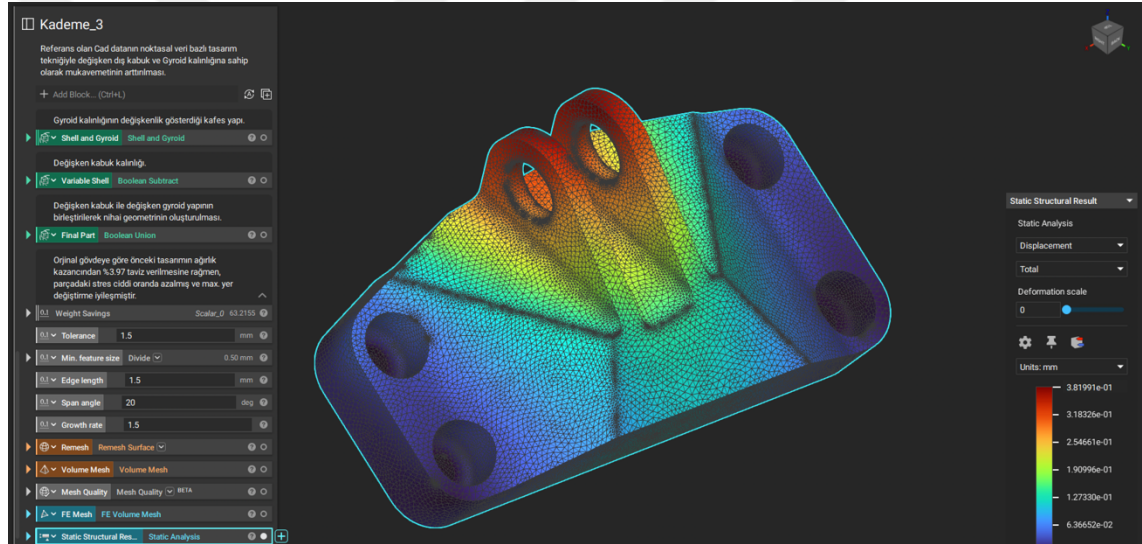
Görsel 3.9: 2. Tasarımda Von Mises Gerilme Verileri



Tasarımların 3. alternatifinde gerilmenin çok fazla olduğu ve malzemenin çok az bulunduğu yüksek gözenekliliğe sahip bölgelerde özel bir optimizasyon yapılmıştır. Buralarda dış kabuğun ve gyroid birim hücre duvarlarının değişken kalınlığa sahip olması sağlanmıştır. Burada kullanılan yöntemde 2. alternatif tasarımın analiz sonuçlarından alınan ve Von Mises gerilme verilerinden oluşan nokta bulutu, Implicit alana çevrilmiştir. Bu veri alanı ile mevcut geometrimizin implicit alanında boyutsal eşleştirmeler yapılarak etkileşime sağlandığında yeni geometri oluşturulmuştur.

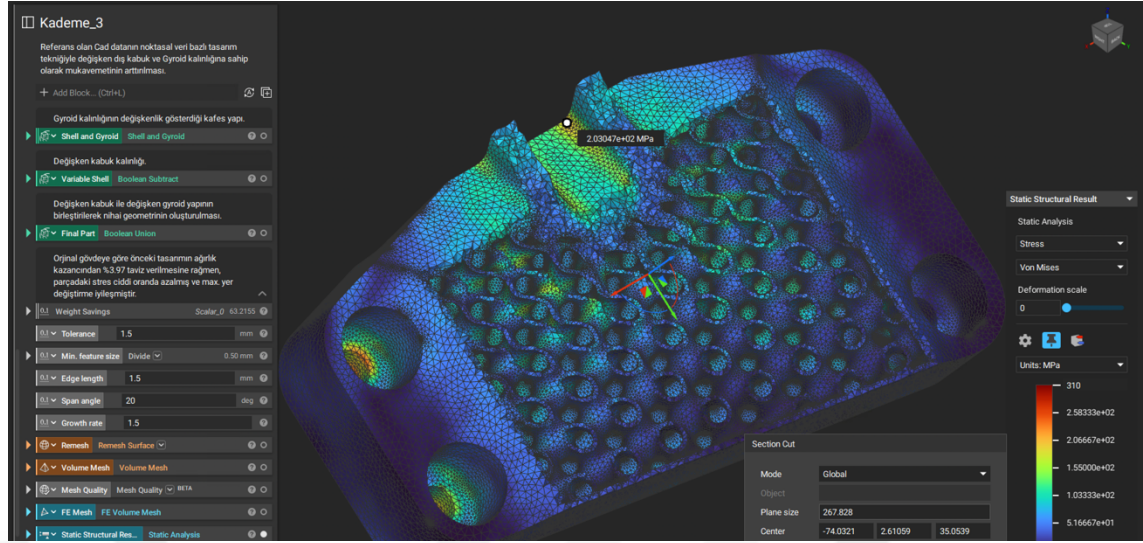
Görsel 3.10' da maksimum yerdeğiştirme miktarına baktığımızda 0.5352 mm' den 0.3819 mm' e düşmüş olup, %40 oranında çok ciddi bir iyileşme sağlanmış olup, ağırlık kazancından yalnızca %3.97 oranında taviz verilmiştir.

Görsel 3.10: 3. Tasarımda Maksimum Yer Değiştirme



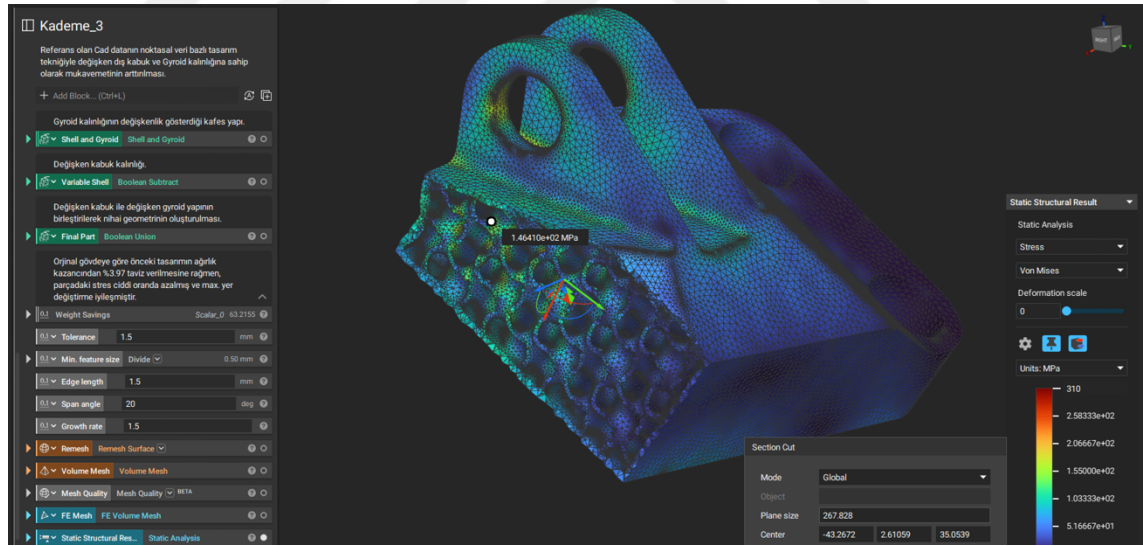
Aşağıdaki görsel 3.11' de görüldüğü üzere optimize edilmemiş kafes yapıya göre parça üzerindeki gerilmede çok ciddi bir iyileşme mevcuttur.

Görsel 3.11: 3. Tasarımda Von Mises Gerilme Verileri



Aşağıdaki görsel 3.12’ de Y-Z düzleminde alınan kesitten baktığımızda, optimize edildikten sonra gerilme dağılımının kafes yapıda çok daha iyi dağıldığı ve daha homojen bir dağılım olduğu görülmektedir.

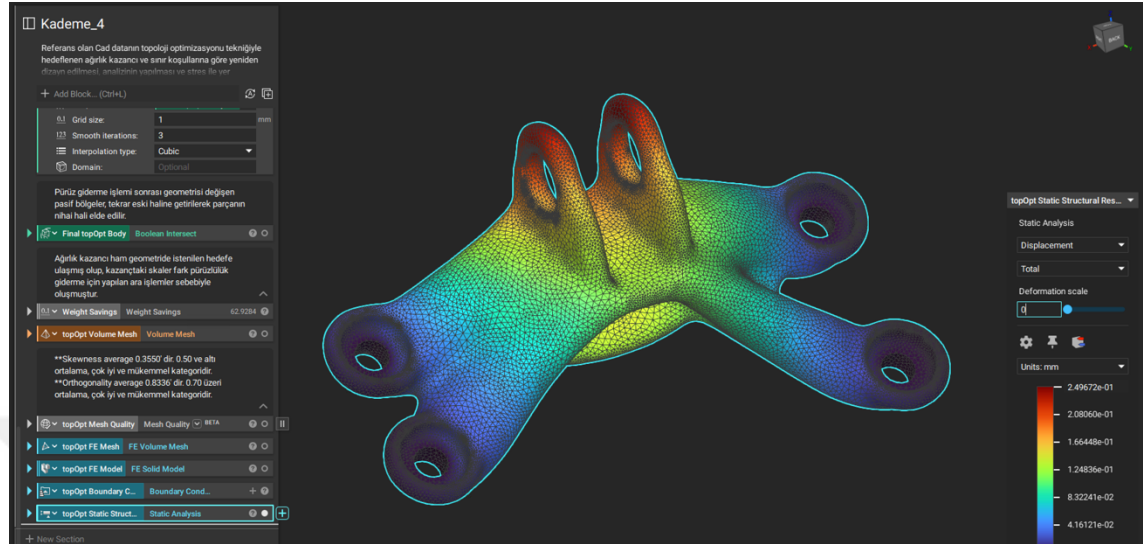
Görsel 3.12: 3. Tasarımın Y-Z Düzlemine Ait Kesitte Gerilme Dağılımı



Tasarımların 4. alternatifinde topoloji optimizasyonu yönteminde hacim kısıtı için belirlediğimiz oran, 3. tasarım ile aynı ağırlığa sahip olması yönündeki bir kısıttır. Bu durumda parça üzerindeki maksimum yer değiştirme görsel 3.13’ te 0.2496 mm olduğu görülmektedir. Aynı ağırlığa sahip, optimize edilmiş kafes yapıdan elde ettiğimiz 0.3819 mm’ lik sonuca göre ciddi bir iyileşme görülmekte olup, iki değer arasında %50 oranında daha az yer değiştirme görülmektedir. Buradaki tasarım konseptinde hafifletilmiş parçanın tasarımı yapılırken kafes yapı yönteminden farklı olarak, parçanın

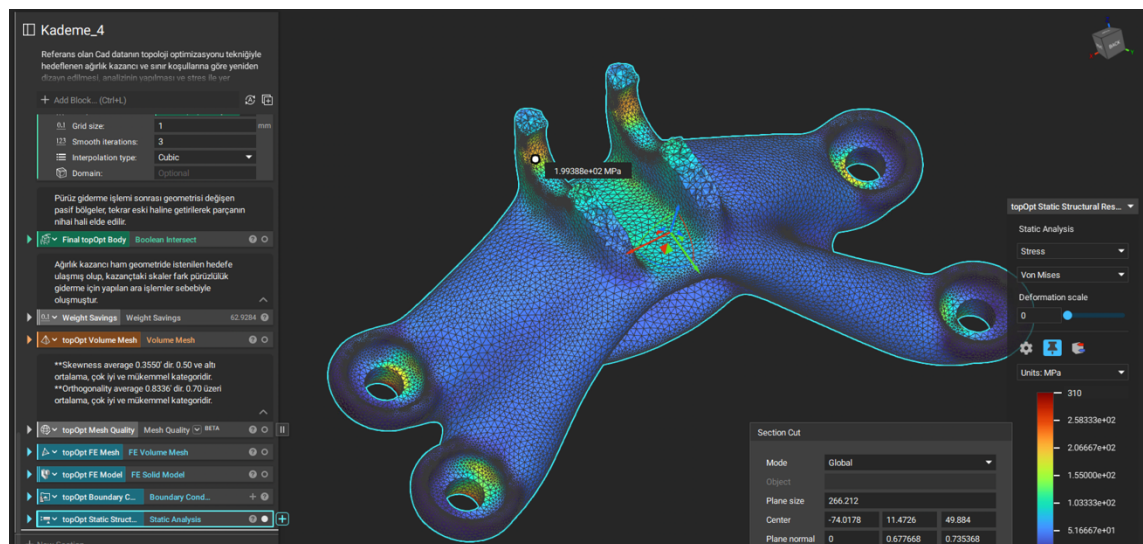
yalnızca ihtiyaç duyulan geometri alanında ve içi tam dolu olduğu durumda tasarlanmış ve yapısal analizi yapılmıştır.

Görsel 3.13: 4. Tasarımda Maksimum Yer Değiştirme



Aşağıdaki görsel 3.14' te ise gerilmenin parçada dağılımına bakılırsa skaler büyüklüklerde benzer değerlerin görüldüğü, ancak maksimum yer değiştirmedeki farkın olduğu durumun, gerilmenin gövde içindeki dağılımında kafes yapı yerine tam dolu malzemede gerçekleşmesiyle izah edilebileceği düşünülmektedir.

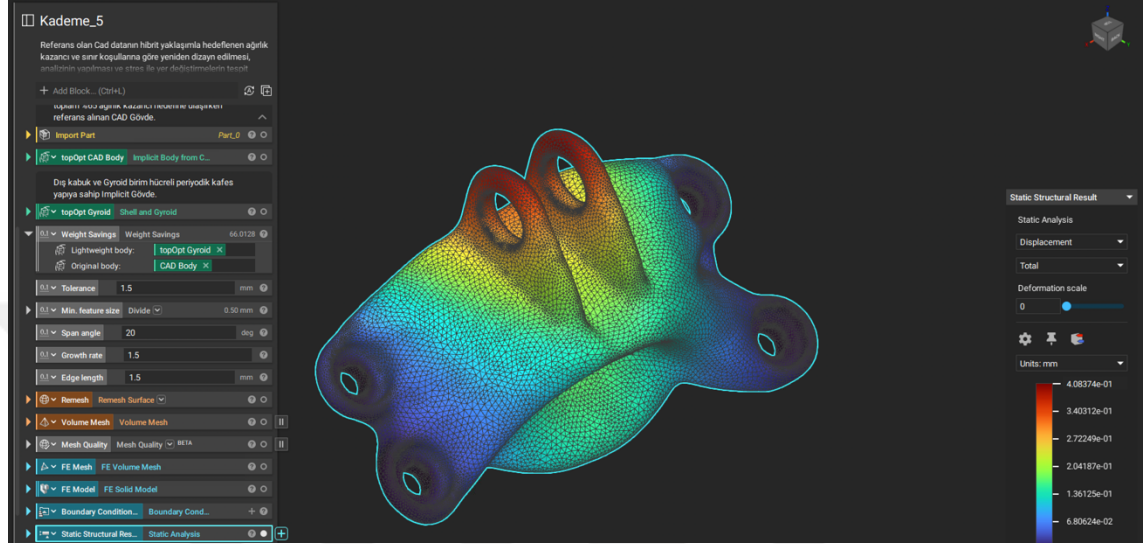
Görsel 3.14: 4. Tasarımda Von Mises Gerilme Verileri



Tasarımların 5. alternatifinde, referans tasarımdan %35 hafifletilerek topoloji optimizasyonu yapılmış bir gövdenin içinde periyodik kafes yapı oluşturularak ortalama %66 hafifletilmiş hibrit bir tasarımın davranışı incelenmiştir. Görsel 3.15' te maksimum yer değiştirme miktarına baktığımızda 0.4083 mm yer değiştirme olduğu görülmüştür. 2.

tasarımdaki 0.5352 mm yer değiştirmeye göre iki değer arasında %30 iyileşme gözükse de buradan yola çıkarak yeterli bir tasarım olduğuna dair çıkarım yapılamaz. Gerilme verileri için yapılan değerlendirme sonucundan tasarımın yeterli olmadığı kanısına varılabilir.

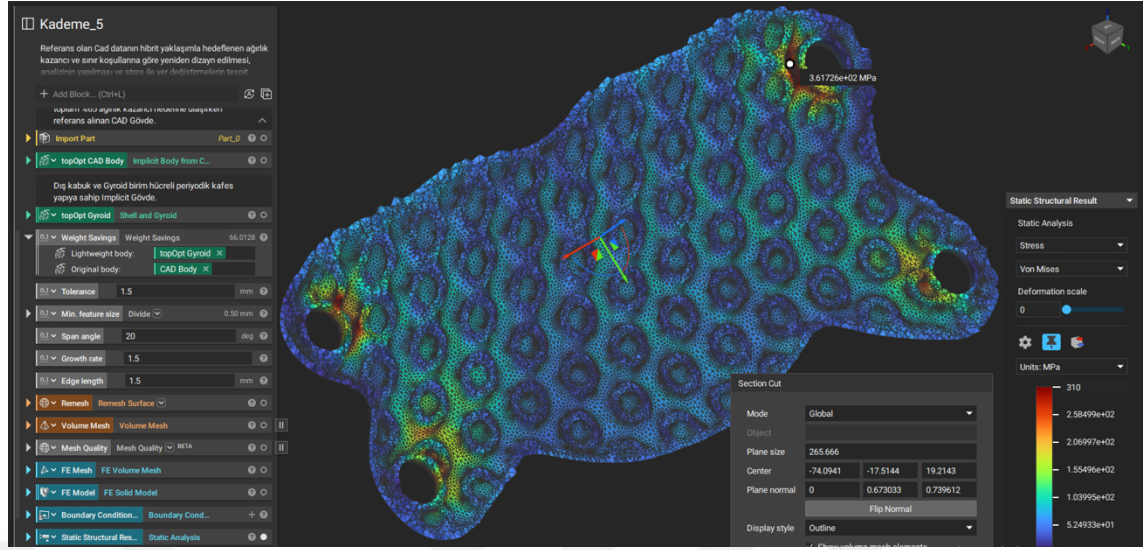
Görsel 3.15: 5. Tasarımda Maksimum Yer Değiştirme



Aşağıdaki görsel 3.16' da açık olduğu üzere topoloji gövdesi içindeki periyodik kafes yapının, 2. tasarım alternatifindeki zafiyetleri aynen taşıdığı görülmektedir. Burada periyodik kafes yapının bulunduğu dış kabuk değişse dahi, sabitlenen yüzlerin ve kuvvetin uygulandığı yüzlerin etrafında örülü olan kafes yapının birleşim arayüzleri aynı kaldığı için, bu bölgelerdeki zafiyetin aynı şekilde devam ettiği görülmektedir.

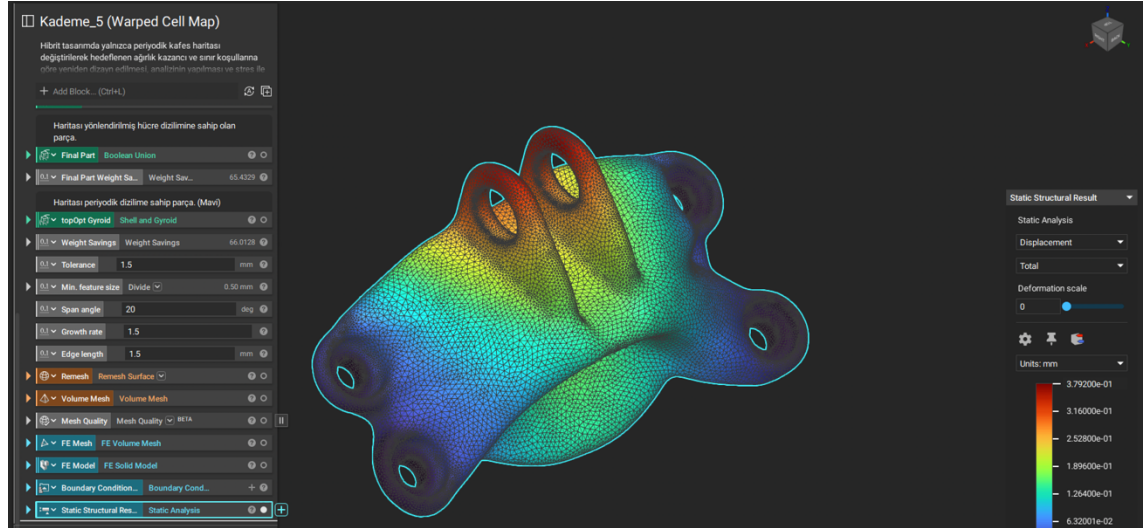
Yer değiştirme miktarındaki iyileşme ise, hibrit hafifletmede aynı ağırlığın yakalanabilmesi için gyroid birim hücrelere ait duvar kalınlıklarının 1.5 mm yerine 3 mm alınmasının, malzeme kesitinde oluşturduğu artış ile elde edilen avantajın bir sonucu olarak izah edilebilir.

Görsel 3.16: 5. Tasarımda Von Mises Gerilme Verileri



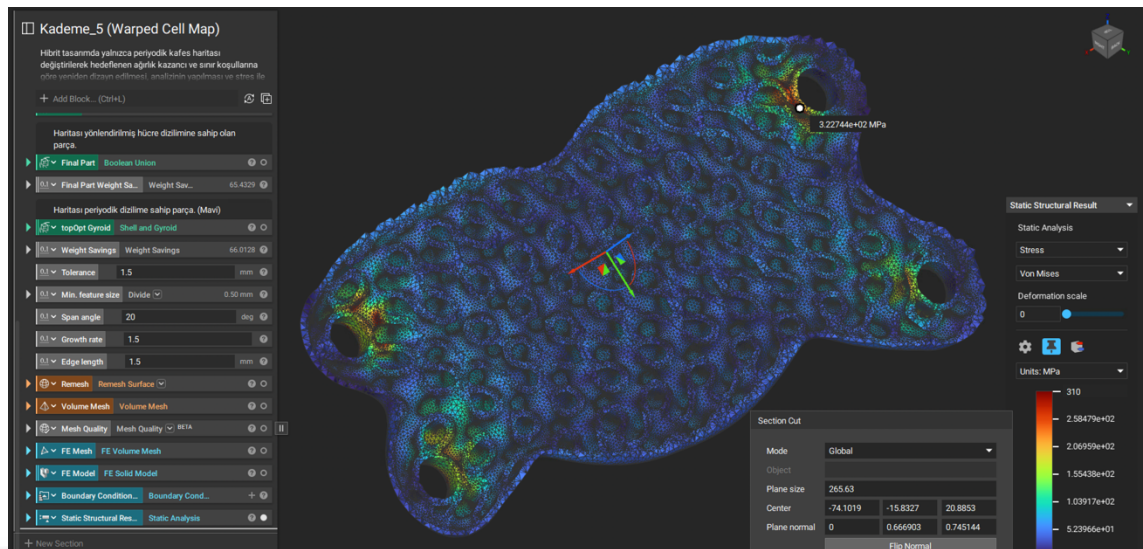
Hibrit tasarıma yapılabilecek bir diğer alternatif yaklaşım ise, kafes yapıdaki periyodik dizilimin değiştirilmesi ve dizilimin tüm eksenlerde yönlendirilerek, topoloji gövdesinin içine doğru bükülmesidir. Aşağıdaki görsel 3.17’ de yönlendirilmiş dizilime sahip kafes yapıdaki maksimum yer değiştirme 0.3792 mm olarak görülmektedir. 5. tasarımın periyodik diziliminde yer değiştirmenin 0.4083 mm olduğu göz önüne alındığında, iki değer arasında yaklaşık %10 bir iyileşme gözlenmektedir.

Görsel 3.17: 5. Tasarımda Yönlendirilmiş Kafeste Maksimum Yer Değiştirme



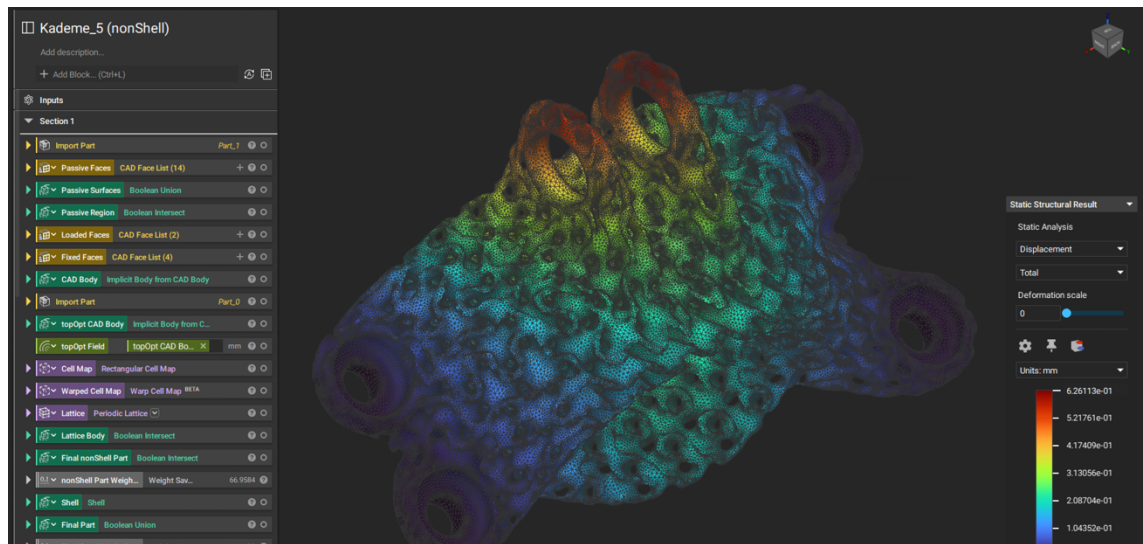
Aşağıdaki görsel 3.18’ de gyroid birim hücrelerde oluşan uzamsal değişimin, sabitlenen yüzlerin etrafında örülü olan kafes yapının birleşim arayüzlerinde de pozitif etkisinin olduğu ve gerilme verilerinde bölgesel olarak yaklaşık %10’ luk bir azalma oluşturduğu tespit edilmiştir.

Görsel 3.18: 5. Tasarımda Yönlendirilmiş Kafeste Von Mises Gerilme Verileri



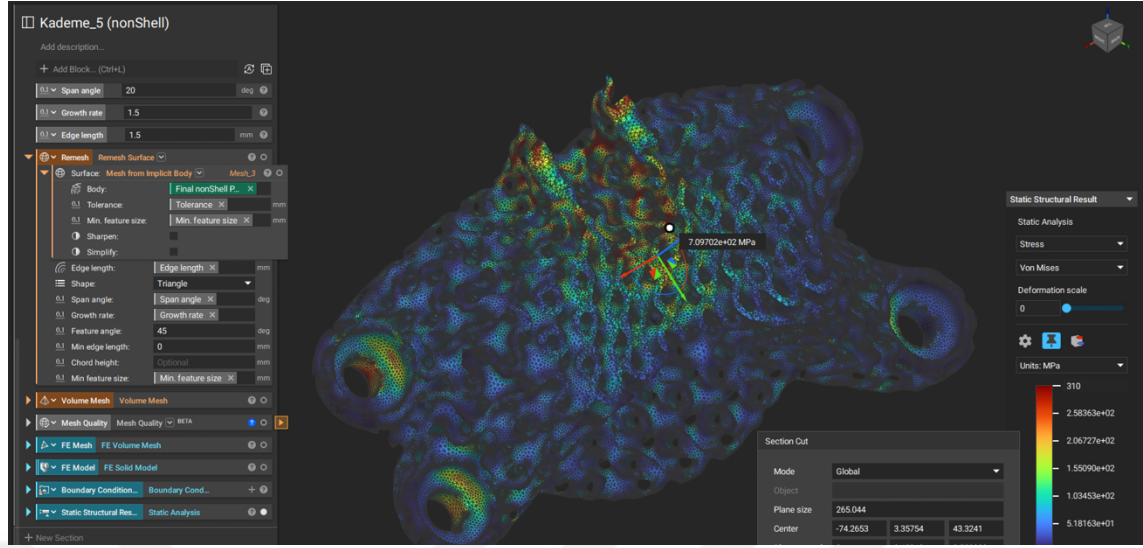
Hibrit tasarım için son bir alternatif olarak, dış kabuk yapısının etkisini gözlemlemek için referans geometriye göre %67 ağırlık kazancı olan, dış kabuksuz bir periyodik kafes yapı tasarlanmış olup, görsel 3.19’ da 0.6261 mm maksimum yer değiştirme görülmüştür. Hibrit tasarımın dış kabuklu periyodik kafes yapısına sahip alternatifindeki 0.4083 mm maksimum yer değiştirmeye göre elde edilen sonuç, yaklaşık %50 daha bir kötü performans göstermiştir.

Görsel 3.19: 5. Tasarımda Dış Kabuksuz Kafeste Maksimum Yer Değiştirme



Aşağıdaki görsel 3.20’ de ise gerilme dağılımının oldukça kötüleştiği, skaler büyüklüklerin 2 katına kadar arttığı, dış kabuğun ise kafes üzerinde ilerleyen gerilmeyi dağıtıcı bir rol üstlendiği ve gyroid birim hücreye ait duvarlarda gerilmenin biriktiği görülmüştür.

Görsel 3.20: 5. Tasarımda Dış Kabuksuz Kafeste Von Mises Gerilme Verileri



Aşağıdaki tablo 1’ de sonuçlar Von Mises gerilme değerleri, maksimum yer değiştirme ve yüzdesel ağırlık kazancı açısından kıyaslanmaktadır. Referans tasarım kafes yapıya dönüştürüldüğünde %67 ağırlık kazancı olmuş fakat parçada kalıcı şekil değiştirme meydana gelmiştir. Kafesin zayıf kesitleri data-driven tekniği ile geliştirilerek %63 ağırlık kazancıyla elastik bölgede kalmıştır. Aynı ağırlıktaki topoloji geometrisi en az yer değiştirmeyi göstermiş olup, hibrit tasarımda topoloji geometrisindeki dış kabuk içinde bulunan periyodik kafes, referans geometrideki kabuk içinde bulunan kafes ile benzer zayıflıkları göstermiştir fakat yakın ağırlık oranı sağlamak için hibrit yapıdaki gyroid duvarları daha kalın olduğu için yer değiştirme daha azdır. Ayrıca hibrit yapıda uzamsal değiştirilen gyroid yapı yer değiştirme açısından %10 daha iyi sonuç vermiştir. Kabuksuz kafes yapının üzerinde biriken gerilme ise alternatif tasarımlar içinde en fazlası olup, maksimum yer değiştirme ve kalıcı şekil değiştirme açısından en kötü performansı göstermiştir.

Tablo 3.1: Sonuçların Karşılaştırılması

	1	2	3	4	5	5'	5''
TASARIM	Referans	Kafes	Geliştirilmiş Kafes	Topoloji	Hibrit	Yön. Hibrit	Kabuksuz
Ağırlık Kazancı [%]	0	67	63	63	66	66	67
Maximum Yer Değiştirme [mm]	0.1661	0.5352	0.3819	0.2496	0.4083	0.3792	0.6261
Von Mises [MPa]	180	<u>400</u>	208	199	<u>361</u>	<u>322</u>	<u>709</u>



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER

İlk tasarımda içi tamamen dolu yapıda olan referans CAD verisi, ikinci tasarımda %67 oranında hafifletilmiştir. Bu hafifletme işleminde 3.22 kat maksimum yer değiştirmede artış gözlenmiştir. Dış kabuk yapı içinde periyodik bir kafes yapı oluşturularak yapılan hafifletme işlemi, gözlenen gerilme verilerine göre kalıcı plastik şekil değişimi gösteren bazı zayıflıklara sahiptir. Zayıf bölgeler, çoğunlukla sabitlenen yüz ile kuvvetin uygulandığı yüzün etrafındaki gyroid kafes yapının dış kabuk ile birleştiği arayüzlerde bulunan ince kesitlerde biriken gerilme kaynaklıdır.

İkinci tasarımdaki bu zayıflığın giderilmesi için üçüncü tasarımda gerilme verisi bazlı otomatik bir optimizasyon işlemi olarak dış kabuk ve gyroid hücre duvarlarında kalınlaştırma yapılmış olup, yalnızca %3.97 oranında ağırlık feda edilerek elde edilen geometrinin elastik bölgede kaldığı tespit edilmiştir. Üçüncü tasarıma ait maksimum yerdeğiştirme, ikinci tasarıma göre %40 oranında azalmıştır.

Üçüncü tasarım ile elastik bölgede kalan ve hala %63 ağırlık kazancına sahip olan optimize edilmiş kafes yapılı geometri, dördüncü tasarımda kendisiyle aynı ağırlığa sahip olan ancak geometrisi topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilmiş içi dolu yapı ile kıyaslanmıştır. Dördüncü tasarıma ait maksimum yer değiştirme, üçüncü tasarıma göre %50 azalmıştır. Dördüncü tasarımda gerilmenin bir kafes yapı yerine içi dolu malzemede dağılması maksimum yer değiştirmeye olumlu yansımıştır.

Dördüncü tasarım ile aynı ağırlıktaki bir kafes yapıya göre daha yüksek verim alındığı için, beşinci tasarımda hibrit bir tasarım denenmiştir. Dış kabuk referans geometri yerine topoloji geometrisine sahip olmuştur ancak burada da 2. tasarıma ait zayıflıkların aynı şekilde devam ettiği görülmüştür ve 5. hibrit tasarımdaki maksimum yer değiştirme 1.63 kat kötüleşmiştir. Hibrit yapının dış kabuğu topoloji geometrisine sahip olsa da periyodik kafes gibi davranmaktadır ancak periyodik kafes yapıların maksimum yer değiştirmeleri iki farklı dış kabuk için kıyaslandığında, referans kabuktaki 0.5352 mm yer değiştirme yerine topoloji geometrili dış kabukta yer değiştirme 0.4083 mm' dir. Bu fark, hibrit tasarımdaki gyroid' in duvar kalınlığının 1.5 mm yerine 3 mm olmasından gelen dayanım artışı ile fakat aynı zamanda topoloji gövdesi içindeki kafesin referans geometri hacmine göre daha küçük bir hacime kırılmış olmasından gelen zayıflık ile açıklanabilir.

Beşinci tasarımın hibrit yapısındaki periyodik kafesin zayıflığı 2. tasarımla benzerlik gösterdiği için bu yapı da değiştirilmiştir. Periyodik dizilim topoloji gövdesinin

içine doğru bükülerek yeniden yönlendirilmiş olup, gyroid birim hücrelerin tüm eksenlerinde uzamsal değişimler oluşmuş ve maksimum yer değiştirmeye %10 ve gerilmenin skaler büyüklüğüne de %10 olumlu katkıda bulunmuştur.

Son olarak hibrit yapıdan yola çıkılarak dış kabuk yapının etkisini ölçmek için kabuksuz bir versiyon yapılmış ve bu kabuksuz tasarımın hafifliğe etkisi %1 ile sınırlı kalmıştır. Maksimum yer değiştirmesi ise 0.4083 mm' den 0.6263 mm' ye çıkarak %50 oranında artmış ve kabuksuz yapı sebebiyle hibrit yapı olumsuz etkilenmiştir. Daha olumsuz ise gerilmenin dağılımında ve 2 kat artmasında görülmüştür.

Bu sonuçlar genel olarak yorumlandığında hafif bir tasarım elde etmek için öncelikle topoloji optimizasyonu yöntemi seçilebilir. Gözenekli bir yapıya ihtiyaç duyulursa mümkünse dış kabuğa sahip, birim hücrelerin boşluklarında ve kalınlıklarında gerilme verilerine dayalı optimizasyon yapılmış olması, sabit yüzlerin ve kuvvet uygulanan yüzlerin de kafes yapı ile birleştiği arayüzlerde malzemenin dolu yapıdan başlayarak boşluklu yapıya geçişini gradyan tamamlaması önerilir. Ayrıca periyodik dizilimin de mümkünse gövdeye bükülerek yönlendirilmesi ve uzamsal değişimlerin oluşturulması tavsiye edilmektedir.

Araştırmanın bulgularına göre belirli sınır koşullar altındaki ihtiyaçların karşılanabileceği bir tasarım oluştururken, öncelikle gereksiz malzeme kullanımından kaçınmak gerekmektedir. Gereksiz malzeme kullanımı milli servetin israfı anlamına gelmekle birlikte, mühendislik açıdan verimsiz ürünlerin ortaya çıkmasına sebep olurken, ek olarak maliyetleri arttırıcı bir unsur olup, bu fazladan malzemenin işlenmesi için ihtiyaç duyulan enerji, zaman, işçilik giderleri, makine-teçhizat ve takımların da ömürlerinde azalmaya sebep olmaktadır.

Geleneksel tasarımdan ideal geometriyi oluşturmak için yapılan eskiz çizimler ve denemeler mühendislerin iş yükünü arttırmakta, odağını daraltmakta ve o işe ayırdıkları zamanı uzatmakla birlikte, tasarımın parametrik olması için harcanan çaba da önemlidir. Bu sebeple tasarım optimizasyonu yaparken daha verimli yöntemler ve araçlardan yardım almak, mühendislerin işlerini daha hızlı, verimli ve kolay yapması için önemlidir.

Tasarım optimizasyonu yapmadan önce parçanın kullanım amacına uygun olan optimizasyon yöntemlerinden birinin seçilmesi gerekir. Hafifletme amacıyla topoloji optimizasyonu yapılabileceği gibi, gözenekli yapı oluşturmak istenen durumlarda kafes yapıların kolaylıkla oluşturulabildiği araçlar seçilebilir. Bu çalışmada Implicit

modellemenin avantajları gösterilmiş ve tasarım alternatiflerine ait sonuçlar kıyaslanarak yorumlanmıştır.

Geleneksel tasarım ile yüzeysel olarak tasarlanmış ve geometri hacminde sınır koşulların girilebileceği unsurları içeren kabaca bir yapı Implicit gövdeye dönüştürülerek, üzerinde hızlı bir şekilde topoloji optimizasyonu çalıştırılabilmekte ve kolayca kafes yapılar oluşturulabilmektedir. Topoloji optimizasyonu yaparken ortaya çıkacak geometrinin anlamlı olması için, maksimum yer değiştirme, gerilme veya hacim değerlerine belirli hedef veya sınırlar koyulabilmektedir. Programın arayüzünün bir avantajı olarak, topoloji optimizasyonu için girilmesi gereken ayarlar ve parametreler programa çok hızlı bir şekilde tanımlanabilir. Ayrıca belirli ayarların dışında (yani her iterasyonda yapısal analiz yapanların dışında) her iterasyon hızlıca tamamlanabildiği için topoloji optimizasyonu yapılmış sonuçlar hızlıca alınabilir.

Periyodik kafes yapıların yanı sıra yönlendirilmiş kafesler, belirlenen yüzeylere uyum sağlamış bir haritaya sahip kafes yapılar, boşluk veya kalınlık gibi birim hücre parametrelerini veri bazlı optimize edilebilen heterojen kafesler veya stokastik noktalardan türetilmiş voronoi kafesler gibi geleneksel tasarım ile oluşturulması çok zor veya imkansız geometriler, oldukça hızlı bir şekilde oluşturulabilmektedir.

Implicit gövdenin doğası gereği nihai olarak tasarımı tamamlanmış geometriler kolayca dilimlenebilir ve oldukça küçük boyutlarda imalat verisi oluşturulabilir. Programda ön yüklü olarak popüler eklemeli imalat makinelerinin imalat hacmi bilgisi, eklemeli imalata uygun topoloji optimizasyonu yaparken overhang açısının girilebilmesi, imalat için minimum yükseklik oryantasyonunu tespit edebilen fonksiyonların olması veya minimum destek yapıya sahip imalatı sağlayacak oryantasyonu tespit edebilmesi gibi oldukça önemli işlevlere sahiptir.

Ayrıca Implicit modellemede tamamlanmış olan iş akışlarının otomasyonu da yapılabilmektedir ve bu iş akışları tek bir blokta derlenebilmekte ve paylaşılabilmektedir. Bu sayede program, değerleri değiştirilerek etkileri gözlemlenmek istenen tüm parametrelerin birbirleri ile tüm kombinasyonlarını deneyerek, her deneme sonucunda çıktılar oluşturan ve bu çıktıları excel' e otomatik yazabilen python script' leri yardımıyla, normal bir mühendislik sürecinde belki haftalar sürebilecek işlemler bilgisayar tarafından otomatik olarak tamamlanabilir. Tüm bunlar, mühendislik otomasyonuna ve genel süreçlerine çok büyük avantajlar getirmektedir.

Programın bir dezavantajı olarak, mühendislik sürecine sıfırdan başlayabilmek için gerekli CAD verisi oluşturabilecek bir modüle sahip olmamasını gösterebiliriz. Bunun dışında implicit gövdeden mesh oluşturma'nın doğası gereği kullanılması gereken “dual contour” mesh tekniği ile oluşturulan mesh yapılar, hassas olmayan bir tolerans ve düşük voxel ile oluşturulmuşsa bazı bölgelerde veya keskin unsurlarda spesifik hatalara sebep olabilmektedir ancak bunların çözümü için optimum parametrelerin bulunmasında bazı incelik ve öneriler mevcut olup, bilgisayarın hesaplama gücünü ve süresini bir miktar zorlayarak aşılabilmektedir.

Çalışmanın bir kısıtı olarak ise mesh için singularity oluşan keskin unsurlarda mesh refinement yapılmaması gösterilebilir. Yapılan denemelerde mesh singularity giderildiğinde maksimum yer değiştirme değerlerinde görülen farkların ihmal edilebilecek kadar çok küçük olduğu ve çalışmadaki alternatif tasarımlarda yapılan kıyaslamayı ciddi oranda etkilemediği ve genel kanıyı değiştirmedeği görülmüştür.

Çalışmayı ilerletmek üzere bir öneri olarak tasarlanan parçaların imalatı yapılabilir ve nümerik analiz ile deneysel sonuçların uyumu tespit edilebilir. Ayrıca dinamik analiz yapılabilir ve yorulma analizi sonucu zayıf kesitler tespit edilerek, buradaki veriler implicit alana dönüştürülebilir ve data-driven tekniği ile yorulma ömrünü uzatacak tasarım geliştirmeleri yapılabilir.

KAYNAKÇA

- Alkhatib, S. E., Karrech, A., & Sercombe, T. B. (2023). Isotropic energy absorption of topology optimized lattice structure. *Thin-Walled Structures*, 182, 110220. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2022.110220>
- Cantaboni, F., Ginestra, P., Tocci, M., Colpani, A., Avanzini, A., Pola, A., & Ceretti, E. (2022). Modelling and FE simulation of 3D printed Co-Cr Lattice Structures for biomedical applications. *Procedia CIRP*, 110(C), 374-379. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.06.066>
- Chandrasekhar, A., & Suresh, K. (2021). TOuNN: Topology optimization using neural networks. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 63(3), 1135-1149. <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02748-4>
- Community Library. (2022, 28 Kasım). Retrieved from: <https://grabcad.com/library>
- da Silva, G. A., Beck, A. T., & Sigmund, O. (2022). Structural topology optimization with predetermined breaking points. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 400, 115610. <https://doi.org/10.1016/J.CMA.2022.115610>
- Dong, L. (2021). Mechanical responses of Ti-6Al-4V truss lattices having a combined simple-cubic and body-centered-cubic (SC-BCC) topology. *Aerospace Science and Technology*, 116, 106852. <https://doi.org/10.1016/J.AST.2021.106852>
- Efremov, S., Martínez, J., & Lefebvre, S. (2021). 3D Periodic Cellular Materials with Tailored Symmetry and Implicit Grading. *Computer-Aided Design*, 140, 103086. <https://doi.org/10.1016/J.CAD.2021.103086>
- Freitag, S., Peters, S., Edler, P., & Meschke, G. (2022). Reliability-based optimization of structural topologies using artificial neural networks. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 70, 103356. <https://doi.org/10.1016/J.PROBENGMECH.2022.103356>
- Guimarães, G., Rocha, A., Rego, R., Barreiros, L., Mascheroni, J., & Kretzer, A. (2021). Compressive Behavior of Gyroid Structures Manufactured Through SLM with Carburizing Steels: A Numerical and Experimental Study. *Procedia Structural Integrity*, 34, 26-31. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.004>
- Jafferson, J. M., & Sharma, H. (2021). Design of 3D printable airless tyres using NTopology. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1147-1160. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.058>

- Jankovics, D., & Barari, A. (2019). Customization of Automotive Structural Components using Additive Manufacturing and Topology Optimization. *IFAC-PapersOnLine*, 52(10), 212-217. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2019.10.066>
- Karakoç, F. (2016). *Katmanlı imalat ile hafif parça imal edebilmek için hücresel kafes yapıların geliştirilmesi* (Doktora Tezi). Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Kladovasilakis, N., Tsongas, K., & Tzetzis, D. (2023). Development of novel additive manufactured hybrid architected materials and investigation of their mechanical behavior. *Mechanics of Materials*, 176, 104525. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMAT.2022.104525>
- Kneissl, B., Warneck, M., Schneck, M., Schmitt, M., & Schlick, G. (2022). Optimisation of a hydraulic housing for a brake-by-wire system for electrical drives by additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 107, 641-646. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.039>
- Liu, J., Gaynor, A. T., Chen, S., Kang, Z., Suresh, K., Takezawa, A., Li, L., Kato, J., Tang, J., Wang, C. C. L., Cheng, L., Liang, X., & To, A. C. (2018). Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57(6), 2457-2483. <https://doi.org/10.1007/S00158-018-1994-3>
- Low, L., Ramadan, S., Coolens, C., & Naguib, H. E. (2018). 3D printing complex lattice structures for permeable liver phantom fabrication. *Bioprinting*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2018.e00025>
- Miki, T. (2023). Self-support topology optimization considering distortion for metal additive manufacturing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 404, 115821. <https://doi.org/10.1016/J.CMA.2022.115821>
- Nandakumar Harithsa, S., Anand Kumar, S., Nagesha, B. K., & Nataraj, J. R. (2022). Computational study on subsonic impact resistance of lattice structures in 3D printed thin Ti6Al4V parts. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.005>
- nTopology: Next Generation Engineering Software. (2022, 28 Kasım). Retrieved from: <https://ntopology.com/ntopology-software/>

Şekercioğlu, T. (2018). *Makine Tasarımı Temel İlkeler*. İstanbul: Birsen Yayınevi

Thore, C. J., Grundström, H. A., Torstenfelt, B., & Klarbring, A. (2019). Penalty regulation of overhang in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60(1), 59-67. <https://doi.org/10.1007/S00158-019-02194-X/FIGURES/13>

Wu, Y., Yvonnet, J., Li, P., & He, Z. C. (2022). Topology optimization for enhanced dynamic fracture resistance of structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 394, 114846. <https://doi.org/10.1016/J.CMA.2022.114846>

Yap, Y. L., Toh, W., Giam, A., Yong, F. R., Chan, K. I., Tay, J. W. S., Teong, S. S., Lin, R., & Ng, T. Y. (2022). Topology Optimization and 3D Printing of Micro-Drone: Numerical Design with Experimental Testing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 107771. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2022.107771>

DİZİN

A

Algoritma, 1, 4, 7, 19, 38

B

Body Centered Cubic, 3, 4

C

CAD, 5, 1, 2, 10, 16, 24, 25, 26, 27, 60, 63, 64

D

Data-Driven Design, 2

G

Gyroid, vi, vii, 2, 5, 31, 35, 41, 50, 51, 52, 55, 56, 57, 60, 61

H

Hafif Parça, vi, 1
Hibrit, vi, 2, 5, 6, 41, 54, 55, 60, 61

I

Implicit, 2, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 26, 27, 28, 34, 35, 52, 62, 64
Iterasyon, 1, 20, 28, 39, 40, 62

K

Kafes Yapı, vi, 1, 2, 5, 53, 54, 57, 60, 61
Kristalografi, 4

L

Lazer Toz Yatağı Füzyonu, 3, 6

M

Mekanik Davranış, 3
Mesh Singularity, 50, 51, 63

N

nTopology, 2, 3, vi, vii, viii, 3, 5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 19, 26, 30

O

Optimizasyon Hedefleri, 1

P

Periyodik Kafes, 1, 4, 62
Periyodik Yapılar, 1

R

Rijitlik Maksimizasyonu, 4

S

Simple Cubic, 3, 4
Solid Isotropic Material With Penalization, 3
Stokastik, 2, 16, 18, 62

T

Ti-6Al-4V, 4, 64
topoloji optimizasyonu, vi, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 19, 38, 53, 54, 60, 61, 62
Topoloji optimizasyonu, 1, 18, 20, 38, 40, 62

U

Üçlü Periyodik Minimal Yüzey, 5
Uyum Minimizasyonu, 4

V

Von Mises, 4, 33, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58

Y

Yapay Sinir Ağları, 5