



**ÖZGÜN AUXETİK KAFES YAPILARIN TASARIMI, ANALİZİ VE
EKLEMELİ İMALATI**

Nuriye Nur KAYA

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

Nuriye Nur KAYA

26/01/2024

ÖZGÜN AUXETİK KAFES YAPILARIN TASARIMI, ANALİZİ VE EKLEMELİ İMALATI

(Doktora Tezi)

Nuriye Nur KAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Metamalzemeler, doğada kolayca bulunmayan benzersiz mekanik, akustik, manyetik veya termal özellikler gösterecek şekilde tasarlanmış yapılardır. Metamalzemelerin bir çeşidi olan mekanik metamalzemelere auxetic yapı da denilmektedir. Auxetic özelliği, davranışı ya da malzemesi olarak da bilinen negatif poisson değeri, malzemenin direk yapısında olabileceği gibi malzemeye sonradan da kazandırılabilir. Auxetic yapılar negatif poisson oranına sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu tür yapılarda çekme yüküne maruz bırakıldığında yanal yönde genişleme, basma yüküne maruz kaldıklarında ise yanal yönde daralma gözlenmektedir. Bu yapılar geleneksel yapılara göre, daha fazla darbe direnci, yüksek enerji sönümleme kapasitesi gibi fırsatlar sunmaktadır. Bu çalışmada İslami motiflerden esinlenilerek 3 farklı auxetic kafes yapı tasarımı tasarlanmıştır. Kafes yapılara farklı geometrik iç kalınlıklar verilerek sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan üç farklı kafes yapının negatif poisson oranına sahip olup olmadığını belirlemek için yapılara çekme analizleri yapılmış ve bütün yapıların negatif poisson oranına sahip olduğu bulunmuştur. Yapılarda değişken parametre olarak geometrik iç kalınlık seçilmiştir. Değişen geometrik iç kalınlığın negatif poisson oranı değerlerinde de değişikliğe neden olduğu gözlenmiştir. Çekme analizi sonuçlarına göre, yapıların geometrik iç kalınlığı arttıkça toplam deformasyon ve von Mises gerilimleri düşmüştür. Auxetic yapılara uygulanan çekme ve eksplisit dinamik analiz sonuçları irdelenmiş ve en ideal sonuçlar sergileyen yapının üretimi yapılmıştır. Bu yapıya çekme ve basma testleri uygulanmıştır. Elde edilen deneysel verilerin analiz sonuçları ile karşılaştırılması yapılarak doğrulama sağlanmıştır. Numunelerin üretimleri SLM eklemeli imalat yöntemi ile AlSi10Mg malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışması gerçekleştirilen auxetic yapı, askeri zırhlı araçların maruz kaldığı mayın patlamalarında, personelin alt uzuv yaralanma limit değerlerini aşmayacak bir ayak pedi tasarımına entegre edilmiş ve eksplisit dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Negatif poisson oranı, auxetic yapılar, kafes yapılar

Sayfa Adedi : 128

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Cengiz ELDEM

DESIGN, ANALYSIS AND ADDITIVE MANUFACTURING OF NEW AUXETIC LATTICE STRUCTURES

(Ph. D. Thesis)

Nuriye Nur KAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

Metamaterials are structures designed to exhibit unique mechanical, acoustic, magnetic, or thermal properties not readily found in nature. Mechanical metamaterials, a type of metamaterial, are also called auxetic structures. The negative Poisson's value, also known as auxetic property, behaviour, or material, can be directly in the material structure or added to the material later. Auxetic structures are designed to have a negative Poisson ratio. In such structures, lateral expansion is observed when subjected to a tensile load, and lateral contraction is observed when subjected to a compressive load. These structures offer opportunities such as higher impact resistance and high energy absorption capacity compared to conventional structures. In this study, 3 different auxetic lattice structure designs were inspired by Islamic motifs. Finite element analyses were performed by giving different geometric internal thicknesses to the lattice structures. To determine whether the three different lattice structures have a negative Poisson's ratio, tensile analysis was performed on the structures, and it was found that all structures have a negative Poisson's ratio. Geometric internal thickness was selected as a variable parameter in the structures. It was observed that changing geometric internal thickness caused a change in the negative Poisson's ratio values. According to the tensile analysis results, the total deformation and von Mises stresses decreased as the geometric inner thickness of the structures increased. The results of the tensile and explicit dynamic analysis applied to the auxetic structures were analyzed, and the structure exhibiting the most ideal results was produced. Tensile and compression tests were applied to this structure. The experimental data obtained were compared with the analysis results, and validation was provided. The production of the specimens was carried out using AlSi10Mg material by the SLM additive manufacturing method. The experimental auxetic structure was integrated into the design of a foot pad that will not exceed the lower limb injury limit values of the personnel in mine explosions exposed to military armoured vehicles, and explicit dynamic analyses were performed.

Science Code : 91438

Key Words : Negative poisson's ratio, auxetic structure, lattice structure

Page Number : 128

Supervisor : Assist. Prof. Cengiz ELDEM

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında desteğini eksik etmeyen değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Cengiz ELDEM'e ve tez izleme komitesi toplantılarında fikirlerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. İsmail ŞAHİN ve Sayın Doç. Dr. İhsan TOKTAŞ hocalarıma teşekkür ederim.

Tezimin deneysel aşamalarında yardımlarını eksik etmeyen, Mina Uzay ve Havacılık Genel Müdürü Ümit SARI'ya, RAAGEN Malzeme Test Ekipmanları firması Genel Müdürü Rifat BEYTER'e, TEMPA Mühendislik Genel Müdürü Buğra BALABAN'a, DİĞİMODE Mühendislik Genel Müdürü Oğuz ALTAY'a ve kıymetli arkadaşım Bilal TOPRAK'a sonsuz şükranlarımı belirtmek isterim.

Ayrıca FDK-2022-8066 proje kodu ile çalışmamıza maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederim.

Hayatta iki kişinin nasıl tek kişi olabileceğini gösteren, her düştüğümde, her güldüğümde yanımda olan, hayatıma olduğundan çok daha fazla anlam katan ve akademik hayatım süresince en büyük sabrı ve fedakarlığı gösteren eşim Nihat KAYA'ya ve bu zorlu süreci bitirmemi sabırla bekleyen çocuklarım Bilge Kağan KAYA ve Oğuz Kağan KAYA'ya teşekkürü borç bilirim.

Bugünlere gelmemde çok büyük emeğe sahip olan, annem Hatice BOZTEPE'ye ve merhum babam Aydın BOZTEPE'ye, ayrıca burada adını sayamadığım birçok aileme ve arkadaşlarıma tezimin bitmesinde bana sağladıkları yardımları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. EKLEMELİ İMALAT	3
2.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	3
2.1.1. Stereolitografi (SLA) tekniği.....	4
2.1.2. Erimiş malzeme şekillendirme teknolojisi (FDM).....	5
2.1.3. Malzeme jeti (Material jetting).....	6
2.1.4. Yapıştırıcı ile katmanlı imalat (Binder jetting)	7
2.1.5. Seçici lazer ergitme (SLM)	7
2.1.6. Seçici lazer sinterleme (SLS)	8
2.1.7. Elektron ışınli ergitme (EBM).....	9
2.2. Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler	9
2.2.1. Polimerler	10
2.2.2. Metaller ve alaşımları.....	10
2.2.3. Biyomalzemeler	11
2.2.4. Kompozitler.....	11

	Sayfa
2.2.5. Seramikler	12
2.2.6. Yapı malzemeleri	12
2.2.7. Akıllı malzemeler	12
3. METAMALZEMELER	13
3.1. Metamalzeme Türleri	13
3.1.1. Akustik metamalzemeler	13
3.1.2. Elektromanyetik metamalzemeler	13
3.1.3. Termal metamalzemeler	14
3.1.4. Optik metamalzemeler	15
3.1.5. Mekanik metamalzemeler	15
3.2. Auxetic Yapılar	18
3.2.1. Auxetic mikro gözenekli polimerler	19
3.1.1. Auxetic kompozitler	20
3.1.1. Auxetic geometriler	20
4. LİTERATÜR TARAMASI	25
4.1. Endüstriyel Uygulamalarda Auxetic Yapılar	34
4.1.1. Otomotiv sektörü	35
4.1.2. Tekstil endüstrisi	37
4.1.3. Spor malzemeleri ve koruyucu ekipmanlar	37
4.1.4. Biyomedikal ve sağlık endüstrisi	38
4.1.5. Havacılık endüstrisi	38
4.1.6. Savunma sektöründe auxetic uygulamalar	39
5. MATERYAL VE METOT	41
5.1. Tasarımların Oluşturulması	41

	Sayfa
5.1.1. Altı yıldız mozaik auxetic yapı tasarımı.....	43
5.1.2. Yaprak auxetic yapı tasarımı.....	47
5.1.3. Makili auxetic yapı tasarımı	50
5.2. Auxetic Yapı Tasarımlarının Yarı-Statik Analizleri	54
5.2.1. Auxetic yapı tasarımları için eleman ağı (mesh) yakınsaması.....	55
5.2.2. Auxetic yapı tasarımında yarı-statik analizler için sınır koşulları	56
5.2.3. Auxetic yapı tasarımında poisson oranı hesabı.....	58
5.3. Auxetic Yapı Tasarımında Eksplisit Dinamik Analizler	60
5.4. Auxetic Yapının Eklemeli İmalatı.....	60
5.5. Auxetic Yapının Deneysel Çalışmasında Kullanılan Ekipmanlar	61
6. TASARIM DOĞRULAMA ve ANALİZ ÇALIŞMALARI.....	65
6.1. Auxetic Yapıların Poisson Oranı Hesabı	65
6.1.1. Altı yıldız mozaik auxetic yapı için poisson oranı hesaplaması	65
6.1.2. Yaprak auxetic yapı için poisson oranı hesaplaması	67
6.1.3. Makili auxetic yapı için poisson oranı hesaplaması	69
6.2. Auxetic Yapılarda von Mises Gerilimi ve Toplam Deformasyon	71
7. AUXETİK YAPI TASARIMLARININ EKSPLİSİT DİNAMİK ANALİZLERİ	77
7.1. Auxetic Yapılarda Eksplisit Dinamik Analiz Sonuçları	84
7.1.1. Altı yıldız mozaik auxetic yapı tasarımının eksplisit dinamik analizi sonuçları	84
7.1.2. Yaprak auxetic yapı tasarımının eksplisit dinamik analiz sonuçları.....	85
7.1.3. Makili auxetic yapı tasarımının eksplisit dinamik analiz sonuçlar.....	87

Sayfa

8. DENEYSEL ÇALIŞMA	91
8.1. Altı Yıldız Mozaik Auxetic Yapı Tasarımının Analiz ile Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması	94
9. ALTI YILDIZ MOZAİK AUXETİC YAPI İLE TASARLANAN AYAK PEDİ (ÖRNEK VAKA ÇALIŞMASI)	99
9.1. Anti-Tank Mayın Patlamasının Etkileri	100
9.1.1. Yerel etkiler	100
9.1.2. Küresel etkiler	100
9.1.3. Aşağı düşme etkileri	100
9.1.4. Patlama sonrası etkiler	101
9.2. Mayın Patlamasının Araç İçindeki Personele Etkisi	101
9.3. Auxetic Yapı ile Tasarlanmış Ayak Pedi ve Analizi	102
9.4. Ayak Pedinin Eksplisit Dinamik Analiz Sonuçları	105
10. SONUÇ VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	113
EKLER	123
EK-1. ASTM E8 Standardı	124
EK-2. ASTM C364 Standardı	125
ÖZGEÇMİŞ	127

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Geleneksel malzemelerin poisson oranları	17
Çizelge 5.1. 6x4 ve 6x3 matrisli kafes yapılar için x, y ve geometrik iç kalınlık ölçüleri	46
Çizelge 5.2. 3x3 ve 2x3 matrisli kafes yapılar için x, y ve geometrik iç kalınlık ölçüleri	49
Çizelge 5.3. 4x4 ve 2x4 matrisli kafes yapılar için x, y ve geometrik iç kalınlık ölçüleri	54
Çizelge 5.4. AlSi10Mg için mekanik özellikler	55
Çizelge 5.5. Mesh yakınsaması ile von Mises geriliminin değişimi.....	56
Çizelge 6.1. Altı yıldız mozaik auxetic yapıda poisson oranı değişimi ile von Mises gerilmesi ve toplam deformasyon sonuçları	66
Çizelge 6.2. Yaprak auxetic yapıda poisson oranı değişimi ile von Mises gerilmesi ve toplam deformasyon sonuçları	68
Çizelge 6.3. Makili auxetic yapıda poisson oranı değişimi ile von Mises gerilmesi ve toplam deformasyon sonuçları	70
Çizelge 8.1. Profil projeksiyon ile üretim sonrası ölçüm sonuçları	93
Çizelge 8.2. Profil projeksiyon ile deney sonrası numunelerin ölçüm sonuçları.....	94
Çizelge 9.1. AEP-55 vol2 standardına göre yaralanma limit değerleri.....	106

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Lazer polimerizasyon Eİ süreci gösterimi	4
Şekil 2.2. SLA teknolojisi şematik gösterimi	5
Şekil 2.3. FDM teknolojisinin şematik gösterimi	6
Şekil 2.4. Malzeme jeti şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.5. Binder jetting şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.6. SLM şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.7. SLS üretim yönteminin şematik gösterimi	8
Şekil 2.8. EBM üretim tekniği şematik gösterimi.....	9
Şekil 3.1. Yapay ayrık halkalı rezenatörler.....	14
Şekil 3.2. (A-B) Pozitif poisson oranına (C-D) negatif poisson oranına sahip malzemelerin çekme ve basma kuvveti altındaki şekil değiştirmeleri	15
Şekil 3.3. Farklı poisson oranlarına sahip yapı çeşitleri (a) pozitif (b) sıfır (c) negatif..	18
Şekil 3.4. Auxetic malzemelerin sınıflandırılması.....	19
Şekil 3.5. Şekillerine göre auxetic yapıların genel sınıflandırılması	20
Şekil 3.6. Re-entrant auxetic yapılar.....	21
Şekil 3.7. Ok ucu re-entrant yapısı.....	21
Şekil 3.8. Yıldız geometrili auxetic yapılar	22
Şekil 3.9. Kiral yapıli auxetic yapılar	22
Şekil 3.10. Hareketli auxetic yapılar.....	23
Şekil 4.1. Delikli auxetic yapının mekanik özelliklerinin incelenmesi	25
Şekil 4.2. S şeklindeki auxetic yapı ile re-entrant yapısının sonlu elemanlar ve deneysel karşılaştırması.....	26
Şekil 4.3. Re-entrant yapısı (a) 0 mm radyüs yarıçapına sahip re-entrant birim hücresi (b) 0,5 mm radyüs yarıçapı (c) 1 mm radyüs yarıçapı.....	26

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Re-entrant birim hücresi baz alınarak yeni tasarlanan bir auxetic yapı.....	27
Şekil 4.5. Dikey dikmelerle oluşturulan re-entrant geometrik yapısı (a) dikey dikme birleştirilmiş yardımcı topoloji (b) birim hücrenin geometrik parametreleri (c) iki dikey dikme boyutları	28
Şekil 4.6. (a) Tasarlanan yeni birim hücre (b) yeni birim hücrenin latis yapısı (c) çeyrek yapının düğüm noktaları.....	28
Şekil 4.7. Özgün auxetic yapının geometrik iç kalınlık ve matris yapısı ile poisson oranı ilişkisi	29
Şekil 4.8. (a) Tetrakiral yapısının birim hücresi (b) hexakiral yapısının birim hücresi (c) tetrakiral yapısının baskı için hazırlanmış numune görüntüsü (d) hexakiral yapısının baskı için hazırlanmış numune görüntüsü.....	29
Şekil 4.9. (a-b) Re-entrant hücre yapısı ile destek kolonları eklenmiş yapı (c-d) çift ok başlı auxetic yapı ile destek kolonları eklenmiş yapı	30
Şekil 4.10. (a-b) Re-entrant yapısına eklenen sinüzoidal şekiller (c-d) sinüzoidal yapısına eklenen dikey destekler	31
Şekil 4.11. (a) Kiral çekirdek hücre ve re-entrant çekirdek hücrenin açılma mekanizmaları (b) girintili çekirdek hücre (üstte) ve yeni periyodik kiral metamalzemedede (altta) iki tip hücre ile yeni bir kiral hücre üretme	33
Şekil 4.12. (a) S şeklindeki birim hücre yapısı (b) x yönünde çekme kuvveti için üretilen 316L numune (c) y yönünde çekme kuvveti için üretilen 316L numune.....	34
Şekil 4.13. Endüstriyel uygulamalarda auxetic yapılar	34
Şekil 4.14. Auxetic yapılı çarpışma kutusu	35
Şekil 4.15. Tetra kiral ve re-entrant çarpışma kutuları	36
Şekil 4.16. Geleneksel ve auxetic yapılı emniyet kemeri	37
Şekil 4.17. Auxetic kalp damar stenti	38
Şekil 4.18. Auxetic kanat profilinde morphing panel	39
Şekil 4.19. Zırhlı araçlara yönelik hazırlanan auxetic sandviç ve koruyucu sistem	40
Şekil 5.1. Auxetic davranış sergileyecek yapıları belirlemek için deneme çalışmalar ...	42
Şekil 5.2. Auxetic yapı tanımlaması	42

Şekil	Sayfa
Şekil 5.3. Altıgen çizim tekniği ile birim hücre tasarımı	43
Şekil 5.4. Altı yıldız mozaik auxetic yapıda birim hücrenin matematiksel modeli	43
Şekil 5.5. (a) Birim hücre (b) birim hücreye ofset yöntemi ile kalınlık verilmesi (c) kalınlık verilen birim hücrenin çoğaltılmış görüntüsü (d) birim hücrenin üç boyutlu görüntüsü	44
Şekil 5.6. Altı yıldız mozaik auxetic kafes yapı numaralandırması	45
Şekil 5.7. Altı yıldız mozaik auxetic kafes yapılarının 3B görselleri	46
Şekil 5.8. Yaprak auxetic yapının ızgara tekniği ile birim hücre çizimi ve kafes yapı oluşumu	47
Şekil 5.9. Yaprak auxetic yapının matematiksel modeli.....	47
Şekil 5.10. Yaprak auxetic yapı için aynalama ve çoğaltma tekniği ile matris modelleme.....	48
Şekil 5.11. Yaprak auxetic yapısında matris kafes yapıları	48
Şekil 5.12. Yaprak auxetic yapı kafes yapılarının 3B görselleri.....	50
Şekil 5.13. Makili auxetic yapının ızgara tekniği ile birim hücre çizimi ve kafes yapı oluşumu	51
Şekil 5.14. Makili auxetic yapının matematiksel modeli.....	51
Şekil 5.15. Makili auxetic yapının matrisli olarak modelleme süreci.....	52
Şekil 5.16. Makili auxetic yapının matris şeklinin oluşturulması.....	52
Şekil 5.17. Makili auxetic yapı kafes yapılarının 3B görselleri.....	53
Şekil 5.18. 6 yıldız mozaik auxetic yapının ayarlanabilir meshli kafes yapı görünümü (a) %20 ayarlamalı mesh modeli (b) %5 ayarlamalı mesh modeli (c) %0 ayarlamalı mesh modeli	55
Şekil 5.19. Auxetic yapıların sınır koşulları (a) altı yıldız mozaik auxetic yapının sınır koşulları (b) yaprak auxetic yapının sınır koşulları (c) makili auxetic yapının sınır koşulları.....	57
Şekil 5.20. ΔL_x formülünün şematik gösterimi	58

Şekil	Sayfa
Şekil 5.21. Auxetic yapıların X ve Y yönündeki şekil değişimleri (a) altı yıldız mozaik auxetic yapıda X yönündeki şekil değişimi (b) altı yıldız mozaik auxetic yapıda Y yönündeki şekil değişimi c) yaprak auxetic yapıda X yönündeki şekil değişimi (d) yaprak auxetic yapıda Y yönündeki şekil değişimi e) makili auxetic yapıda X yönündeki şekil değişimi, (f) makili auxetic yapıda Y yönündeki şekil gösterimi.....	59
Şekil 5.22. Auxetic yapıların toplam deformasyon ve von Mises gerilimleri (a) altı yıldız mozaik auxetic yapıda toplam deformasyon (b) altı yıldız mozaik auxetic yapıda von Mises gerilimi (c) yaprak auxetic yapıda toplam deformasyon (d) yaprak auxetic yapıda von Mises gerilimi (e) makili auxetic yapıda toplam deformasyon (f) makili auxetic yapıda von Mises gerilimi	60
Şekil 5.23. ASTM C364 standardına uygun fıkstür tasarımı.....	62
Şekil 6.1. Altı yıldız mozaik auxetic yapıda geometrik iç kalınlık ile poisson oranı ilişkisi	67
Şekil 6.2. Yaprak auxetic yapıda geometrik iç kalınlık ile poisson oranı ilişkisi.....	69
Şekil 6.3. Makili auxetic yapı için geometrik iç kalınlık ile poisson oranı ilişkisi.....	71
Şekil 6.4. Altı yıldız mozaik auxetic yapı için geometrik iç kalınlık ile toplam deformasyon ilişkisi	72
Şekil 6.5. Altı yıldız mozaik auxetic yapı için geometrik iç kalınlık ile von Mises gerilimi ilişkisi	73
Şekil 6.6. Yaprak auxetic yapı için geometrik iç kalınlık ile toplam deformasyon ilişkisi.....	73
Şekil 6.7. Makili auxetic yapı için geometrik iç kalınlık ile toplam deformasyon ilişkisi.....	74
Şekil 6.8. Makili auxetic yapı için geometrik iç kalınlık ile von Mises gerilimi ilişkisi.....	75
Şekil 7.1. Hypermesh için hazırlanan mesh modellemesi	77
Şekil 7.2. LS-Prepost ile hazırlanan modelin açıklanması	78
Şekil 7.3. MAT20RIGID malzeme kartı.....	79
Şekil 7.4. MAT98_Simplified_Johnson_Cook malzeme kartı	80
Şekil 7.5. Shell kartlarının oluşturulması.....	81

Şekil	Sayfa
Şekil 7.6. Hourglass kartının oluşturulması.....	81
Şekil 7.7. Rigid malzeme için solid kartın atanması.....	82
Şekil 7.8. Parçaların tanımlanması.....	82
Şekil 7.9. Parça için kuvvet tanımlanması	83
Şekil 7.10. Hareketli üst plaka için BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID kartı oluşturulması	83
Şekil 7.11. Altı yıldız mozaik auxetic yapının 0,40 mm ile 1,25 mm geometrik iç kalınlıkta eksplisit görüntüleri	84
Şekil 7.12. Altı yıldız mozaik auxetic yapıda kuvvet – deplasman grafiği	85
Şekil 7.13. Yaprak auxetic yapının eksplisit dinamik analiz görüntüleri	86
Şekil 7.14. Yaprak auxetic yapıda kuvvet – deplasman grafiği.....	86
Şekil 7.15. Yaprak auxetic yapının hapsettiği enerji	87
Şekil 7.16. Makili auxetic yapının eksplisit dinamik analiz görüntüleri	88
Şekil 7.17. Makili auxetic yapıda kuvvet – deplasman grafiği.....	89
Şekil 7.18. Makili auxetic yapının hapsettiği enerji	89
Şekil 8.1. Eklemeli imalat ile üretilen yapıların inşa düzlemi	91
Şekil 8.2. İşaretlenen numunelerin çekme deneyi sonrası IMAGE J ile ölçümleri	93
Şekil 8.3. Altı yıldız mozaik auxetic yapının analiz ve deneysel sonuçları ile poisson oranı karşılaştırması	95
Şekil 8.4. Altı yıldız mozaik auxetic yapının gerilim – gerinim diyagramı	97
Şekil 8.5. Altı yıldız mozaik auxetic yapının sonlu elemanlar ve deneysel sonuçlara göre hapsettiği enerji	97
Şekil 9.1. Yerel etkiler	100
Şekil 9.2. Ayak pedinin 3B tasarımı	103
Şekil 9.3. Ayak pedinin eksplisit dinamik analizi.....	104
Şekil 9.4. Yerel etkilerin farklı vücut bölgelerine etkisi.....	105

Şekil	Sayfa
Şekil 9.5. Ayak pedinin kuvvet – zaman grafiği.....	106
Şekil 9.6. Ayak pedinin kuvvet – deplasman grafiği	107
Şekil 9.7. Ayak pedinin enerji absorbe grafiği	108
Şekil 9.8. Zırhlı bir araçta patlama simülasyonu ve deneysel çalışma	109



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Hücre tasarım yapıları (a) balpeteği (b) re-entrant auxetic yapı (c) auxetic destek (d) auxetic-petek1 (AH-V1) (e) auxetic-petek2 (AH-V2).....	31
Resim 4.2. Numunelerdeki absorbe görüntüleri	32
Resim 5.1. Profil projeksiyon ile numune ölçümleri	61
Resim 5.2. Numuneler için hazırlanan deney düzeneği	62
Resim 5.3. İmalatı gerçekleştirilmiş fıkstür	63
Resim 8.1. Altı yıldız mozaik auxetic yapının eklemeli imalat yönetmi ile 3B baskısı	92
Resim 8.2. Numunelerin deney sonrası profil projeksiyon ile ölçülmesi	94
Resim 8.3. Altı yıldız mozaik auxetic yapının sonlu elemanlar ile deneysel görüntüleri (a) 0,40 mm kalınlıkta (b) 1,25 mm kalınlıkta	96
Resim 9.1. Patlama anında ayak ve bacakların hareketi	102

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

K	Bulk modülü
dk	Dakika
G	Kayma modülü
ϵ	Gerinim
J	Joule (enerji birimi)
kN	Kilo Newton
μ	Manyetik geçirgenlik
MPa	Mega pascal
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
nm	Nanometre
N	Newton
ν	Poisson oranı
HRC	Rockwell sertlik derecesi
°C	Santigrat derece
ΔL	Toplam şekil değişimi
E	Young modülü

Kısaltmalar

Açıklamalar

2B	2 Boyut
3B	3 Boyut
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
ASA	Akrilonitril Stiren Akrilat
AT	Anti Tank

Kısaltmalar**Açıklamalar**

BJ	Bağlayıcı Püskürtme
BT	Bilgisayarlı Tomografi
DMLS	Direkt Metal Lazer Sinterleme
EBM	Electron Beam Melting (Elektron Işınlı Ergitme)
FDM	Fused Deposition Modeling (Erimiş Malzeme Şekillendirme)
HIPS	High Impact Polystyrene (Yüksek Etkili Polistiren)
MABS	Metakrilat Akrilonitril Bütodienestiren
MRI	Manyetik Rezonans Görüntüleme
NPR	Negative Poisson Ratio (Negatif poisson oranı)
PBF	Toz Yatak Füzyon Birleştirme
PC	Polikarbonat
PET	Polietilen Tereftolat
PETG	Polietilen Tereftolat Glikol
PEEK	Polieter Eter Keton
PLA	Polilaktik Asit
SLA	Stereolitografi
SLM	Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme)
SLS	Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)
SRR	Split Ring Resenator (Ayrık Halkalı Rezenatörler)
TPC	Termoplastik Polyester
UV	Ultraviyole

1. GİRİŞ

Modern eklemeli imalat yöntemi 20.yy sonlarından itibaren ortaya çıkmış ve devam eden yıllarda çok sayıda gelişme göstermiştir. Çok çeşitli karmaşık 3B geometri modellerini verimli ve ekonomik bir şekilde nihai ürüne dönüştürme yeteneği, eklemeli imalatın çok sayıda endüstriyel uygulamada yer almasını sağlamıştır.

Mühendislik malzemelerin temel özelliklerinden biri olan poisson oranı, mühendislik alanında birçok uygulamada önem teşkil etmektedir. Çoğu mühendislik malzemeleri pozitif poisson oranına sahiptirler. Bu tür malzemeler çekme kuvveti uygulandığında yanıl darılma, basma kuvveti uygulandığında ise yanıl genişleme özelliği göstermektedir. Mekanik metamlzemeler diğler bir adıyla auxetic malzemeler; pozitif poisson oranına sahip malzemelere göre tam tersi bir özellik göstermektedir. Bu malzemeler çekme kuvvetine maruz kaldıklarında yanıl olarak genişlerken, basma kuvveti uygulandığında ise yanıl darılma davranışı sergiledikleri için negatif poisson oranına sahip olmaktadırlar. Bu özelliğe sahip malzemelere mekanik metamlzemeler ya da başka bir ifade ile auxetic malzemeler denir.

Auxetic yapılar ince kenarlardan oluşan içi boş şekilleri temsil eder. Geometri boyunca sürekli olarak tekrarlanan morfolojiye sahip, içi boş ve ince kenarlı bir geometri (re-enrant, kiral, okucu vb.), auxetic geometrik yapılarının birim hücresi olarak adlandırılır. Auxetic yapıların işlenmesi zordur, karmaşık geometrilere sahiptir ve birim hücreleri üretilemeyecek kadar küçüktür. Bu nedenle auxetic yapıların üretilmesinde geleneksel imalat yöntemleri kullanılamamaktadır. Bu nedenle auxetic yapılarda üretimlerinde geleneksel olmayan imalat yöntemleri veya eklemeli imalat yöntemleri tercih edilmektedir. Ayrıca auxetic yapılar hafif olma özelliklerinden ötürü geleneksel malzemelere göre daha gelişmiş mekanik özelliklere sahip olacaktır. Ayrıca negatif poisson oranı malzemelerde, geleneksel yapılara göre, daha fazla darbe direnci, yüksek enerji sönümleme kapasitesi gibi fırsatlar sunmaktadır. Bu nedenle savunma, havacılık, otomotiv, medikal, tekstil gibi çeşitli alanlarda tercih nedeni olmuştur. Örneğin metallerin, auxetic kompozitlere göre çok daha ağır olması ve auxetic kompozitlerin mukavemet/ağırlık oranının metallere göre daha yüksek olması nedeniyle havacılık sektöründe daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca türbin

motorlarının termal koruma ve gürültü engelleme uygulamaları gibi havacılık uygulamalarında da auxetic malzemeler kullanılabilmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı negatif poisson oranına sahip yapılar tasarlamaktır. İslami geometrik desenlerden yola çıkarak ve belirli çizim teknikleri kullanarak negatif poisson oranına sahip yapılar tasarlanmıştır. Yapılara sonlu elemanlar analizleri uygulanmıştır. Tasarımlardan altı yıldız mozaik auxetic yapı olarak adlandırılan yapının deneysel olarak incelenebilmesi için 3B baskı teknolojisi ile SLM eklemeli imalat yöntemi kullanılarak AlSi10Mg kalite malzemeden numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelere çekme ve basma deneyleri yapılarak yapının sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın hedeflerinden bir tanesi de; en yüksek enerji sönümleme özelliği gösteren yapının endüstriyel bir tasarıma entegre edilerek, askeri zırhlı araçların maruz kaldığı mayın patlamalarında, araç içindeki personelin alt uzuvlarında meydana gelen yaralanmaları en aza indirmesini sağlamak olacaktır. Günümüzde auxetic yapılar ile yeni yeni çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Literatürde bulunan yapılar üzerinden farklı çalışmalar bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada tasarımın özgün bir yapı olması ve bu özgün yapının ülkemizde henüz ticarileşmemiş bir ekipmana entegre edilerek analiz edilecek olması, ileride yapılacak çalışmalara ışık tutacaktır.

2. EKLEMELİ İMALAT

Eklemeli imalatta üretim, geleneksel talaşlı imalat yönteminin aksine, 3B model verilerinden faydalanarak katman katman birleştirme tekniği ile gerçekleştirilmektedir [1]. Eklemeli imalatta plastik ve metal olmak üzere çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Eklemeli imalatta karmaşık geometriye sahip yapılar için üretim kolaylığı sağlamaktadır. Bu nedenle eklemeli imalat tasarım özgürlüğü sağlamaktadır. Ekoloji dostu olması ve tasarım özgürlüğünden ötürü otomotiv, sağlık, medikal, uzay ve havacılık, endüstriyel ürünler gibi sektörlerde tercih sebebi olmaktadır. Eklemeli imalat yöntemleri ile prototipleme aşaması geleneksel imalat yöntemlerine göre daha hızlı gerçekleşmektedir [2]. İnsansız hava araçları, yakıt nozulları, gaz tribünleri, mekanik dişliler, türbin kanatları, biyomedikal implantlar, diş protezleri, elektronik sensörler, kalp ve damar stentleri eklemeli imalat ile üretilen ürünlere örnek verilebilir [3].

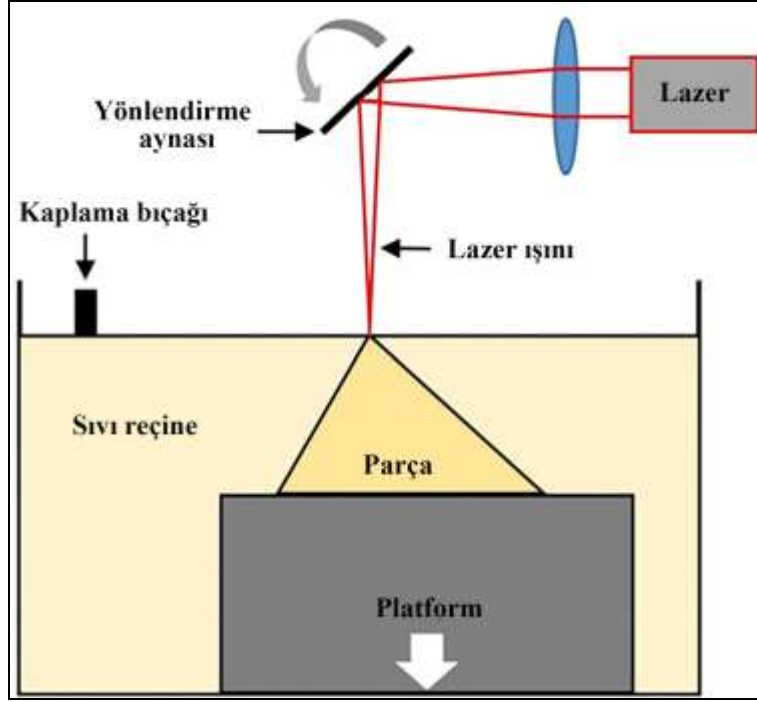
Eklemeli imalat yönteminde birçok avantajları bulunurken aynı zamanda birçok dezavantajı da bulunmaktadır. Bunlar; kullanılan malzemelerin maliyetinin fazla olması, eklemeli imalat tezgahlarının yatırım maliyetinin yüksek olması, seri imalat aşamasında yavaş olması gibi dezavantajları bulunmaktadır [4].

2.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Günümüzde çok sayıda eklemeli imalat prosedürü bulunmaktadır. Bunlar parça oluşturmak için katmanların biriktirilmesi şekli, çalışma prensibi ve kullanılan malzemelere göre farklılık göstermektedir. Seçici lazer eritme (SLM), seçici lazer sinterleme (SLS) ve eriyik biriktirme modelleme (FDM) gibi yöntemlerde katmanları oluşturmak için erimiş ya da yumuşak kıvamlı malzeme tekniği kullanılmaktadır. Stereolitografi (SLA) ise sıvı malzemeleri sertleştirerek üretim gerçekleştirilmektedir. Her yöntemin kendine özgü artıları ve eksileri bulunmaktadır. Bu nedenle yöntem seçerken, üretim hızı, üretimi yapılan numunenin maliyeti gibi seçenekler göz önünde bulundurulmalıdır [3].

Lazer esaslı yöntemlerde, malzemeyi eritmek, katılaştırmak veya yumuşatmak için orta ile düşük güçte bir lazer kullanılır. Lazer temelli süreçler faz değişim mekanizmalarına bağlı olarak lazer eritme ve lazer polimerizasyon olmak üzere iki alt kategoriye ayrılmıştır.

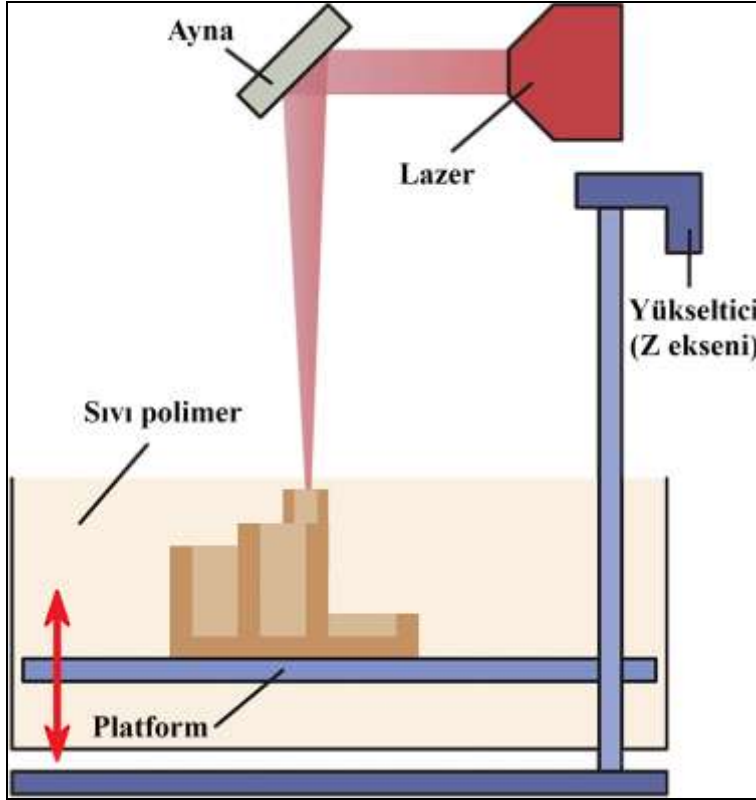
Lazer eritme proseslerinde malzeme toz halinde istenilen noktalamla lazer ile eritilerek püskürtme yapılır. Lazer polimerizasyonunda malzeme genellikle ışığa duyarlı bir reçinedir ve düşük güçlü bir lazer kaynağı tarafından sağlanan UV radyasyonuna maruz kalarak sertleştirilmektedir [5]. Lazer polimerizasyonun Eİ süreci Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Lazer polimerizasyon Eİ süreci gösterimi [5]

2.1.1. Stereolitografi (SLA) tekniği

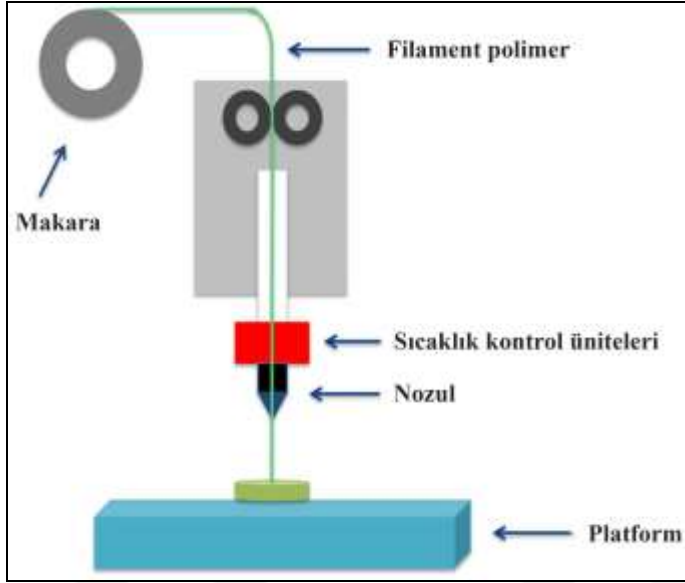
SLA teknolojisi, oda sıcaklığında sıvı şekilde olan fotopolimer reçine tabakasının noktasal bir morötesi lazer ışını vasıtasıyla belirli bölgelerin kürleştirilmesi prensibine dayanmaktadır [6]. Reçine tankı kürlenmiş malzemeyi serbest bırakmak için soyulur ve ardından yapı platformu 25 ila 200 mikron aralığında seçilen katman yüksekliğine göre yükselir [7]. Şekil 2.2’de şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 2.2. SLA teknolojisi şematik gösterimi [6]

2.1.2. Erimiş malzeme şekillendirme teknolojisi (FDM)

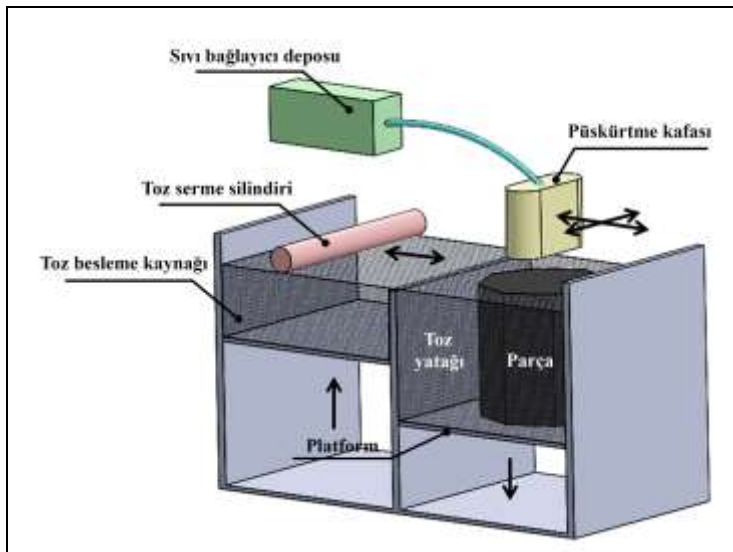
Erimiş malzeme şekillendirme 3 boyutlu yazıcı olarak isimlendirilen üretim yöntemidir. Genellikle plastik ve polimer malzemeler kullanılmaktadır. Filament şeklinde bulunan malzemelerin eritilerek, uygulamayı yapan hareketli bir kafaya iletilerek, katmanlar halinde üst üste yapıştırılarak şekil oluşturulmaktadır. Ortam sıcaklığında şekil sertleşmektedir. Genellikle bu yöntem hızlı prototipleme ve az sayıda seri imalat durumlarında kullanılmaktadır [8]. Şekil 2.3’de FDM teknolojisinin şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 2.3. FDM teknolojinin şematik gösterimi [9]

2.1.3. Malzeme jeti (Material jetting)

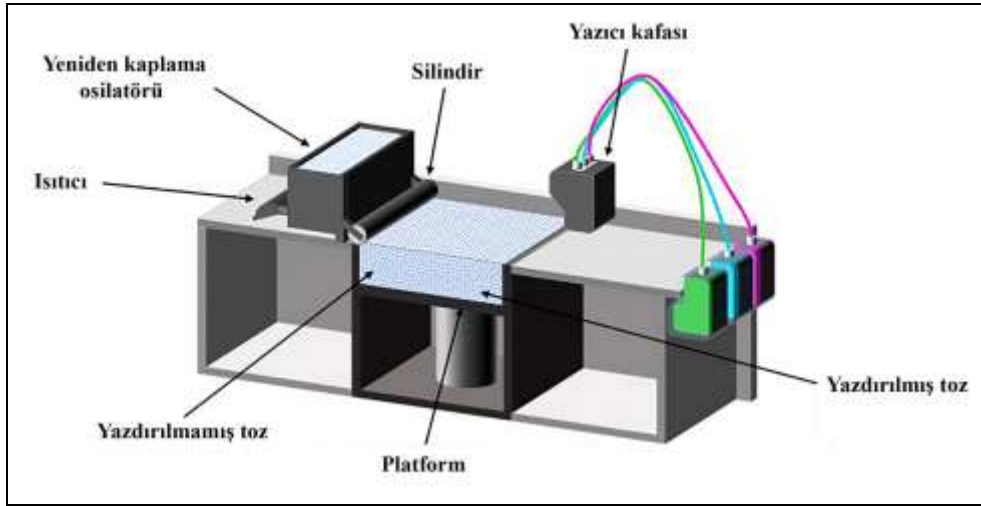
Malzeme jeti yönteminde sıvı veya eriyik balmumu türü malzemeyi, mürekkepli yazıcı benzeri hareketli kafa tarafından püskürtülerek ve kürlenerek şekil oluşturulur. Bu yöntemin en büyük avantajı hassas ve parlak yüzeylerin kolaylıkla elde edilmesi iken dezavantaj ise kırılgan ve zaman alıcı bir üretim yöntemi olmasıdır [10]. Şekil 2.4’de malzeme jetinin şematik gösterimi yapılmıştır.



Şekil 2.4. Malzeme jeti şematik gösterimi [11]

2.1.4. Yapıştırıcı ile katmanlı imalat (Binder jetting)

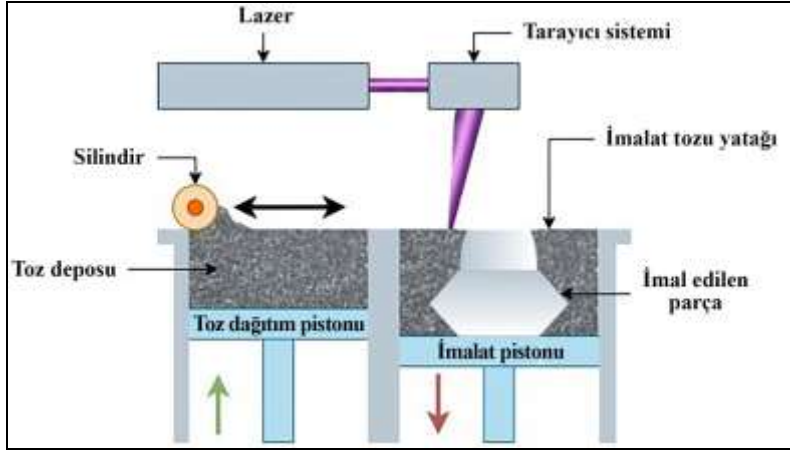
Yapıştırıcı katmanlı imalat yönteminde toz materyal üzerine, yapıştırıcı uygulanır ve üzerine tekrar yeni materyal serilerek sertleştirilir. Genelde kalıp imalatlarında tercih edilmektedir. Ayrıca bu yöntemde destek yapıları olmadan üretim gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.5’de binder jetting şematik gösterimi yapılmıştır.



Şekil 2.5. Binder jetting şematik gösterimi [12]

2.1.5. Seçici lazer ergitme (SLM)

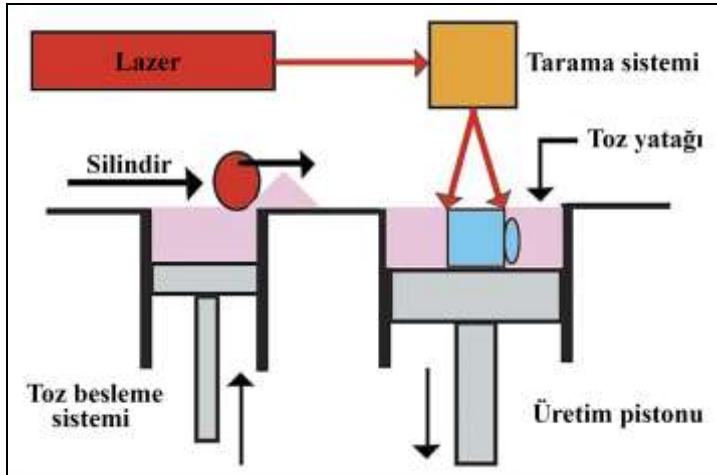
SLM yönteminde numune oluşturmak için metal tozunu tamamen eriten ısı kaynağı lazer kullanılmaktadır. Toz halinde bulunan malzemenin üzerine gönderilen lazer ışını tozları eritir ve geometrinin üzerinde eriyik oluşmaktadır. Bir katman oluşturulduktan sonra ürünün altındaki piston aşağıya doğru iner. Bu şekilde döngü parçanın tamamı oluşana kadar katman katman devam etmektedir. Bu işlem genellikle argon veya nitrojenli ortamlarda gerçekleştirilmektedir [13]. SLM yöntemi ile iyi mekanik özellikler elde edilmektedir [5]. Şekil 2.6’da SLM yönteminin şematik gösterimi yapılmıştır.



Şekil 2.6. SLM şematik gösterimi [14]

2.1.6. Seçici lazer sinterleme (SLS)

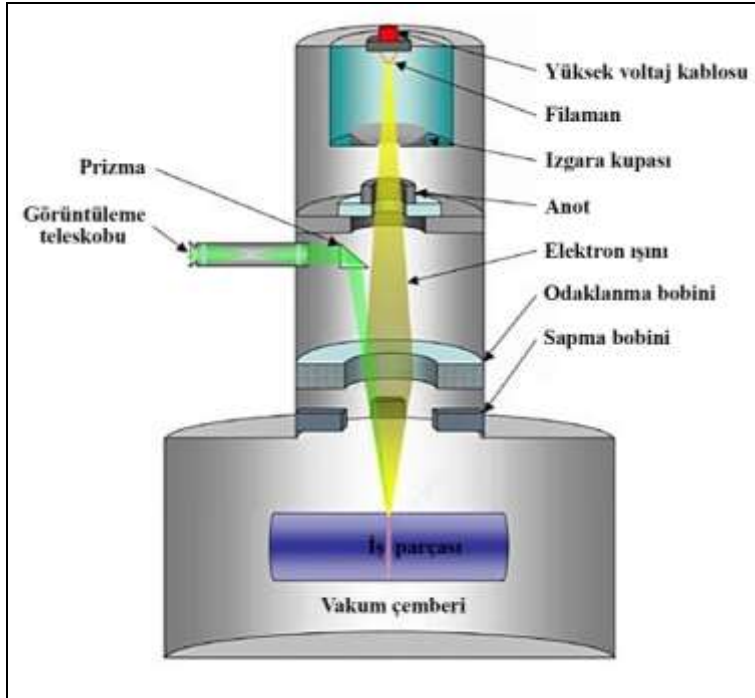
Seçici lazer sinterleme diğer yöntemlerde olduğu gibi katmanlı üretim teknolojisidir. Toz haznesi ve yapı alanı, polimerin erime sıcaklığının hemen altına kadar ısıtılır ve ardından toz hazneye yayılır. Yüksek güçlü lazer ile toz yatağının yüzeyindeki kesiti tarar ve polimer tozu parçacıkları sinterlenmiş yani kaynaşmış olur. Bir katman oluştuğunda yapı platformu aşağıya doğru hareket eder ve toz tekrar hazneye yayılır. Parça üretilene kadar bu işlem tekrarlanmaktadır [15]. Şekil 2.7’de SLS için şematik gösterim yapılmıştır. SLS üretim yönteminde imalat aşamasında destek parçalara gerek olmadığından diğer üretim yöntemlerine göre bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca karmaşık geometriler üretme konusunda oldukça bu yöntem kullanışlıdır. Parçalar FDM üretim yöntemine göre yüksek dayanım ve rijitliğe sahiptir [16].



Şekil 2.7. SLS üretim yönteminin şematik gösterimi [3]

2.1.7. Elektron ışınli ergitme (EBM)

EBM üretim tekniği SLM tekniğine benzer şekilde olmaktadır. Fark olarak tozu eritmek için kaynak olarak elektron ışını kullanmaktadır [17]. EBM teknolojisinde kullanılan vakum ortamı, elektronların gaz moleküllerine çarpmasını önleyerek reaktif metallerin işlenmesini iyileştirir. Aynı zamanda ciddi bir enerji tasarrufu sağlanmış olmaktadır. Ek olarak artık gerilmeleri azaltmak için, malzeme ve baskı yatağı ısıtılır. Numunenin gözeneklilik seviyesi de ışın parametreleri değiştirilerek ayarlanabilir [18]. Şekil 2.8’de EBM için şematik gösterimi yapılmıştır.



Şekil 2.8. EBM üretim tekniği şematik gösterimi [19]

2.2. Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler

Günümüzde eklemeli imalat teknolojisi geliştikçe eklemeli imalatla kullanılan baskı malzemeleri de orantılı olarak gelişmiştir. Eklemeli imalatla en yaygın olarak kullanılan malzemeler polimerler, metal ve alaşımları, biyomalzemeler, kompozitler, seramikler, yapı malzemeleri, akıllı malzemeler olarak isimlendirilmektedir [20].

2.2.1. Polimerler

Polimerler eklemeli imalatatta en çok tercih edilen malzemelerdir. Bunun nedeni; düşük maliyeti, kullanma kolaylığı, iyi mekanik özelliklere sahip olmasıdır [21]. Eklemeli imalatatta başlıca kullanılan polimerler; akrilonitril-bütadien stiren (ABS), naylon, akrilonitril stiren akrilat (ASA), yüksek etkili polistiren (HIPS), polietilen tereftolat (PET), polilaktik asit (PLA), polikarbonat (PC), polietilen tereftolat glikol (PETG), polieter eter keton (PEEK), termoplastik polyester (TPC) ve metil metakrilat akrilonitril bütodienestiren (MABS) ve daha birçok polimer türevlerdir [21]. Polimerler çoğunlukla sağlık, havacılık, otomotiv, oyuncak sektörü gibi alanlarda kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan polimerler ABS ve PLA'dır [22]. ABS; akrilonitril, bütadien, stiren olmak üzere üç monomerden oluşan bir polimerdir. $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3)_n$ kimyasal formülüne sahiptir [23]. ABS yaygın olarak kullanılan bir termoplastik polimerdir. ABS'in üretimi kolay ve maliyeti düşük olmasının yanı sıra mekanik özelliğinde yüksek mukavemet değeri ve darbe direncinin yüksek olmasından ötürü bu polimerler için en çok tercih sebebi olmuştur [24]. ABS amorf bir katı olup, gerçek bir erime noktası bulunmamaktadır. 105 °C'lik bir camsı geçiş sıcaklığına sahiptir. Çoğunlukla ABS malzemesi -20 ile 80 °C arasında kullanılmaktadır. Geniş bir sıcaklık aralığının olmasının nedeni ise sıcaklıkla beraber malzemenin mekanik özellikleri değişmektedir [25].

3B baskı teknolojilerinde en yaygın olarak kullanılan polimerlerden biride polilaktik asit (PLA)'dır. PLA mısır nişastası ve şeker kamışı gibi doğal kaynaklardan elde edilen ve biyolojik olarak parçalanabilen bir polimerdir [26]. İnsan sağlığına olumsuz etkisi olmadığından ötürü birçok oyuncak, mutfak gereçleri, saklama kapları gibi geniş kapsamlı kullanım alanları vardır [27]. PLA malzemesi 55 °C camsı geçiş sıcaklığına sahiptir ve amorf bir katıdır. ABS ve PLA malzemeleri en çok FDM, stereolitografi (SLA)'de kullanılmaktadır [28].

2.2.2. Metaller ve alaşımları

3B yazıcılarda polimerlerden sonra en çok kullanılan metal ve alaşımlar gelmektedir. Genellikle prototip oluşturma ve küçük ölçekli üretimlerde kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay, otomotiv, biyomedikal ve savunma sektörlerinde yoğun şekilde tercih edilmektedir. Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmeyen karmaşık geometrili parçaların üretiminde

oldukça kolaylık sağlamaktadır [28]. Eklemeli imalatla titanyum alaşımları, nikel bazlı alaşımlar, paslanmaz çelik, alüminyum alaşımları gibi çok sayıda metal ve alaşımlar kullanılmaktadır [29]. Ancak metal ve alaşımları eklemeli imalat ile maliyeti çok yüksek ve üretim hızı yavaş olması bu malzemelerin kullanım tercihini azaltmaktadır. 3B yazıcılarda metal ve alaşımların kullanımında lazer ya da elektron ışın gibi kaynaklar kullanılmaktadır. Direkt metal lazer sinterleme (DMLS), lazer ergitme ve seçici lazer ergitme (SLM), elektron ışınla ergitme (EBM) gibi üretim yöntemlerinde kullanılmaktadır [30].

2.2.3. Biyomalzemeler

Biyomalzemeler; sağlık sektöründe ihtiyaç halinde üretilen numunelerde çoğunlukla tercih edilen malzemelerdir. Eklemeli imalatla biyomalzemenin kullanımı gelişmiş baskı kalitesi, üretim hızı, karmaşık geometrileri üretme özelliği, malzeme sarfiyatının olmaması gibi nedenlerden ötürü oldukça tercih edilmeye başlamıştır [31]. Hastaların bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) cihazları ile veriler alınarak tahrip kısımlar gerekli düzenlemeler yapılarak eklemeli imalat ile birebir üretimler gerçekleştirilmektedir. Biyomalzemelerin kullanıldığı eklemeli imalat yöntemleri olarak stereolitografi (SLA), bağlayıcı (yapıştırıcı) püskürtme (BJ), polyjet, seçici lazer sinterleme (SLS), eriyik bitirme modelleme (FDM), gibi birçok üretim yöntemleri örnek olarak verilmektedir [32].

2.2.4. Kompozitler

Kompozitler, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki ya da daha fazla bileşenin birleşimidir. Ayrıca kompozitler diğer malzemelere kıyasla gelişmiş mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Kompozit malzemeler eklemeli imalat yöntemiyle kullanımı giderek artmaktadır [33]. Kompozit malzemeleri basmak için eriyik biriktirme modelleme (FDM), stereolitografi (SLA), seçici lazer sinterleme (SLS) gibi farklı türde eklemeli üretim yöntemleri vardır [34,35].

2.2.5. Seramikler

Seramikler sert, kırılğan, ısıya ve korozyona dayanıklı malzemelerdir [36]. Havacılık ve uzay, otomotiv endüstrisinde, diş hekimliği ve kemik dokusu mühendisliği gibi sektörlerde çoğunlukla seramik malzemelerle eklemeli imalat yöntemi kullanılmaktadır [37]. Toz bazlı, bulamaç bazlı, ve dökme katı fazlı seramik malzemeleri basmak için kullanılan üretim yöntemleri stereolitografi (SLA), seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer eritme (SLM), eriyik biriktirme modellemesi (FDM) gibi yöntemlerdir [38].

2.2.6. Yapı malzemeleri

Beton, inşaat sektöründe evler, köprüler ofisler vb. inşa etmek için kullanılan en yaygın malzemedir [39]. Her inşaat sektöründe sağlam ve dayanıklı yapılar yapmak için demir çubuklarla birlikte beton kullanılmaktadır [40]. Geleneksel inşaat yöntemleri yüksek maliyet, daha fazla insan gücü, zaman ve malzeme israfı meydana gelmektedir. Eklemeli imalat sektörünün gelişmesiyle beton malzemesini kullanarak evler, ofisler, köprüler vb. yapılar yapılmıştır [41].

2.2.7. Akıllı malzemeler

Akıllı malzemeler, zamana bağlı olarak ışık, sıcaklık, ısı ve gerilme değişimi ile şekil, renk ve boyut gibi önemli özelliklerini değiştirebilme kabiliyetine sahip malzemelerdir. Akıllı malzemeler aynı zamanda şekil hafızası, kendini harekete çevirme, kendini uyarılama, karar verme gibi yetenekleri olan malzemelerdir [42]. Akıllı malzemeler çok çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Damar içi stentler, biyomedikal cihazlar, mikroakışkan cihazlar, metamalzemeler, doku mühendisliği gibi alanlarda uygulanmaktadır. Akıllı malzemeleri kullanarak üretim yapmak için SLS, SLM, FDM, SLA, EBM gibi yöntemler mevcuttur [43].

3. METAMALZEMELER

Metamalzemeler olağanüstü özelliklere sahip, yapay olarak üretilmiş malzemelerdir. Başka bir ifade ile doğada doğal olarak bulunmayan özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanmış bir malzeme sınıfıdır [44]. Bu insan yapımı malzemeler, kendi atom benzeri hücre tasarımı ile benzeri görülmemiş etkili özelliklere sahip malzemeler oluşturulmaktadır [45]. Bu alışılmadık malzeme özellikleri, malzemenin kimyasal yapısından ziyade mikroyapısal geometrilerinden kaynaklanmaktadır.

3.1. Metamalzeme Türleri

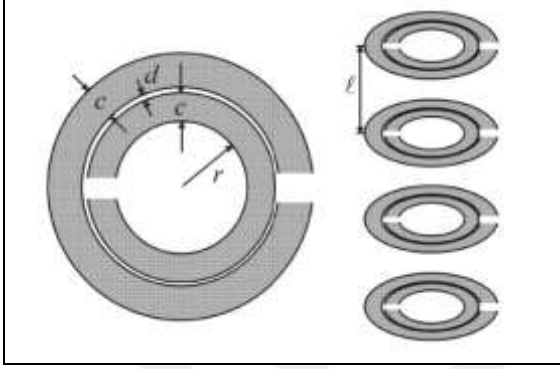
3.1.1. Akustik metamalzemeler

Akustik metamalzemeler, akustik dalgaları geleneksel malzemelerle erişilemeyen şekillerde düzenlemek ve kontrol etmek için tasarlanmıştır. İlk yapay akustik metamalzeme 2000 yılında Liu ve diğerleri [46], tarafından bulunmuştur. Gelen sesi yansıtan yapılar fikrine dayanarak, akustik dalgalara yanıt veren konik kristaller oluşturmak için kauçuk kaplı küreler kullanılmıştır. Düzensiz kompozitlerin bu yapılarda etkili negatif elastik sabitleri ve toplam dalga rölesi olan bir malzeme gibi davrandıkları gösterilmiştir. Victor Veselago tarafından 1967’de metamalzemeler üzerine ilk çalışmalar yapılmıştır [47]. Veselago elektromanyetik bir ortamda grup ve faz hızlarının birbirleri ile zıt yönde olabileceğini iddia etmiştir. Çalışmaları ile faz hızının negatif olmasını, dolayısıyla kırılma indisinin de negatif olacağını ortaya çıkarması ile metamalzemelerin bilimsel araştırmalar ve endüstriyel uygulamalarda çok büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir [46]. Akustik metamalzemelerin teorik temelleri, elektromanyetik metamalzemeler ile birlikte akustik, mekanik ve elektriksel konularla ortaya çıkmaktadır.

3.1.2. Elektromanyetik metamalzemeler

Elektromanyetik dalga yayılımını etkileyen önemli değişkenler ortamın veya dalga ile etkileşen cismin dielektrik sabiti ϵ ve manyetik geçirgenlik μ unsurlarıdır. Elektromanyetik malzemeler; bu unsurların, farklı elektromanyetik özellikler kattığı insan yapımı olup doğada bulunmayan malzemelerdir [48]. Geometrik yapısı bu malzemelerin, bu parametrik

yapılarını değiştirmeyi amaçlar. Yapay manyetizma fikri Şekil 3.1’de gösterildiği gibi negatif geçirgenlik ve pozitif geçirgenlik üretmek için ayırık halkalı rezonatörler (split ring resonator) (SRR) adı verilen bir yapay yapı Pendry ve diğerleri [49], tarafından tasarlanmıştır.



Şekil 3.1. Yapay ayırık halkalı rezonatörler [49]

SRR yapısı 1 mm’den daha küçük ölçekli bir çift manyetik olmayan kapsül halkası ile birleştirilmiştir. SRR bir manyetik alana maruz kaldığı zaman, döngüler manyetik akımlarını ayrı ayrı üreteceklerdir. Bu olayda manyetik alanını önemli ölçüde artıracaktır. SRR doğal olarak oluşan malzemelerde bulunmayan negatif geçirgenlik gibi benzersiz özelliklere sahiptir. Ayrıca, bu yapı doğrusal olmayan etkileri büyük ölçüde artırma imkanı da sunabilir.

3.1.3. Termal metamalzemeler

Termal metamalzemeler, ısı akışını bir süreklilik skalasında aktif olarak kontrol edebilen dönüşüm termodinamiği ile tasarlanan yapay yapılardır [50]. Dönüşüm termodinamiği, Pendry’ nin elektromanyetik peleriniyle temsil edilen dönüşüm optiklerinden türetilmiştir [48]. Fan ve diğerleri [51] ile Guenneau ve diğerleri [52] kararlı durum dönüşüm termotikleri ve kararsız dönüşüm termotikleri teorisini oluşturmuşlardır. Büyük çaplı termal metamalzemelerin ilk çalışmaları, fonksiyonel yapılar tasarlamak için dönüşüm termodinamiğini kullanmaya odaklanmıştır [53,54]. Bugüne kadar, yaygın teknolojilerin malzeme işlenmesi kullanılarak belirli hedef uygulamalar için en uygun yapıların tasarlanması için artan sayıda çalışmalar yapılmıştır [55,56]. Diğer metamalzemelere kıyasla, termal metamalzemeler karmaşık fiziksel mekanizmalar nedeniyle bilim

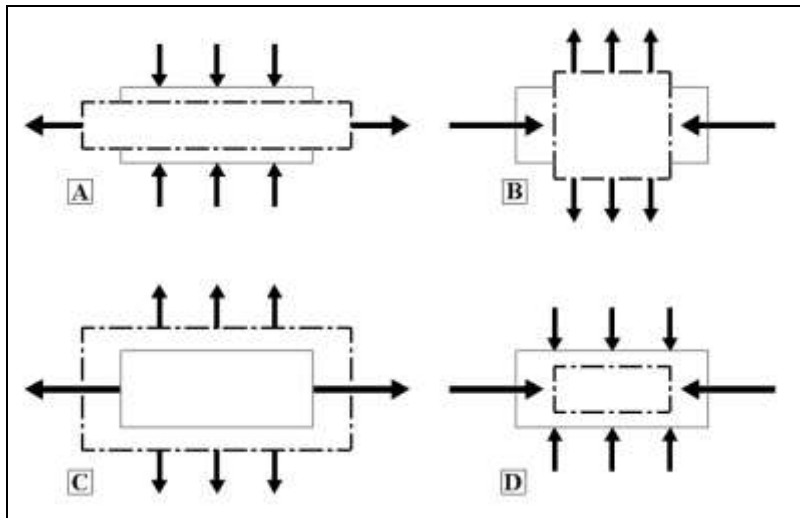
adamlarının dikkatini çekmekte nispeten geç kalmışlardır. Bununla birlikte, termal gizlilik pelerini, termal koruma, termal yönetim ve termal bilgilerdeki önemli uygulamalarla bu alanda araştırmalar hızlanmıştır.

3.1.4. Optik metamalzemeler

Optik metamalzemeler, doğal malzemelerin ötesinde benzeri görülmemiş optik özellikler sergileyen yapay olarak tasarlanmış yapılardan oluşur [57]. Optik metamalzemeler süper çözünürlüklü görüntüleme, negatif kırılma ve görünmezlik gizleme gibi birçok yeni işlevsellik sunmaktadır [58].

3.1.5. Mekanik metamalzemeler

Mekanik metamalzeme yapıları dört elastik sabitle yakından ilişkilidir. Bunlar; young modülü (E), kayma modülü (G), bulk modülü (K) ve poisson oranı (ν)'dır. Young modülü, kayma modülü ve bulk modülü bir yapısal malzemenin sertliği, rijitliği ve sıkıştırılabilirliğini ölçer. Poisson oranı (ν) ise elastik olarak gerildiğinde homojen olsun ya da olmasın herhangi bir malzemenin yapısal performansını karşılaştırmak için temel bir ölçüm sunmaktadır. Şekil 3.2'de pozitif ve negatif poisson oranı gösterilmektedir [59].



Şekil 3.2. (A-B) Pozitif poisson oranına (C-D) negatif poisson oranına sahip malzemelerin çekme ve basma kuvveti altındaki şekil değiştirmeleri [59]

Poisson Oranı

Tek eksenli bir gerilme durumu için yanal gerilme ile eksenel gerilme oranının negatif işaretlisi olarak ifade edilir. Bir malzemeye çekme kuvveti uygulandığında malzemede kuvvetin uygulandığı yönde bir uzama görülecektir. Basma kuvveti uygulandığında ise malzeme kuvvetin uygulandığı yönde kısılacaktır. Eksenel yanal şekil değişimi ilişkisine poisson adı verilir. Genellikle “v” işareti ile gösterilmektedir. Katı olan bir madde, tek eksenli gerilime maruz kaldığında yanal zorlanmanın eksenel zorlanmaya oranının negatif işaretlisi poisson oranı olarak tanımlanır. Çoğu malzeme için bu değer pozitifdir ve hacmi korumayı amaçlar. Eş. 3.1’de poisson oranının denklemleri gösterilmektedir.

$$\text{Poisson oranı } (v) = - \frac{\varepsilon_{\text{yanal}}}{\varepsilon_{\text{eksenel}}} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.2)$$

Eş. 3.2’de ΔL uzunluk değişimini (mm) ve L ilk uzunluğu (mm) ifade etmektedir. Çoğu mühendislik malzemelerinde poisson oranıyla (v), young modülü (E), kayma modülü (G) ve esneklik modülü (K) arasında malzeme özelliklerini belirleyecek kullanışlı eşitlikler bulunmaktadır.

$$v = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \quad (3.3)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + v)} \quad (3.4)$$

$$G = \frac{3K(1 - 2v)}{2(1 + v)} \quad (3.5)$$

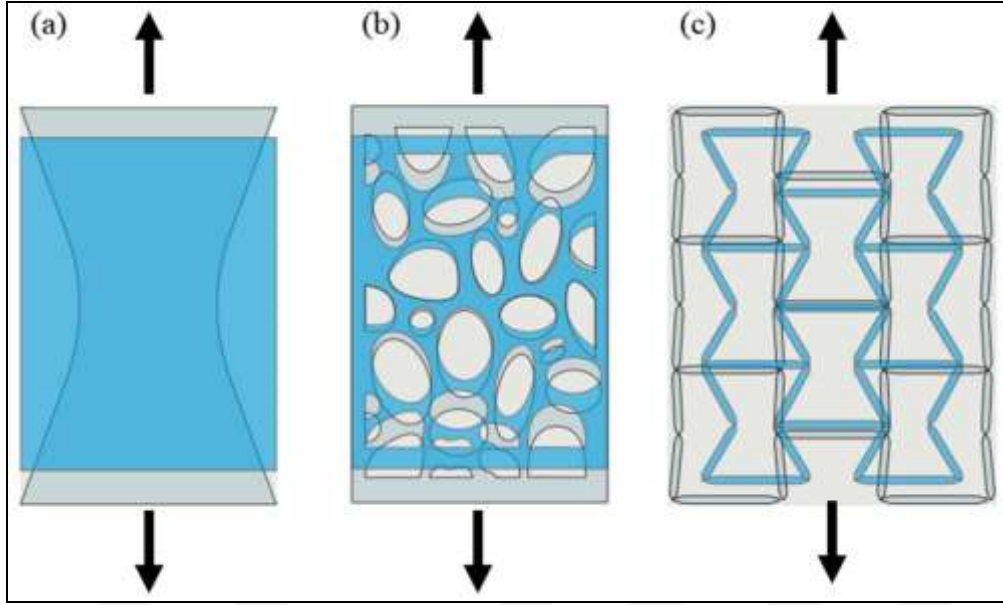
Eş. 3.3'te poisson oranı, esneklik modülü ve kayma modülü arasındaki bağıntı gösterilmektedir. Eş. 3.4 ve 3.5'te ise kayma modülü, young modülü ve poisson oranı arasındaki ilişkiye değinilmiştir.

Geleneksel malzemelerde poisson oranı genellikle 0,25 ile 0,33 arasında değişmektedir. Çizelge 3.1'de bazı malzemelerin poisson oranları görülmektedir.

Çizelge 3.1. Geleneksel malzemelerin poisson oranları

Malzeme	Poisson oranı (ν)
Alüminyum	0,334
Bakır	0,331
Bronz	0,340
Cam	0,200 - 0,300
Kauçuk	0,480 - 0,500
Kalay	0,410
İnkonel	0,270-0,380
Paslanmaz çelik	0,305
Demir	0,220-0,300
Nikel	0,310

İzotropik malzemelerde poisson oranı 2B malzemeler $-1 < \nu < 1$ iken, 3B malzemelerde poisson oranı $-1 < \nu < 0,5$ arasında değişmektedir [60]. Şekil 3.3'de farklı poisson oranlarına sahip yapıların çeşitleri gösterilmiştir.



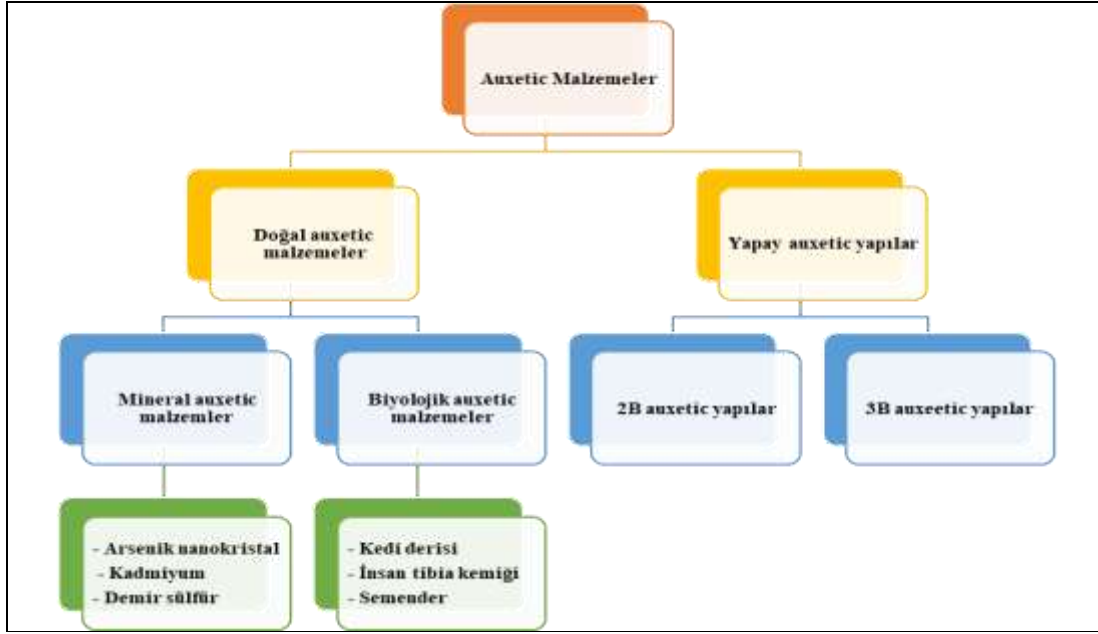
Şekil 3.3. Farklı poisson oranlarına sahip yapı çeşitleri (a) pozitif (b) sıfır (c) negatif [60]

Mekanik metamateryaller young modülü (E), kayma modülü ve bulk modülü (K) ile poisson oranı olarak üç grupta incelenmektedir. Poisson oranı olarak auxetic yapılar incelenmektedir. Auxetic yapılarda negatif poisson oranı ya da sıfır poisson oranı olarak çalışılmaktadır.

3.2. Auxetic Yapılar

Auxetic yapılar diğer bir adıyla negatif poisson oranına sahip yapılardır ve “NPR” olarak ifade edilir. Yunanca “auxetos” kelimesinden türetilen ve genişleme eğilimi anlamına gelen auxetic terimi, ilk olarak 1991 yılında Evans ve arkadaşları tarafından bulunmuştur [61]. Auxetic yapılarda yüksek enerji sönümlenme özelliği, değişken NPR değeri, hafiflik gibi mükemmel mekanik özelliklere sahiptirler [61]. Bu özellikleri nedeniyle havacılık, savunma, medikal, spor malzemeleri gibi çeşitli sektörlerde tercih edilmeye başlamıştır.

Auxetic yapılar çoğunlukla hücrelerin yapısal geometrisinden kaynaklanmaktadır. Boyutları malzemenin türüne bağlı olarak nano ölçekten makro ölçeğe kadar değişmektedir [62]. Şekil 3.4’de auxetic malzemeler için genel bir sınıflandırma yapılmıştır. Auxetic malzemeler doğada mineral ve biyolojik olarak ikiye ayrılmaktadır. Yapay auxetic malzemeler ise 2B ve 3B olarak ikiye ayrılmaktadır.



Şekil 3.4. Auxetic malzemelerin sınıflandırılması

Malzeme yapısının auxetic davranışına sahip olması için biyolojik malzemelerde bulunan gözenekli bir mikro yapı her zaman gerekli değildir [63]. Auxetic davranış, dönen bileşenlere sahip kompozit yapılarda veya mikro yapıdaki moleküler auxetic malzemelerde de görülebilir [64]. Bununla beraber bahsedilen auxetic yapıların çoğu anizotropiktir ve çoğu durumlarda genel yapısal için uygun değildir. Bu nedenle 3B hücresel auxetic malzemelerin gelişimi için dünya çapında yoğun şekilde araştırılmaya başlanmış ve birçok auxetic malzemelerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Auxetic yapılar üç ana grupta sınıflandırılmaktadır.

3.2.1. Auxetic mikro gözenekli polimerler

Geleneksel polimer köpükten auxetic malzeme üretiminden sonra [61] daha geniş mühendislik uygulamaları için daha sert malzemelerden olan politetrafloroetilenden yapılar üretilmiştir [65]. Bu yapıların poisson oranı -12 gibi oldukça düşük bir oran sergilemiş ve anizotropik köpük yapısı oluşturulmuştur [66]. Benzer mikro gözenekli polimer mikro yapıları ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kullanılarak auxetic malzemeler üretilmiştir. Ancak politetrafloroetilenden farklı olarak düğüm noktaları küresel ve daha izotropiktir. Bu nedenle politetrafloroetilene göre -1,24'ten daha düşük olmayan auxetic malzemeler oluşturulmuştur [67]. Bu tür malzemelerde daha büyük

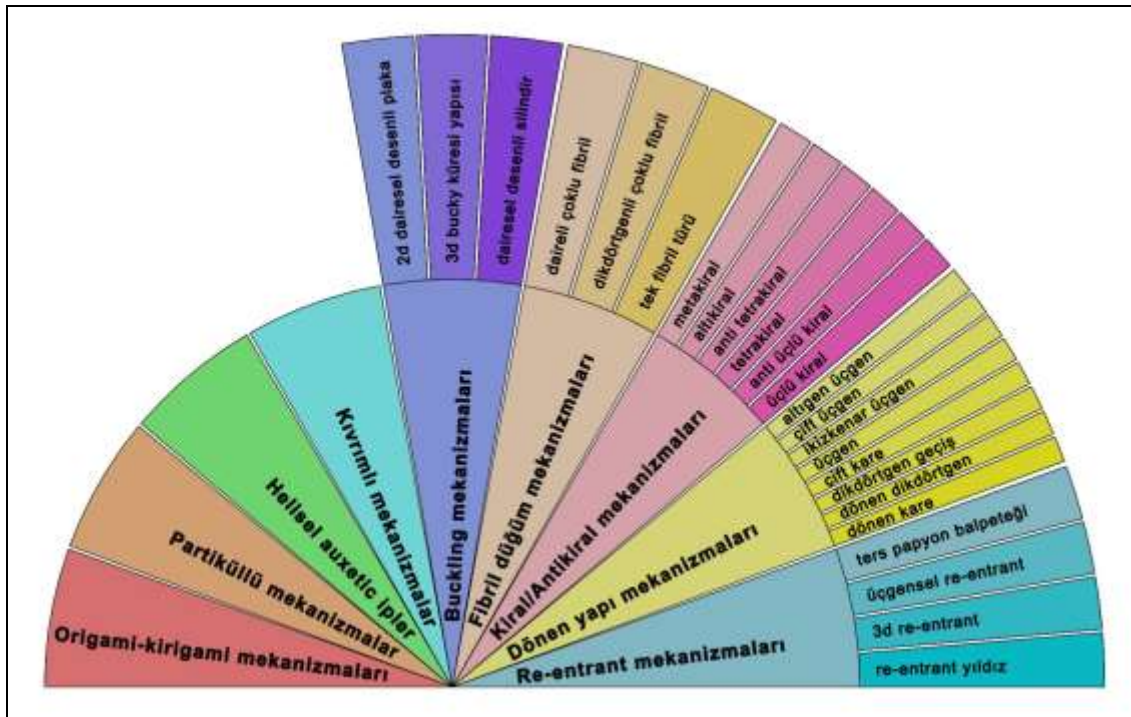
numunelerin üretimi için uygundur. Mikro gözenekli auxetic polimerlerin gözeneklilik, düşük yoğunluk ve sertlik değerlerinden ötürü geniş uygulama alanları bulamamaktadırlar.

3.2.2. Auxetic kompozitler

Auxetic kompozitler, karbon fiberlerle güçlendirilmiş epoksi reçinenin tek yönlü pre-preg bantlarının lamine edilmesiyle [68] veya daha sonra üçgen auxetic çekirdeklerle birbirine bağlanan fiber takviyeli polieter eter keton (PEEK) kullanılarak hazırlanabilmektedir [69]. Havacılık ve uzay endüstrisindeki uygulamalar auxetic kompozit sandviç paneller oldukça tercih edilmeye başlamıştır.

3.2.3. Auxetic geometriler

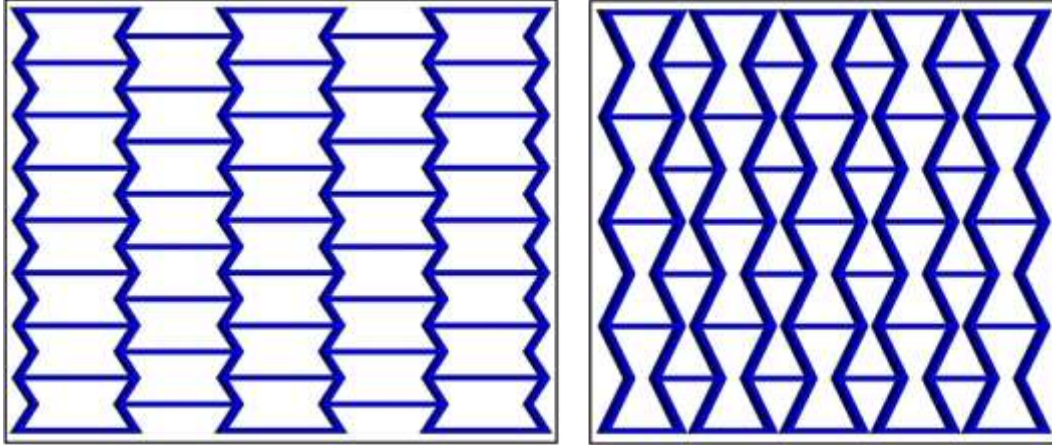
Auxetic geometriler yapılarındaki hücresel geometrilerden kaynaklı olarak çekme ve basma yükü altında negatif poisson oranı sergilemektedir. Şekil 3.5'te literatürde çalışılan re-entrant, ok ucu, yıldız, kiral, hareketli üniteler gibi birçok geometriler gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Şekillerine göre auxetic yapıların genel sınıflandırılması [70]

Re-entrant yapılar

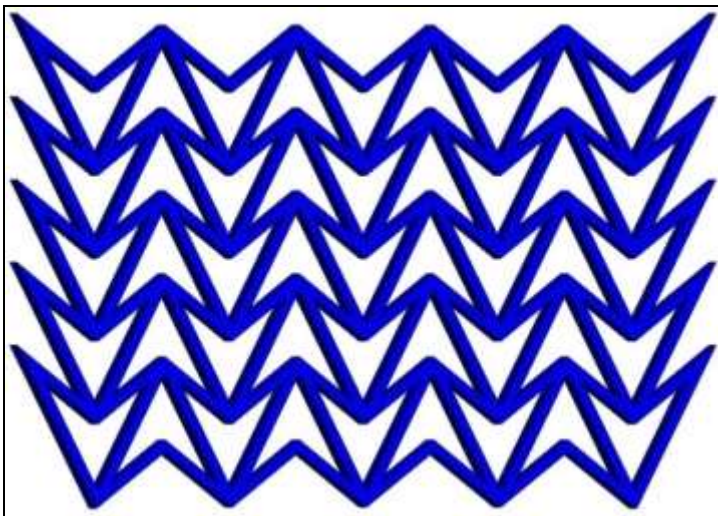
Literatürde en çok çalışılan ve tercih edilen re-entrant yapı Şekil 3.6’da gösterilmektedir. Geometrik yapısı nedeniyle geometride yapılan değişikliklerle mekanik özelliklerinde çeşitli değişimler meydana gelmektedir [71].



Şekil 3.6. Re-entrant auxetic yapılar

Ok ucu yapıları

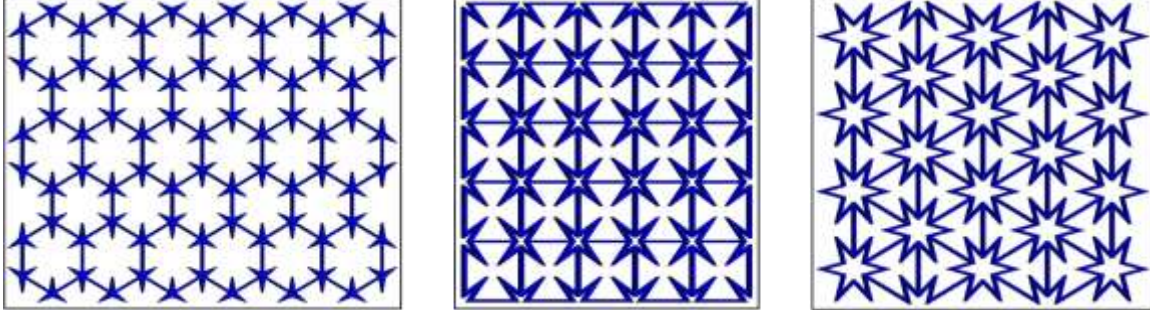
Ok ucu veya diğer adı çift V geometri olarak adlandırılan kullanımı çok yaygın olmayan geometrik yapılar Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Bünyesinde içbükey çubuklar olması nedeniyle auxetic özellik göstermektedir.



Şekil 3.7. Ok ucu re-entrant yapısı

Yıldız yapılı geometrik yapılar

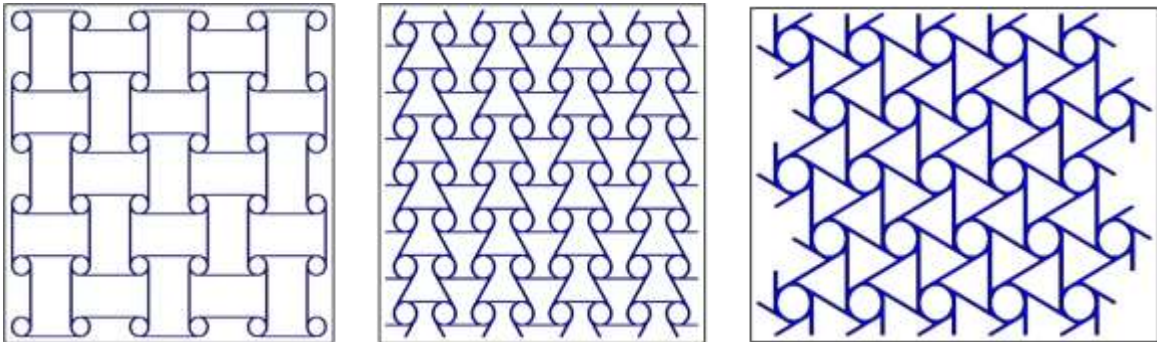
Yıldız geometrili kafes yapısı, ok ucu yapısı gibi çok yaygın olarak kullanılmayan ama auxetic özellik gösteren yapılar Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Yıldız geometrili auxetic yapılar

Kiral yapılar

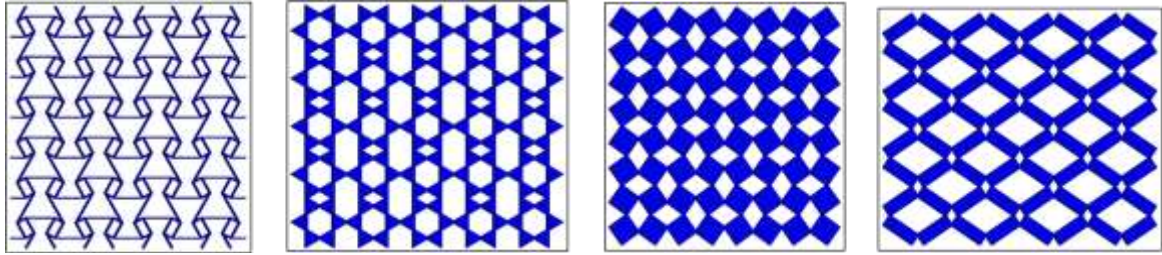
Kiral yapılarda teğetsel olarak bağlı çubuklarla çevrili bir çekirdek silindirden oluşmaktadır [72]. Mekanik yükleme uygulandığında, kiral birim silindirlerin dönüşüyle esnek bir şekilde katlanır veya açılır. Bu yapıların katlanma mekanizması Şekil 3.9’da gösterilmektedir. Temel kiral birim hücre düğümlerin sol ve sağ taraflarının ayarlanmasıyla oluşturulabilir. Kiral yapılarda bünyesinde barındığı dal yapısı sebebiyle yüksek enerji sönümlenme özelliği göstermektedir [73]. Poisson oranı birim hücreye göre değişiklik göstermektedir.



Şekil 3.9. Kiral yapılı auxetic yapılar

Hareketli yapılar

Hareketli ve dönen birim hücreler auxeticlik özellik göstermektedirler. Birim hücrenin köşelerine basit bağlantılar yaparak yüke maruz kaldığında dönme eğiliminde bulunarak, yükleme yönüne ve tipine göre genişleme yada daralma eğiliminde olmaktadır [64]. Kare, üçgen, eşkenar dörtgen, dikdörtgen ve paralelkenar gibi birçok geometrik şekil kullanılmaktadır (Şekil 3.10).

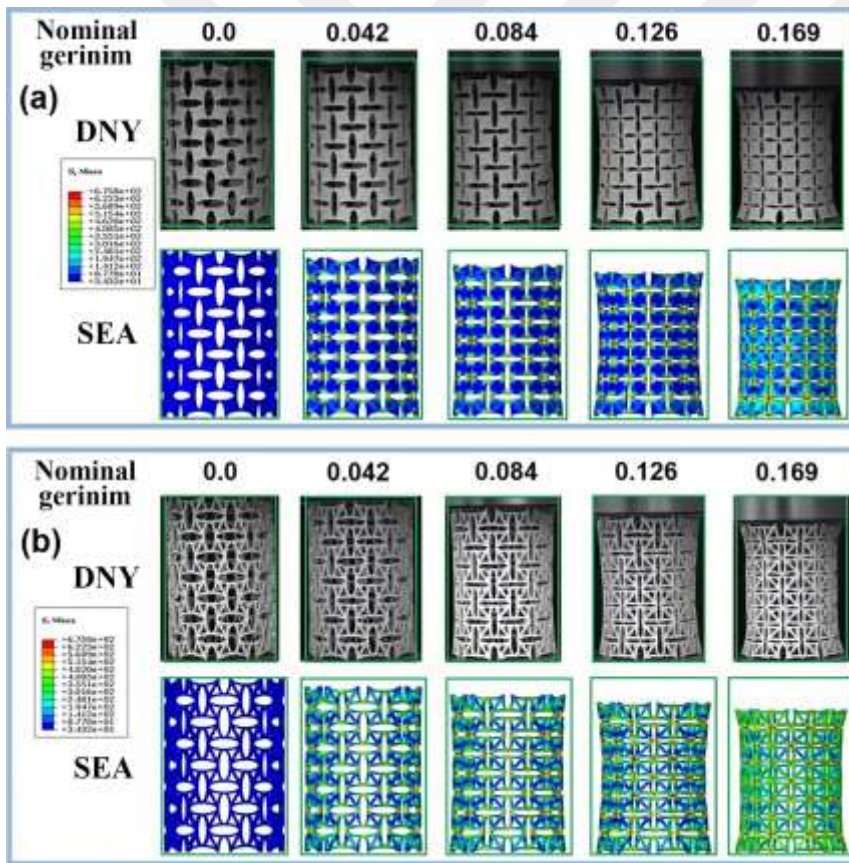


Şekil 3.10. Hareketli auxetic yapılar

4. LİTERATÜR TARAMASI

Birçok araştırmacı auxetic yapılar ile ilgili farklı tasarımlar ya da mevcut tasarımların boyutlarını değiştirerek deneysel, sayısal ve analitik çalışmalar yapmıştır.

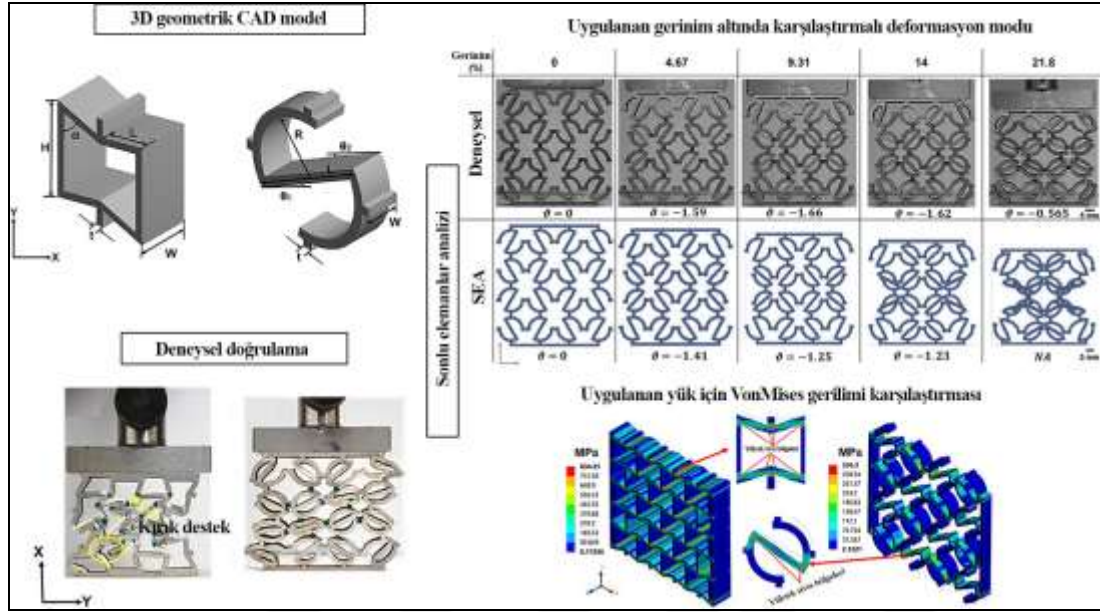
Han ve diğerleri [74], çalışmalarında hafif delikli boru şeklindeki auxetic yapıyı değiştirerek yeni bir yapı tasarlamış ve üretmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemiyle deneysel çalışmaları yapılmış, birim hücre parametrelerinin boru şeklindeki yapıların mekanik özelliklerine etkisi araştırmışlardır. Yapılan incelemeler sonucunda yeni tasarladıkları auxetic yapının orijinal yapıya göre daha iyi mekanik özellikler taşıdığını bulmuşlardır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Delikli auxetic yapının mekanik özelliklerinin incelenmesi [74]

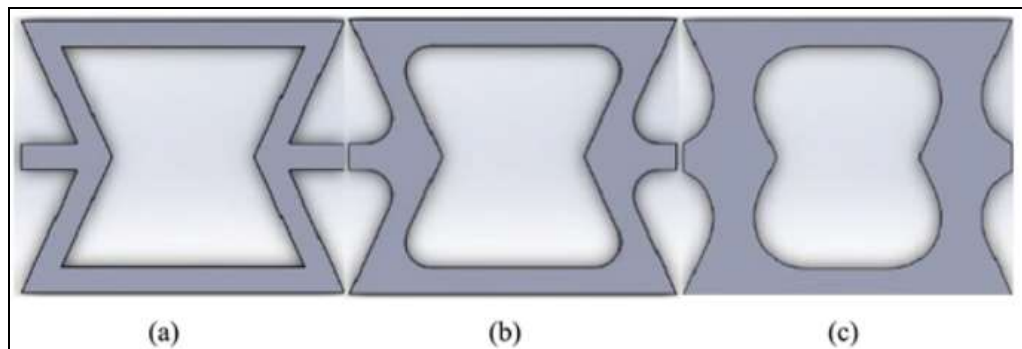
Meena ve Singamneni [75], auxetic S şeklinde bir birim hücre tasarlamışlardır. Tasarladıkları S şeklindeki yapıyı re-enrant yapı ile karşılaştırarak sayısal, deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Her iki yapı da malzeme olarak 316 L paslanmaz çelik

SLM üretim tekniği ile üretmişlerdir. Hem deneysel hem de sayısal sonuçlar, S şeklindeki yapının re-entrant yapısına göre daha iyi auxetic tepkiler verdiğini kanıtlamışlardır (Şekil 4.2).



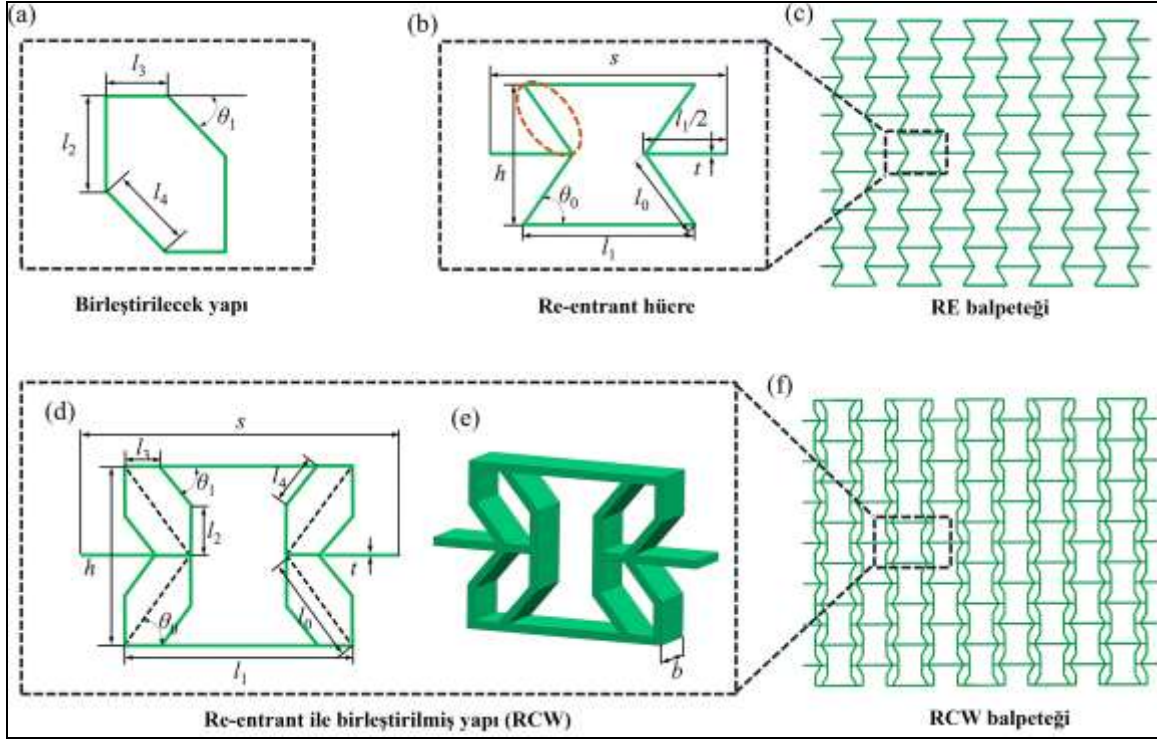
Şekil 4.2. S şeklindeki auxetic yapı ile re-entrant yapısının sonlu elemanlar ve deneysel karşılaştırması [75]

Auxetic yapılarda yeni birim hücre geometrik tasarımlar yapılırken aynı zamanda var olan tasarımlarda farklı revizyonlar da yapılarak bu yapıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Potheir ve diğerleri [76], en fazla çalışılan re-entrant yapısının iç kısımlarında bulunan keskin köşelere radius uygulayarak ve bu yapıların negatif poisson oranındaki değişimlerini incelemişlerdir (Şekil 4.3).



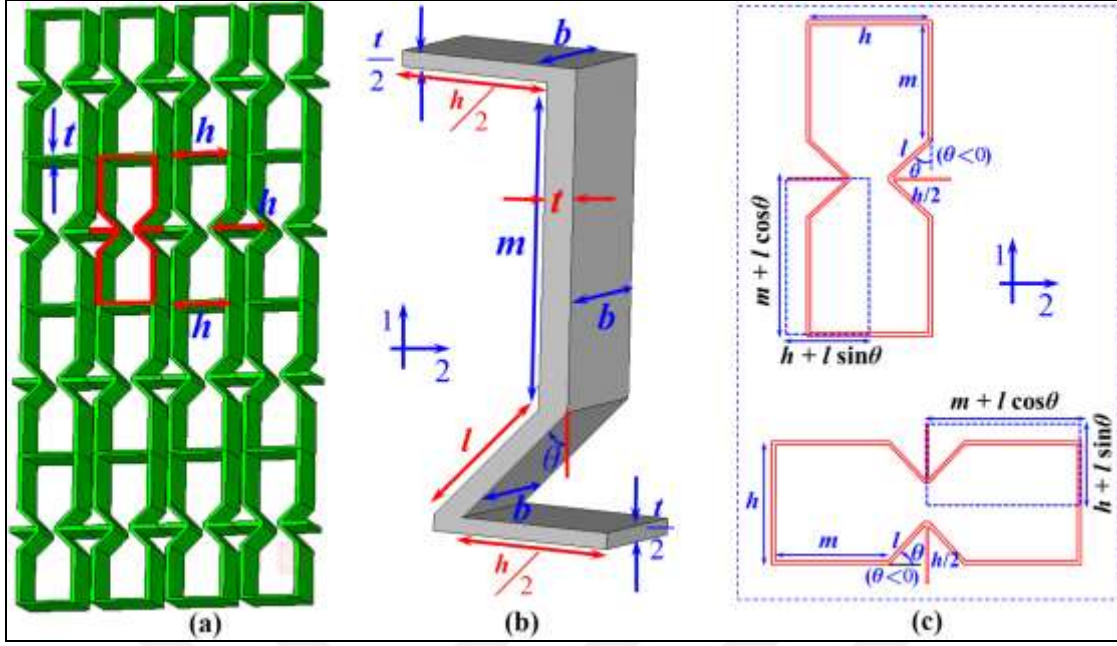
Şekil 4.3. Re-entrant yapısı (a) 0 mm radyüs yarıçapına sahip re-entrant birim hücresi (b) 0,5 mm radyüs yarıçapı (c) 1 mm radyüs yarıçapı [76]

Zhou ve diğerkleri [77], re-entrant (RE) birim hücresine eklemeler yaparak yeni bir birim hücre oluşturmuşlardır. Tasarlanan birim hücre yapısı ile er-entrant yapısının sayısal ve deneysel çalışmaları yapılmıştır. Yeni tasarlanan yapının ezilme mukavemetinin %140'a kadar arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 4.4).



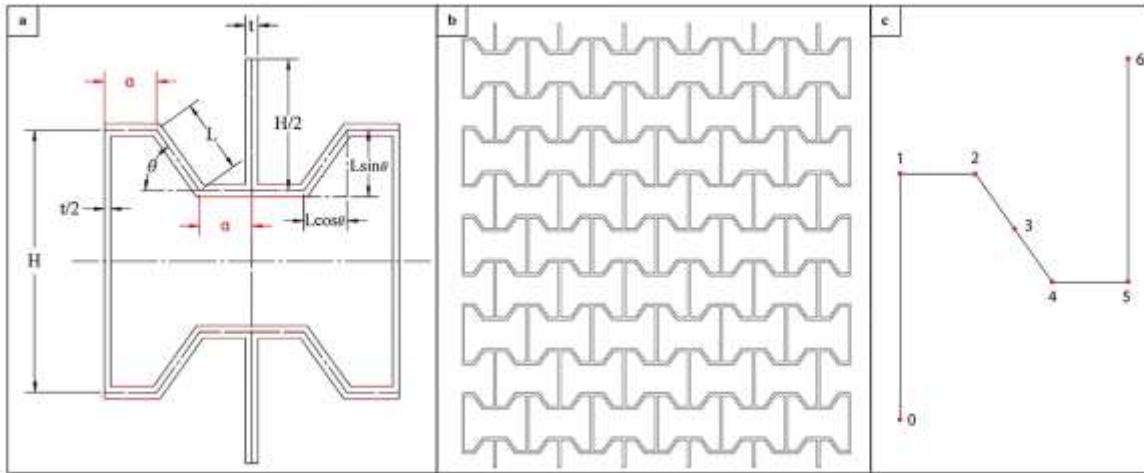
Şekil 4.4. Re-entrant birim hücresi baz alınarak yeni tasarlanan bir auxetic yapı [77]

Zhang ve diğerkleri [78], çalışmalarında, re-entrant yapısına yeni bir dikey dikme ile birleştirilmiş auxetic yapı tasarlamış ve mekanik davranışları incelemişlerdir. Giriş teorisine dayalı analitik modelin geçerliliğini doğrulamak için sayısal simülasyonlar ve deneyler yapmışlardır. Sonuçlar, geliştirilmiş analitik model, sayısal simülasyon ve deneysel çalışma arasında iyi bir uyum olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 4.5).



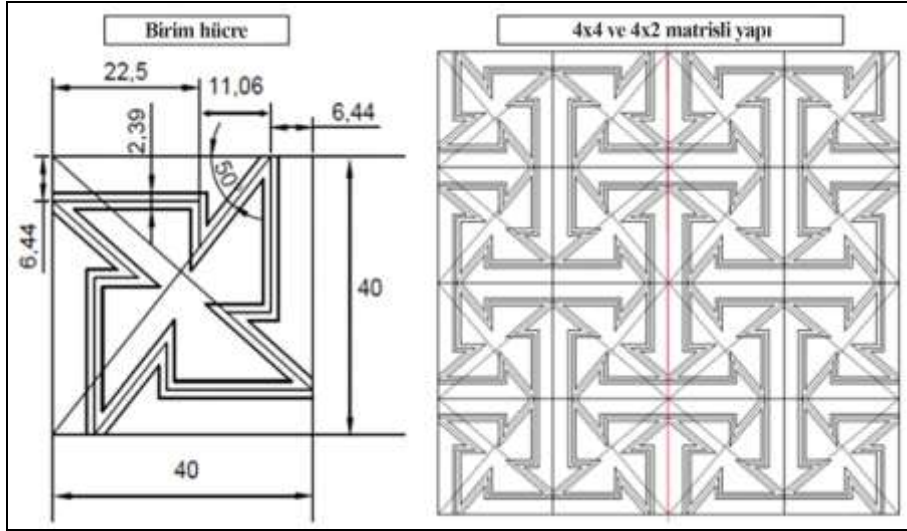
Şekil 4.5. Dikey dikmelerle oluşturulan re-entrant geometrik yapısı (a) dikey dikme birleştirilmiş yardımcı topoloji (b) birim hücrenin geometrik parametreleri (c) iki dikey dikme boyutları [78]

Khan ve diğerleri [79], ise re-entrant yapısına ilave elemanlar ilave ederek yapının elastik özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Yeni tasarlanan auxetic yapı ile negatif poisson oranı değerinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 4.6).



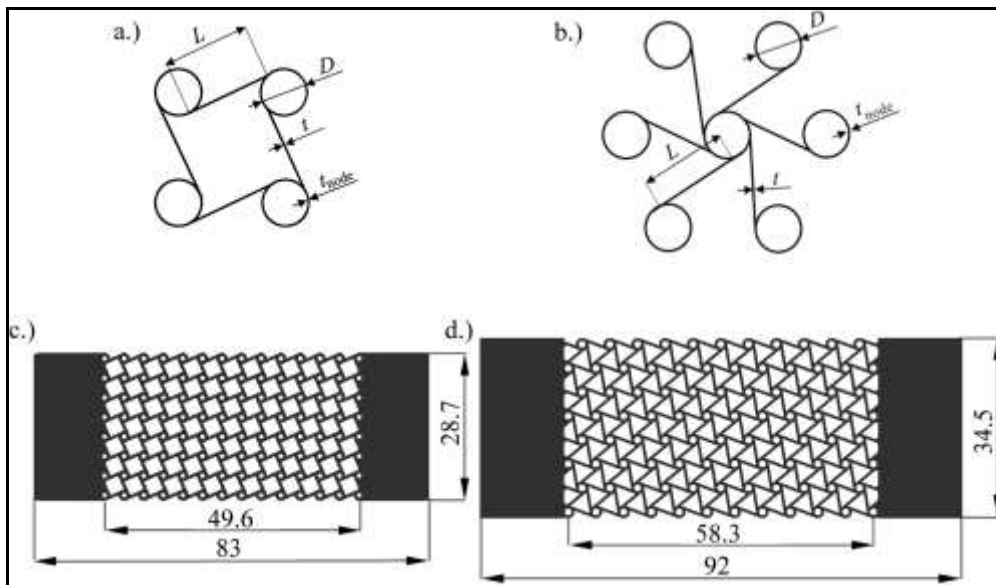
Şekil 4.6. (a) Tasarlanan yeni birim hücre (b) yeni birim hücrenin latis yapısı (c) çeyrek yapının düğüm noktaları [79]

Erdoğan ve Toktaş [80], özgün bir auxetic yapı çalışarak geometrik iç kalınlık ile kafes yapılarının poisson oranına etkisini araştırmışlardır. Çalıştıkları auxetic yapıda geometrik iç kalınlık arttıkça poisson oranının -1'e yaklaştığını bulmuşlardır (Şekil 4.7).



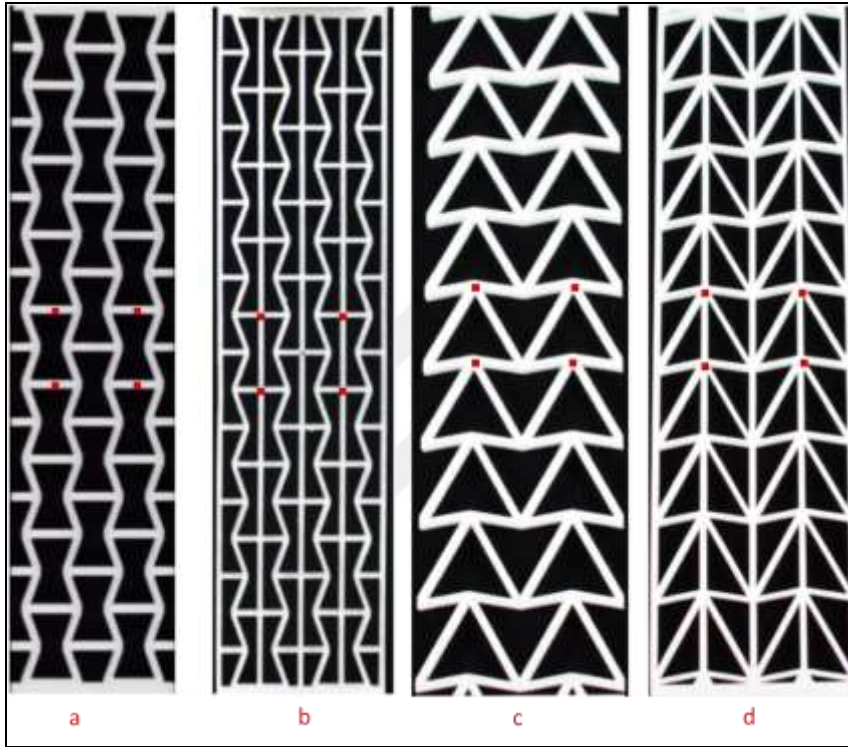
Şekil 4.7. Özgün auxetic yapının geometrik iç kalınlık ve matris yapısı ile poisson oranı ilişkisi [80]

Novak ve diğerleri [81], hexakiral ve tetrakiral auxetic yapıların, AlSi10Mg ve 316L paslanmaz çelik malzemesini kullanarak toz yatak füzyon birleştirme (PBF) eklemeli imalat yöntemi ile üretimi gerçekleştirilmiş olup bu yapıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak iki farklı yapı ve malzemenin benzer sertliğe sahip olduğu, 316L paslanmaz çelik malzemenin alüminyum alaşımından daha sünek olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca hexakiral olan auxetic yapının tetrakiral yapıya göre poisson oranının $-1'$ e daha yakın olduğunu bulmuşlardır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. (a) Tetrakiral yapısının birim hücresi (b) hexakiral yapısının birim hücresi (c) tetrakiral yapısının baskı için hazırlanmış numune görüntüsü (d) hexakiral yapısının baskı için hazırlanmış numune görüntüsü [81]

NPR yapısına sahip yapılar geliştirmek için yapılan bir başka çalışmada da, re-entrant yapısı ile çift ok başı yapısı kullanılmıştır. Bu yapıların ortasından geçecek şekilde destek kolonları eklenmiştir. Elde edilen yeni geometrilerin yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan sonuçlara göre mukavemetin önemli ölçüde arttığı ve poisson oranında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir ve elde edilen sonuçlar deneyler ile doğrulanmıştır (şekil 4.9) [82].

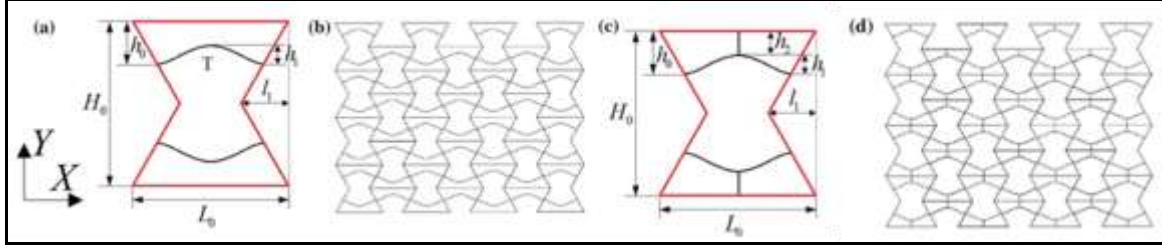


şekil 4.9. (a-b) Re-entrant hücre yapısı ile destek kolonları eklenmiş yapı (c-d) ift ok başlı auxetic yapı ile destek kolonları eklenmiş yapı [82]

Gao ve Liao çalışmalarında köpük dolgulu yapılardan ilham almışlardır. Çift oklu NPR yapısı ile doldurulmuş ince duvarlı bir yapının enerji soğurma özellikleri araştırılmıştır. Gradyan konfigürasyonları kullanılarak enerji emme kabiliyetindeki artış teorik olarak hesaplanmış ve analizlerle doğrulanmıştır [83].

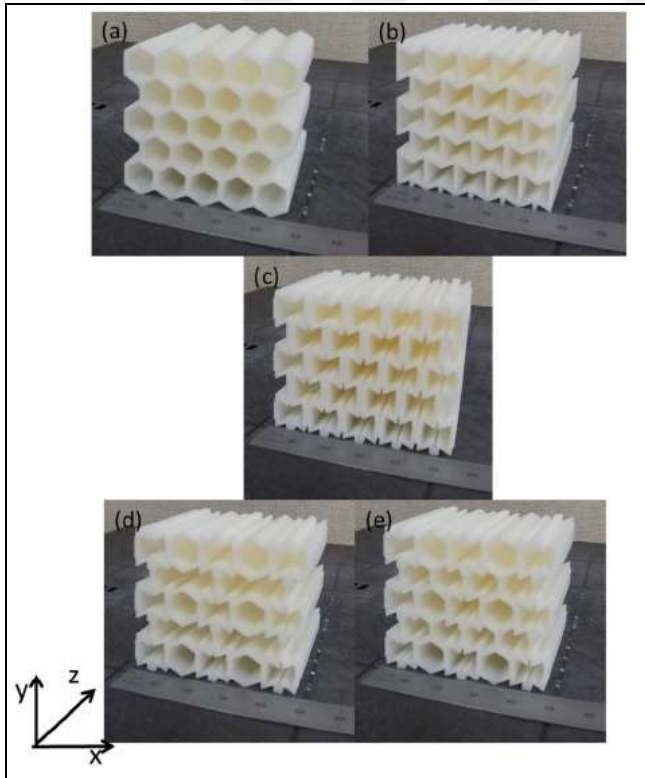
Dong ve diğerleri [84], tarafından negatif poisson oranına sahip 2 boyutlu yapılar tasarlanmıştır. Bu yapıların poisson oranı ile enerji emme kapasiteleri sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. 1. modelde re-entrant yapısına sinüzoidal şekiller eklenmiş olup, 2. modele ise sinüzoidal şekilleri güçlendirmek için dikey destekler eklenmiştir. Bu şekilde tasarlanan tasarımlarda 1. model için poisson oranı -1,12 iken 2. modelde -0,58

değerlerine ulaşılmış olmasına rağmen en iyi enerji sönümleme kabiliyeti 2.modelde gerçekleşmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. (a-b) Re-entrant yapısına eklenen sinüzoidal şekiller (c-d) sinüzoidal yapısına eklenen dikey destekler [84]

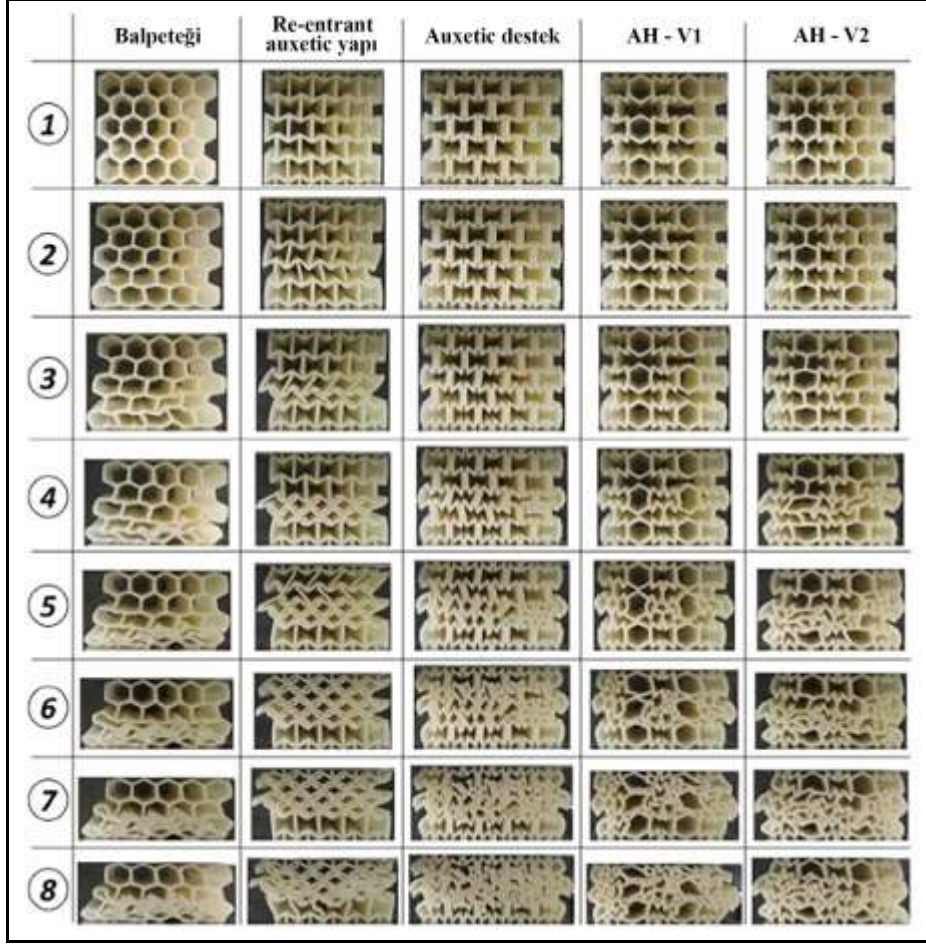
Ingrole ve diğerleri [85], yeni bir tür auxetic destek tipli auxetic yapı tasarlamışlardır ve FDM teknolojisini kullanarak üretmişlerdir. (Resim 4.1).



Resim 4.1. Hücre tasarım yapıları (a) balpeteği (b) re-entrant auxetic yapı (c) auxetic destek (d) auxetic-petek1 (AH-V1) (e) auxetic-petek2 (AH-V2) [85]

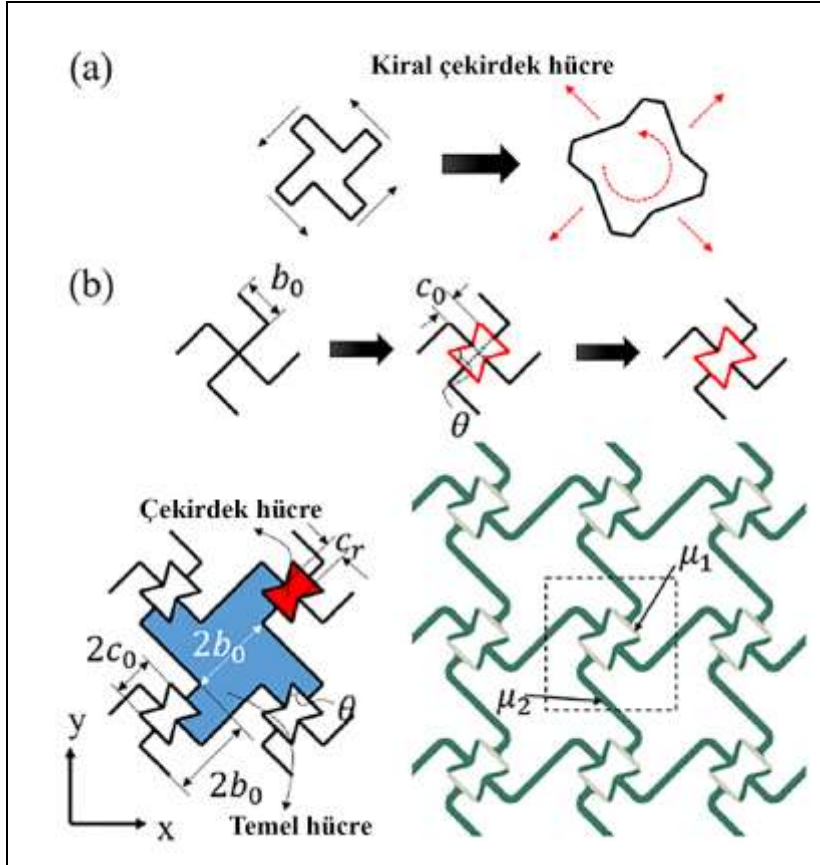
Sonuç olarak auxetic dikme tasarımı yapılarının mükemmel özellik gösterdiği Resim 4.2’de gözlenmektedir. Yeni tasarım, bal peteğinden %65 daha yüksek basınca dayanmıştır.

Ayrıca yeni yapıya göre %30 daha fazla toplam enerji ve %13 daha fazla özgül enerji absorbe etmiştir.



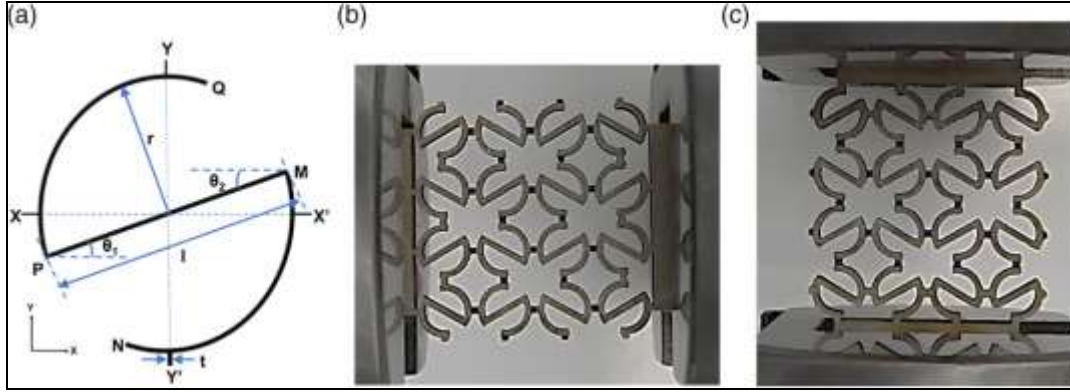
Resim 4.2. Numunelerdeki absorbe görüntüleri [85]

Jiang ve diğerleri [86], çekirdek yapılı bir hücreyi temel kiral bir hücrenin merkezine sokarak yeni bir hibrit auxetic yapı tasarlamışlardır (Şekil 4.11). 3B baskılı numuneler çok geniş bir deformasyon aralığında (%2,91 - %52,6) auxetic bir davranış sergilemiştir. Ayrıca yeni tasarımların etkin rijitliği, poisson oranı ve hücre açılma hızının geometrik parametreleri uyarlanarak geniş bir aralıkta etkili bir şekilde ayarlanabileceği belirtildi. Yapılan bu konsept, yeni çok fonksiyonlu akıllı kompozitler, sensörler ve aktüatörler geliştirmek için kullanılabilir.



Şekil 4.11. (a) Kiral çekirdek hücre ve re-entrant çekirdek hücrenin açılma mekanizmaları (b) girintili çekirdek hücre (üstte) ve yeni periyodik kiral metamalzemedede (altta) iki tip hücre ile yeni bir kiral hücre üretme [86]

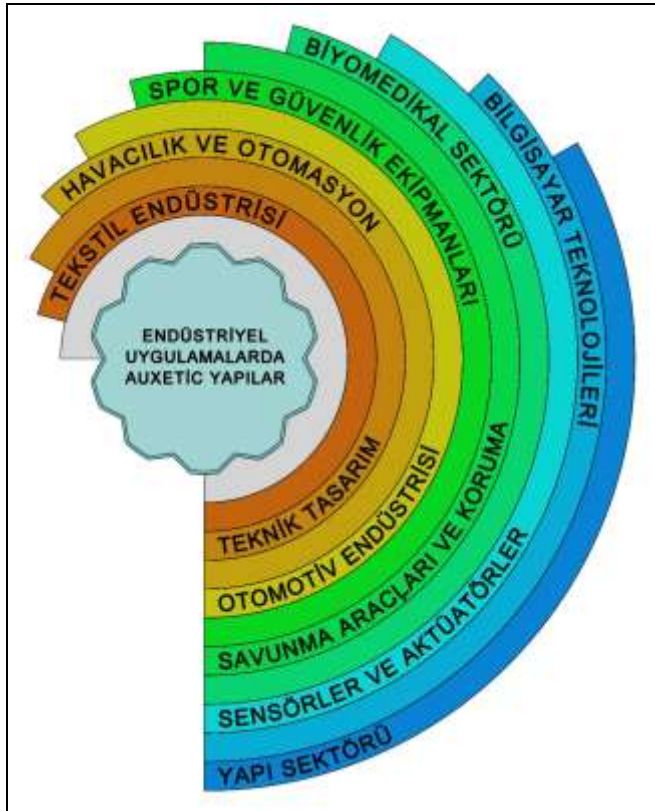
Meena ve Singamneni [87], hem X hem de Y yönlerinde büyük çekme yüklerine maruz kalan kiral S-şekilli yapının X ve Y yönünde çekmeye maruz kaldığındaki davranışını incelemişlerdir. Paslanmaz çelik 316L malzemesi ile seçici lazer eritme tekniği kullanılarak numuneler üretilmiştir. Deneysel sonuçlara göre X yönünde çekme yüküne maruz kalan numunenin daha yüksek auxeticlik özellik gösterdiğini bulmuşlardır. Y yönünde uygulanan çekme kuvvetinde ise auxeticlik özellik göstermiştir. Fakat X yönündeki kadar negatif poisson oranı yüksek değildir.



Şekil 4.12. (a) S şeklindeki birim hücre yapısı (b) x yönünde çekme kuvveti için üretilen 316L numune (c) y yönünde çekme kuvveti için üretilen 316L numune [87]

4.1. Endüstriyel Uygulamalarda Auxetic Yapılar

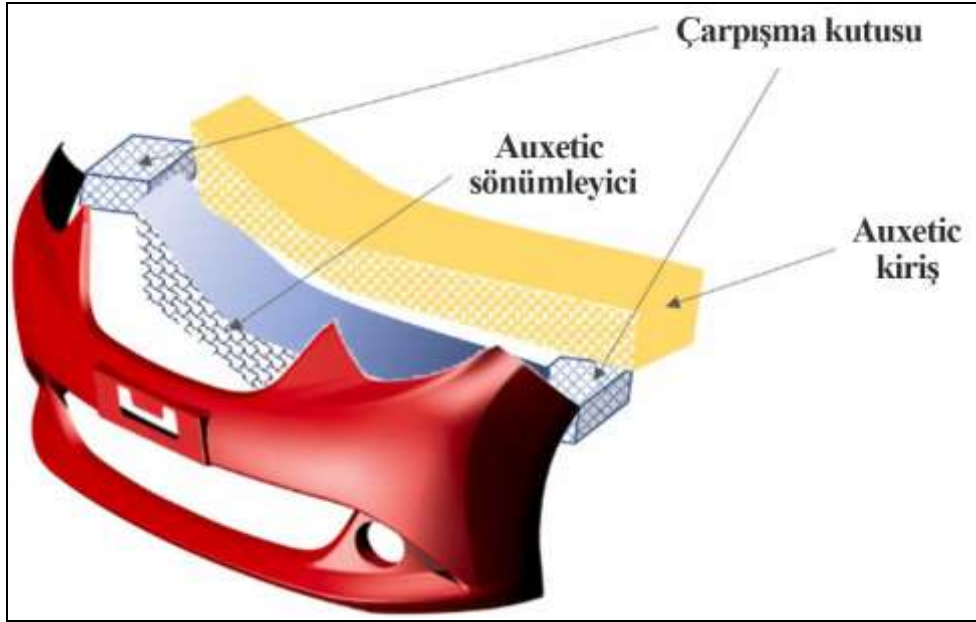
Auxetic yapılar yeni ve iyileştirilmiş yapısal ve işlevsel malzemelerin geliştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunma potansiyeline sahiptirler ve birçok açıdan inovatif düşünce ile yeni uygulamalar ve malzemeler ortaya çıkmaktadır. Auxetic yapılarla beraber endüstriyel alanda birçok uygulamalar yapılmıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Endüstriyel uygulamalarda auxetic yapılar

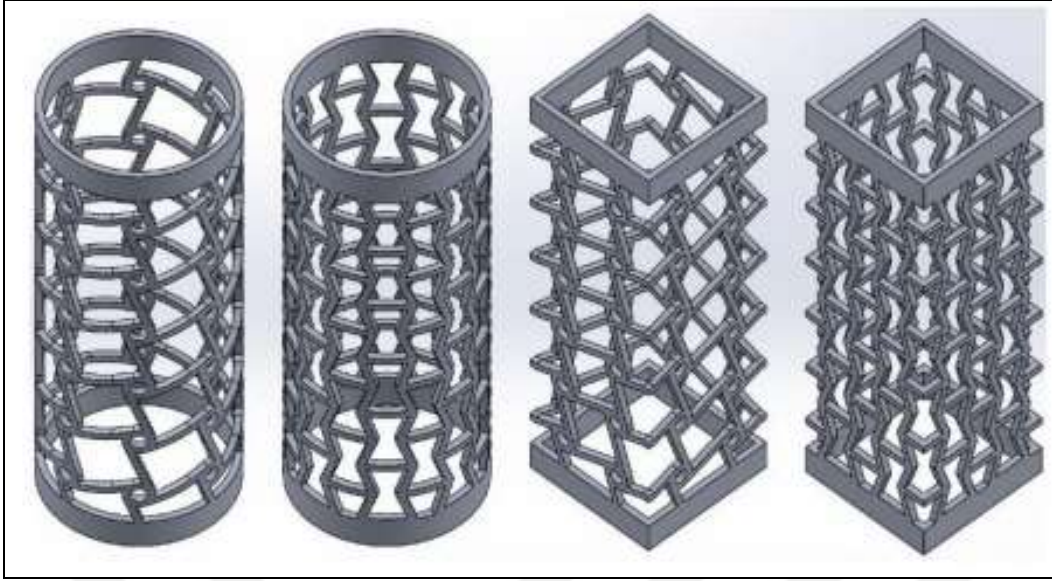
4.1.1. Otomotiv sektörü

Otomotiv sektöründe çarpışma kutusu, pasif güvenlik sisteminin en önemli parçasıdır. Önden çarpışma senaryosunda ana enerji emme ekipmanı olarak görev yapmaktadır. Auxetic yapılarında yüksek enerji emme özelliklerinden ötürü bu tür yapılar birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Wang ve diğerleri Şekil 4.14’de ki gibi yeni bir çarpışma kutusu tasarlamışlardır. Bu çarpışma kutusunda negatif poisson oranına sahip yapı ile oluşturulan enerji sönümleyici ile negatif poisson oranına sahip yapı ile oluşturulan destek yapısını kullanarak çarpışma kutusu tasarlamışlardır [88].



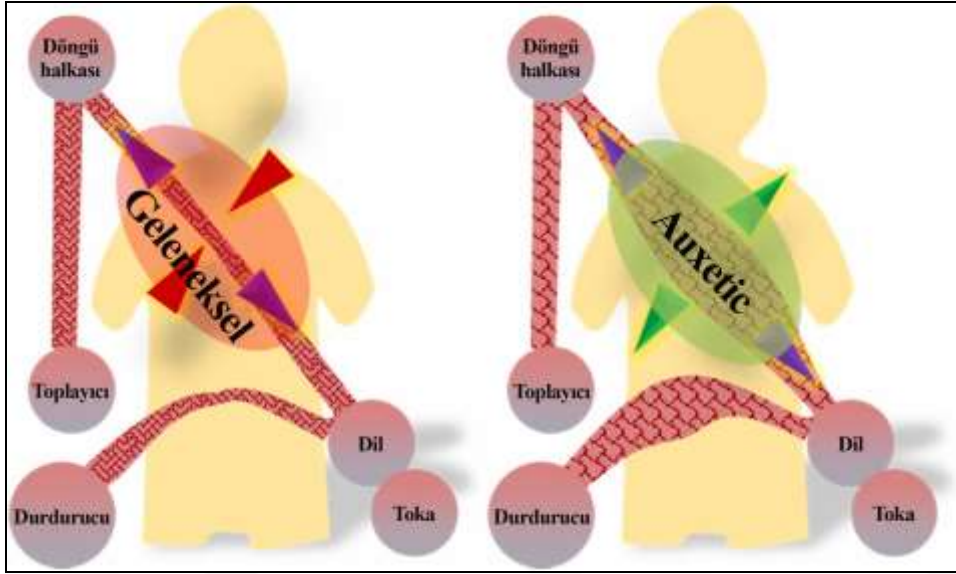
Şekil 4.14. Auxetic yapılı çarpışma kutusu [88]

Aktaş ve diğerleri tarafından negatif poisson oranına sahip olan birim hücre mekanizması; re-entrant ve tetra kiral yapılarını kullanarak silindirik ve kare kesite sahip çarpışma kutularını tasarlayarak deneysel ve sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmişlerdir [89].



Şekil 4.15. Tetra kirali ve re-entrant çarpışma kutuları [89]

Otomotiv sektöründe araç içindikileri korumanın en yaygın yöntemi üç noktalı emniyet kemeri kullanmaktır [90]. Mevcut emniyet kemerleri naylon ve polyester dokuma kumaştan yapılmıştır. Kazalarla karşılaştığında pürüzsüz bir yüzeye sahiptir ve çok fazla enerji emer. Çarpışma sırasında bir araba kazası meydana geldiğinde, bu klasik emniyet kemeri, pozitif poisson oranı nedeniyle göğüs bölgesi üzerinde büyük bir etki göstererek sertleşmesine neden olur ve bu da insan göğüs kafesine ve karın bölgesine ciddi şekilde zarar verebilir [91]. Bir zincir gibi birbirine kenetlenen pozitif poisson oranı yapısına sahip olan ve "araç emniyet kemeri örgüsü-CN102729948" olarak adlandırılan geleneksel bantların üzerinde pozitif bantlar elde edilmiştir. Bir araba çarptığında örgü, ivmeyi koruyan insan vücudunun sırt yüzeyine çarpmaktadır. Sonuç olarak örgü uzunlamasına olarak küçülmüştür.



Şekil 4.16. Geleneksel ve auxetic yapıli emniyet kemeri [90]

Örgü, Şekil 4.16’da gösterildiği gibi, auxetic özelliğinden dolayı [92], enlemesine olarak hacim kazanmaya ve sıkıştırmaya çalışır. Sonuç olarak aynı darbe kuvveti durumunda insan vücudunun temas alanı genişler. Kuvvet taşımanın temas bölgesi yükseltilir, göğüs basıncına ve insan vücudunun karnının uygun şekilde yerleşmesine neden olur.

4.1.2. Tekstil endüstrisi

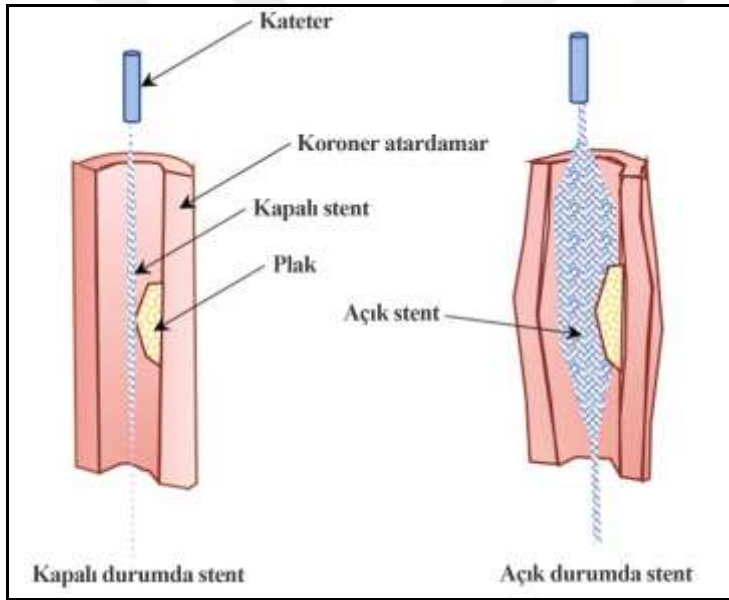
Auxetic tekstil yapıları ile kurşun geçirmez yelekler, patlamaya dayanıklı kumaşlar üretilmektedir [93]. Endüstriyel amaçlı kullanılan ipler ve halatlarda daha mukavim özelliklere sahip olması için auxetic yapılardan faydalanılmıştır. Ayrıca hava alabilen kumaş üretiminde de auxetic yapılar kullanılmaya başlamıştır [94].

4.1.3. Spor malzemeleri ve koruyucu ekipmanlar

Spor ekipmanları zorlu ve hızlı büyüyen bir sektörde, sürekli olarak yeni ve geliştirilmiş malzemeler aranmaktadır [95]. Ağır yaralanmaları önlemek amacıyla auxetic yapılardan faydalanılmıştır. Auxetic yapılardaki geliştirilmiş girinti direnci [96], titreşim sönümlleme [97], enerji sönümlleme [98] gibi özellikleri ile omuzluklar, dizlikler, kasklar gibi çeşitli ürünler üretilmiştir.

4.1.4. Biyomedikal ve sağlık endüstrisi

Yüksek enerji emilimi ve biyofonksiyonel yararları nedeniyle biyomedikal uygulamalarda auxetic yapılar büyük ilgi görmektedir [99]. Kalp damar hastalıklarında damar tıkanıklıkları önemli bir sorun olmaktadır [100]. Az sayıda araştırmacı, daralmış damarlara büzülebilen ve istenen pozisyona ulaştığında genişleyerek damarın menzilini artırmasına olanak tanıyan biyo uyumlu polimer bazlı bir auxetic tüp [86] ile çalışmıştır. Auxetic özellikli tüp damarlara yerleştirme sırasında büzülür ve artan kapasitesi nedeniyle büyüyüp genişleyebilir [101]. Auxetic tüp diğer tüplere göre daha yüksek basınç direncine ve bükülme momentine sahiptir (Şekil 4.17).



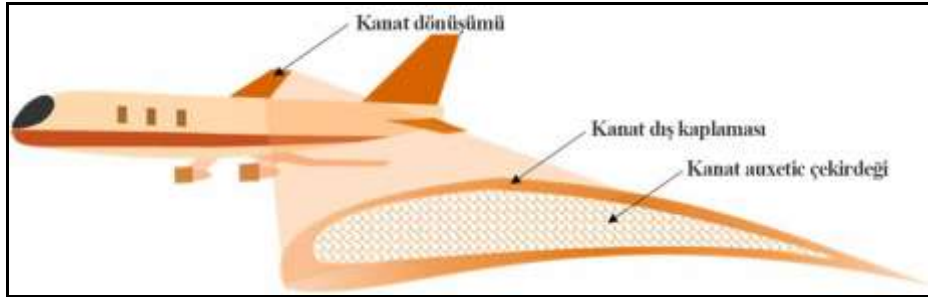
Şekil 4.17. Auxetic kalp damar stenti [99]

Auxetic bandaj, ilaç uygulamasında kullanımı nedeniyle büyük ilgi görmüştür [102]. Auxetic kumaş bandajlar [103], hastalıklı, yaralı veya şişmiş bölgelerde iyileşme sürecini hızlandırmaya yardımcı olmaktadır.

4.1.5. Havacılık endüstrisi

Havacılık endüstrisinde kanat profili uçuş stabilitesini, verimliliğini ve güvenliğini artırma açısından araştırmacıların ilgisini çekmiştir [104]. Hoe ve diğerleri, kiral yapıların Şekil 4.18’de gösterildiği gibi morphing aerofoillerin kanadını doldurmak için

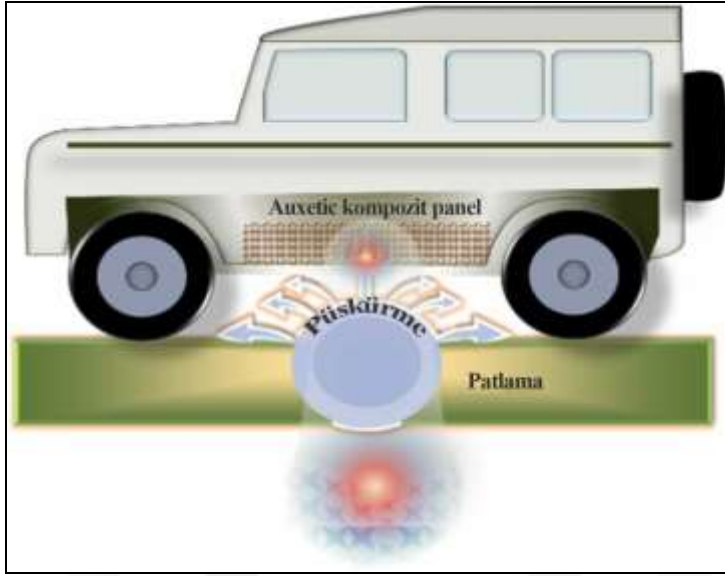
kullanılabileceğini ve kompozit morphing'in kiral çekirdekleri ile aeroelastik performansın önemli ölçüde arttığını savunmuştur [105]. Artan performans, sayısal analiz ve deneylerin bir karışımı kullanılarak gösterilmiştir [106,107]. Dahası, auxetic yapılar morphing kanat profilini titreşim kontrol yeteneklerini geliştirebileceğinin kanıtıdır. Buna rağmen, morphing hava folyosu tabanlı auxetic yapılar üzerine yapılan araştırmalar henüz başlangıç aşamasındadır. Auxetic yapılar ayrıca havacılık motorları oluşturmak ve tasarlamak için de kullanılmıştır.



Şekil 4.18. Auxetic kanat profilinde morphing panel [104]

4.1.6. Savunma sektöründe auxetic uygulamalar

Auxetic yapılar negatif poisson oranına sahip olması nedeniyle geleneksel malzemelere göre birçok alana entegre edilmeye başlamıştır. Auxetic yapılar daha ince ve daha hafif malzemeler olduğundan hem kişisel koruyucu ekipmanlarında hem de araç ve cihazlarda tercih edilmektedir. Auxetic yapılar iyi enerji sönümlerine özelliklerinden ötürü zırhlı personel araçlarının alt kısmında, patlamanın şiddetini azaltarak araç içindeki personeli yaralanma olasılığını azaltması amaçlanmıştır (Şekil 4.19) [108].



Şekil 4.19. Zırhlı araçlara yönelik hazırlanan auxetic sandviç ve koruyucu sistem [108]

5. MATERİYAL VE METOT

Bu tez çalışmasının ilk amacı, negatif poisson oranına sahip yeni yapılar tasarlamaktır. Bu sebeple bu başlık altında farklı geometrilerde, farklı kafes yapı çeşitleri ve değişken geometrik iç kalınlıklarda sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak negatif poisson oranları hesaplanmıştır. Ayrıca bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan birim hücre ve kafes yapıların tasarımı, üretim aşamasında kullanılan eklemeli imalat yöntemi ve deney aşamasında kullanılan ekipmanların özellikleri anlatılmıştır.

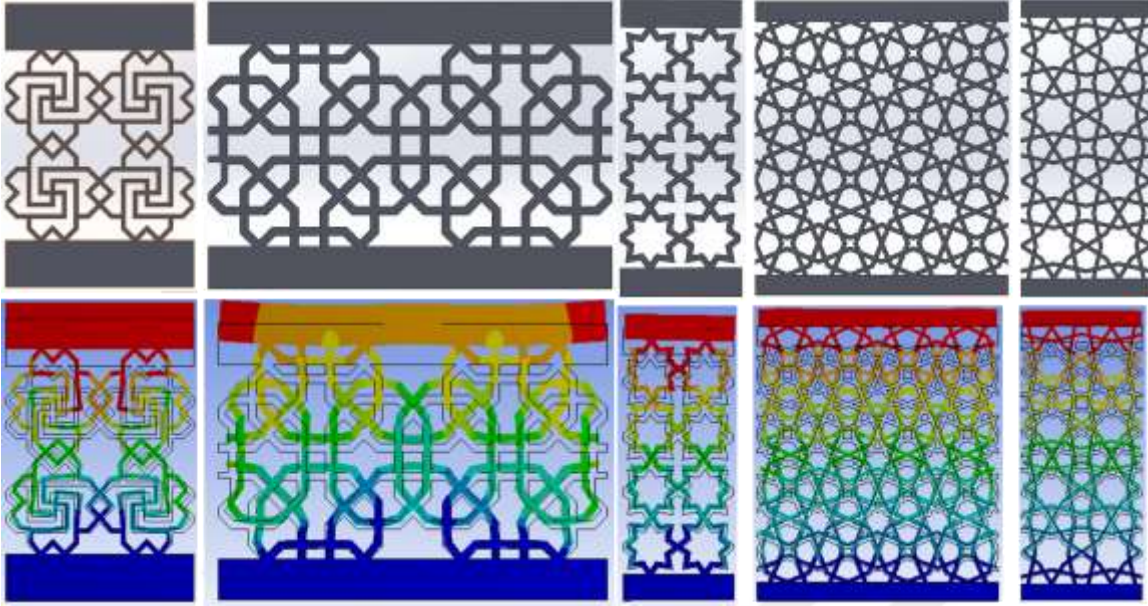
Birim hücrelerin değişken parametresi, t olarak ifade edilen geometrik iç kalınlığıdır. Tasarımın extrude kalınlığı ASTM E8 [16] standardına göre seçilmiştir (Ek-1).

Tasarım aşamasında, 2B çizimlerde AUTOCAD 2022 yazılım programı kullanılmış olup, kalınlık verilerek oluşturulan tasarımlar için SOLIDWORKS 2020 yazılım programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde ANSYS Workbench ve LS-DYNA programları kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında negatif poisson oranına sahip olan auxetic yapıların çekme ve eksplisit dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Üç farklı auxetic yapıdan en iyi auxetic özellik gösteren yapı seçilerek, bu yapının çekme ve basma testleri yapılarak, sonuçları değerlendirilmiştir. Deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçları göz önünde bulundurularak çalışılan auxetic yapı savunma sektöründe kullanılması planlanan bir ekipmana entegre edilerek, bu ürün için dinamik analizleri gerçekleştirilmiş ve çıkan sonuçlar literatürle yorumlanarak değerlendirilmiştir.

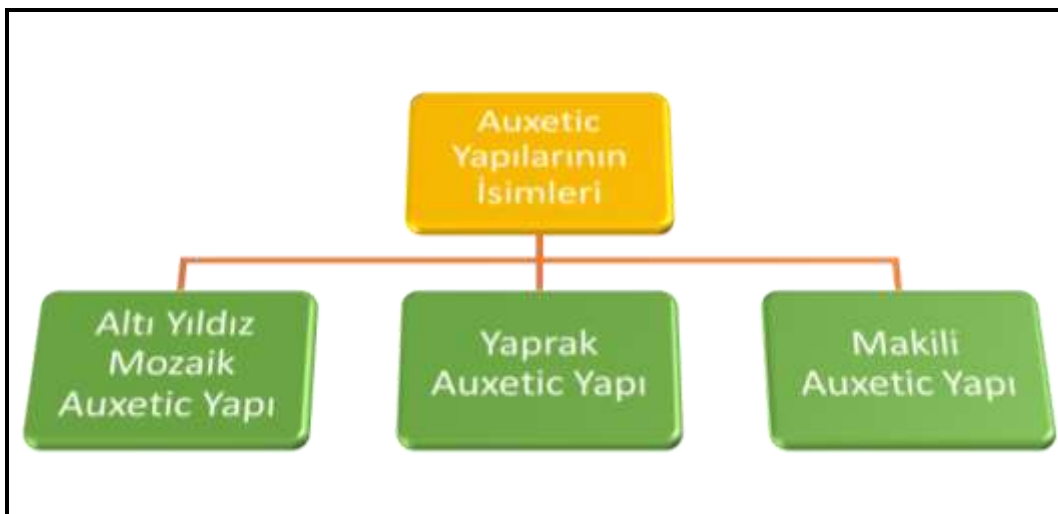
5.1. Tasarımların Oluşturulması

Bu tez kapsamında yeni auxetic yapı tasarımlarının oluşturulması amaçlanmıştır. Literatürde ki re-entrant, yıldız, balpeteği gibi çeşitli geometriler incelenmiş olup, bu yapılarla oluşan birim hücrelerin auxetic davranış sergileyip sergilemedikleri incelenmiştir. Bu kapsamda 8 farklı islami motiften yapılar çalışılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. (Şekil 5.1)



Şekil 5.1. Auxetic davranış sergileyecek yapıları belirlemek için deneme çalışmaları

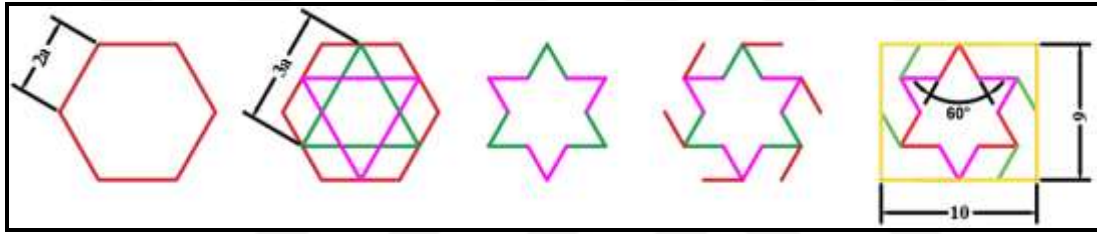
Ancak yapılan deneme çalışmaları sonucunda Şekil 5.1’de görülen yapıların pozitif poisson oranı sahip oldukları bulunmuştur. 3 tane farklı yapıda auxeticlik yani negatif poisson oranına sahip yapılar bulunmuştur. Tasarlanan birim hücreler aynalama çizim tekniği ile çoğaltılarak kafes yapıları oluşturulmuştur. Oluşturulan matrisli yapılardan auxetic davranış sergilemeleri beklenmektedir. 3 farklı yapı tasarımının tanımlaması Şekil 5.2’de ki gibi yapılmıştır.



Şekil 5.2. Auxetic yapı tanımlaması

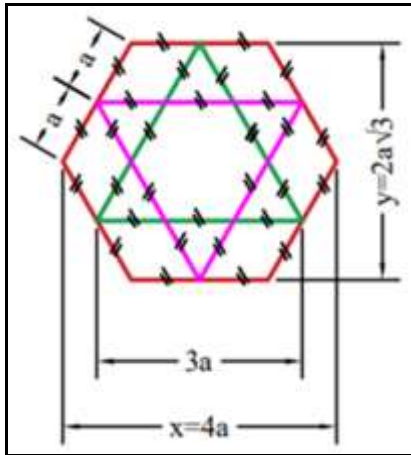
5.1.1. Altı yıldız mozaik auxetic yapı tasarımı

Birim hücrenin yapısı İslami motiften esinlenilerek tasarlanmıştır [109]. Bu tasarımdaki amaç negatif poisson oranına sahip yapıya ulaşmaktır. Tasarlanan birim hücre altıgen tabanlı çizim tekniği yöntemi ile çizilmiştir (Şekil 5.3). Çizim için öncelikle bir çember çizilir. Çemberin içerisine altıgen çizimi yapılır. Ardından oluşan altıgen tüm karşılıklı köşelerinden köşegenler çizilmiştir. Ardından içeride oluşan yeni altıgenin köşegenleri çizilmiştir. Böylece bir kenar üç eşit parçaya bölünmüştür. Ardından iç kısımda oluşan yıldız formu ile yıldızların uçlarındaki kollar oluşturularak birim hücre tasarımı gerçekleştirilmiştir.



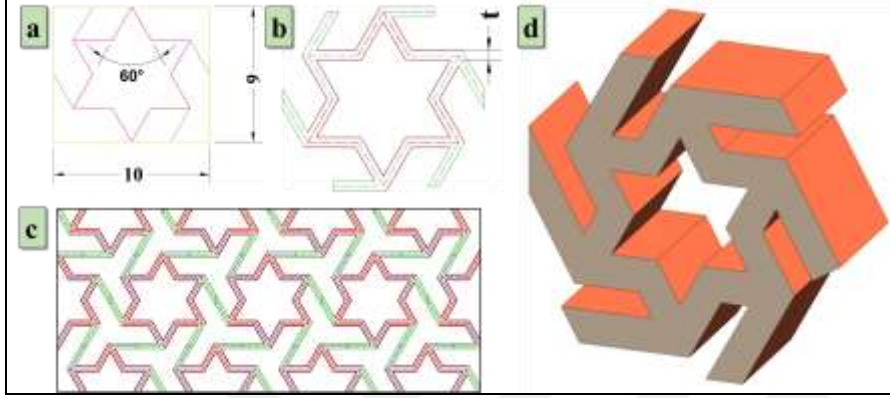
Şekil 5.3. Altıgen çizim tekniği ile birim hücre tasarımı

Birim hücrenin matematiksel modelinde çokgenin bir kenar ölçüsüne bağlı olarak çokgendeki diğer ölçüler elde edilmektedir. Şekil 5.4’de görüldüğü üzere a ölçüsü üzerinden x ve y uzunluklarına ulaşılmaktadır. Bu çalışmada matematiksel modelde tanımlanmış ölçüler sabit tutulup Şekil 5.4’de t olarak tanımlanan geometrik iç kalınlık ölçüsü değiştirilerek incelemeler yapılmıştır.



Şekil 5.4. Birim hücrenin matematiksel modeli

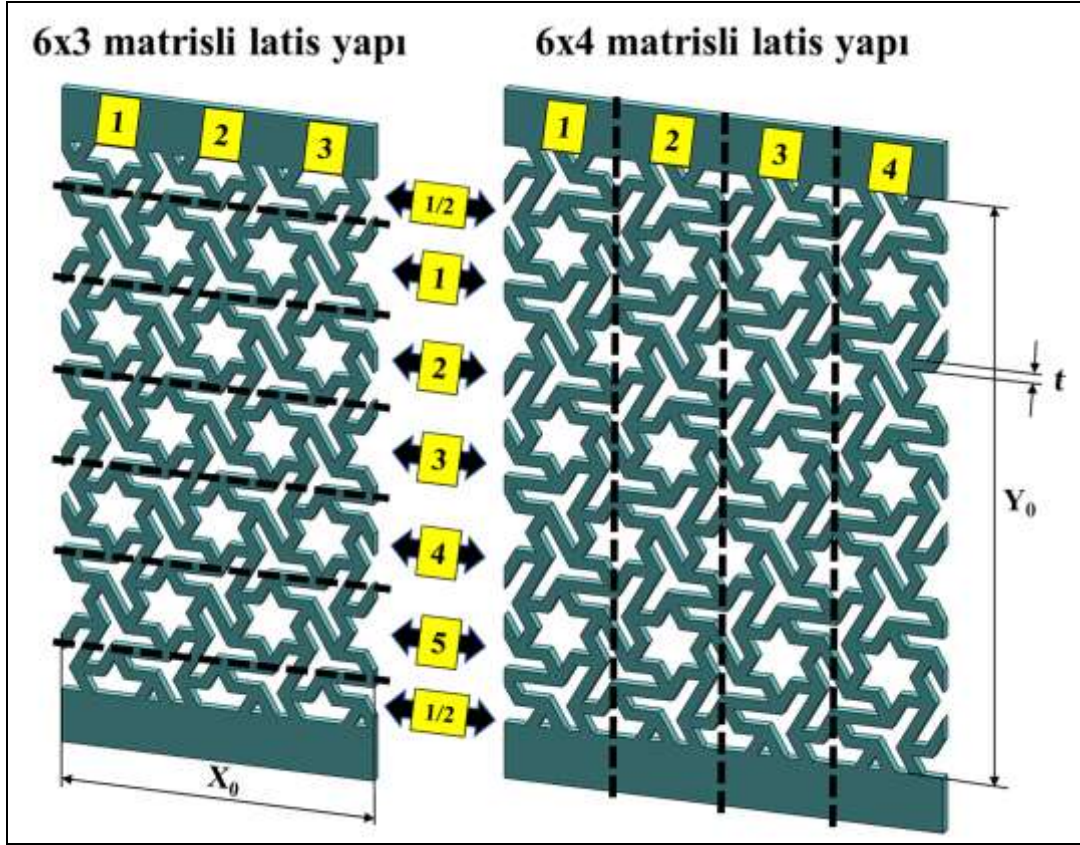
Analiz çalışmalarında kullanılan birim hücrenin negatif poisson oranına sahip olup olmadığını belirlemek için tasarlanan birim hücre düzenli bir şekilde yatay ve dikey çoğaltmalar ile hazırlanmıştır. İlk aşamada tasarlanan birim hücrenin ana hat çizgileri orta eksen kabul edilip, iki yönlü ofset yöntemi ile geometrik iç kalınlıklar oluşturulmuştur (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. (a) Birim hücre (b) birim hücreye ofset yöntemi ile kalınlık verilmesi (c) kalınlık verilen birim hücrenin çoğaltılmış görüntüsü (d) birim hücrenin üç boyutlu görüntüsü

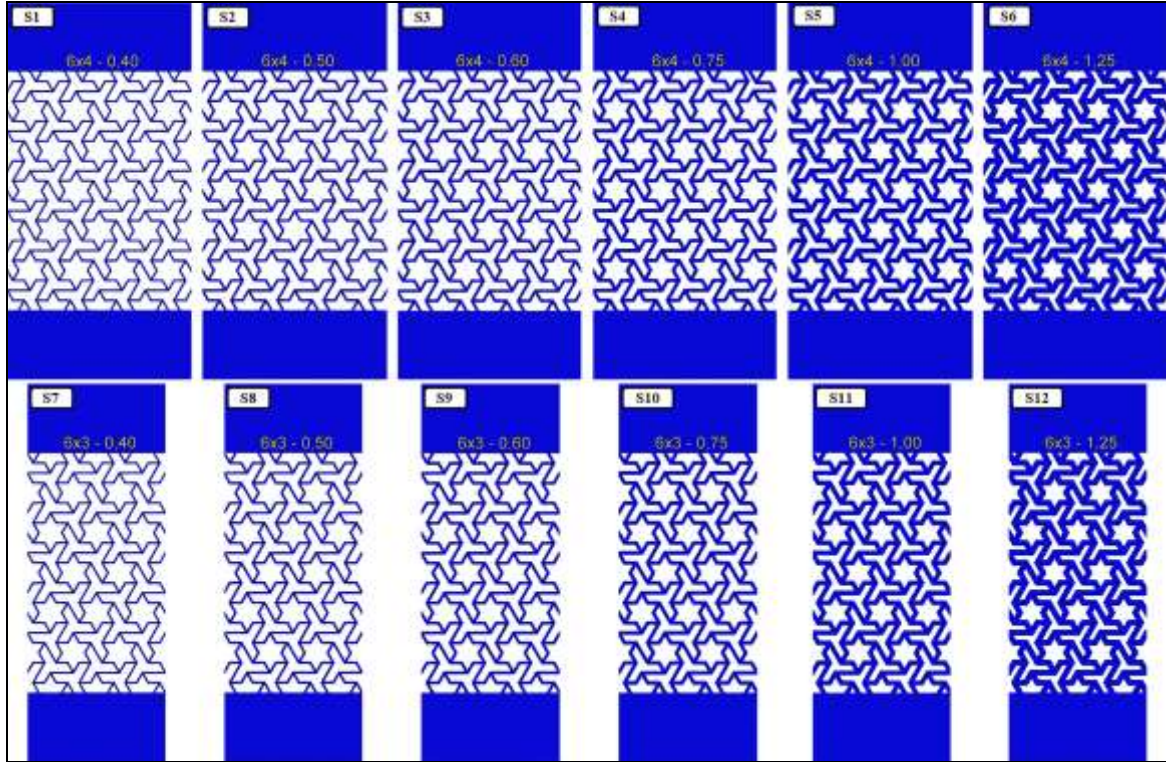
Birim hücrenin geometrik iç kalınlıkları değiştirilerek yapının negatif poisson oranı incelenmiştir. Çizelge 5.1’de değişken parametre olan geometrik iç kalınlığın ölçüleri verilmiştir.

Analizi yapılacak kafes yapılara, uygulanacak analiz yükünün düzgün dağılım göstermesi için tasarıma alt ve üst levhalar eklenmiştir. Tasarımların poisson oranları ve geometrik iç kalınlık ile olan ilişkileri irdelenmiştir. Ek olarak, aynı geometrik iç kalınlıklarının Şekil 5.6’da ifade edilen farklı yapı matrisleri ile olan ilişkileri de araştırılmıştır.



Şekil 5.6. Altı yıldız mozaik auxetic matris kafes yapı numaralandırması

Matrisli kafes yapılar seçilirken geometrinin ilk boy Y_0 eksen uzunluğunun, ilk boy X_0 eksen uzunluğuna oranının yaklaşık 1 değerine yakın olması hedeflenmiştir. Bu nedenle ilk aşamada 6x4 matrisli kafes yapı tasarlanarak poisson oranı hesaplanmıştır. Ardından yüksekliği sabit tutarak 6x3 matrisli yapının poisson oranı hesaplanmıştır. Ayrıca 6x2 ve 6x1 matrisli kafes yapılar içinde poisson oranı hesaplanmaya çalışılmış fakat 6x2 ve 6x1 matrisli kafes yapılarda y boyunun yüksek x genişliğinin düşük olmasından dolayı poisson oranı hesaplanamamıştır. 6x4 matrisli ve 6x3 matrisli yapı için x ve y uzunlukları ile geometrik iç kalınlık ölçüleri Çizelge 5.1’de, matrisli yapıların 3B görüntüleri Şekil 5.7’de verilmiştir.



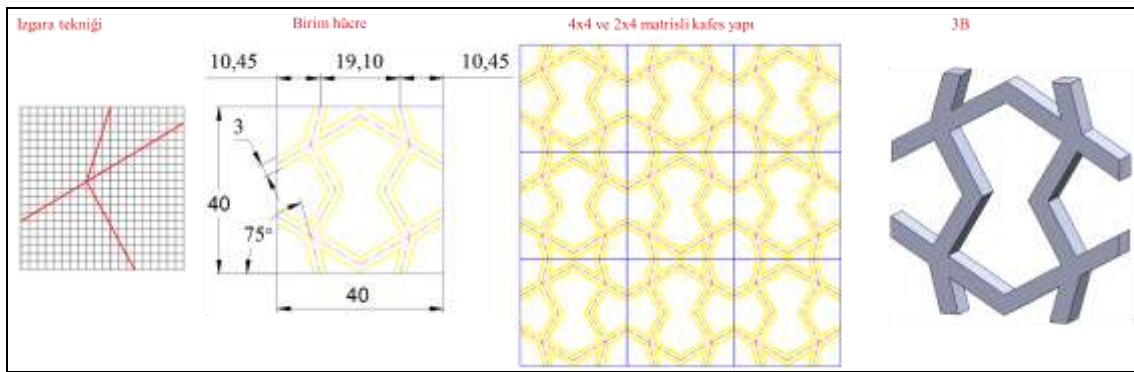
Şekil 5.7. Altı yıldız mozaik auxetic yapı kafes yapılarının 3B görselleri

Çizelge 5.1. 6x4 ve 6x3 matrisli kafes yapılar için x , y ve geometrik iç kalınlık ölçüleri

Numune no	Matris tipi	Geometrik iç kalınlık (t) (mm)	İlk boy X-ekseni [X_0 mm]	İlk boy Y-ekseni [Y_0 mm]
S1	6 x 4	0,40	40	52
S2	6 x 4	0,50	40	52
S3	6 x 4	0,60	40	52
S4	6 x 4	0,75	40	52
S5	6 x 4	1,00	40	52
S6	6 x 4	1,25	40	52
S7	6 x 3	0,40	30	52
S8	6 x 3	0,50	30	52
S9	6 x 3	0,60	30	52
S10	6 x 3	0,75	30	52
S11	6 x 3	1,00	30	52
S12	6 x 3	1,25	30	52

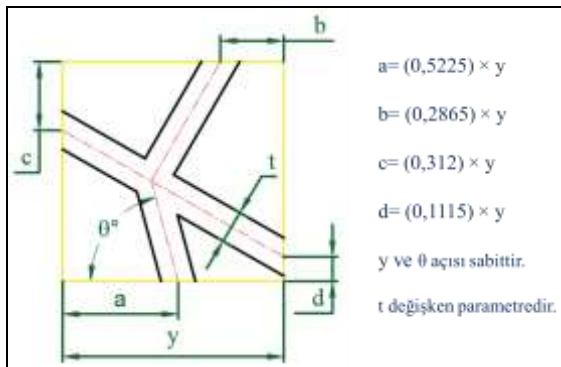
5.1.2. Yaprak auxetic yapı tasarımı

Birim hücrenin geometrisi bir mimari eserden esinlenerek ızgara yöntemi ile çizilmiştir [24]. Izgara çizim yönteminde desen çizilmeden önce desenin kendini tekrar etmeyen tek kısmı alınır ve aynalama tekniği ile çoğaltılır. Izgaraya yerleştirilen birim hücre çift yönlü kalınlık verilerek oluşturulur. Oluşan birim hücre aynalama tekniği ile çoğaltılarak kafes yapılar oluşturulmuştur (Şekil 5.8). Tasarımın amacı literatürdeki mevcut yapılara ek olarak özgün bir auxetic yapı sağlamaktır.



Şekil 5.8. Yaprak auxetic yapının çokgen çizim tekniği ile birim hücre çizimi ve kafes yapı oluşumu

Birim hücrenin matematiksel modeli Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Yaprak auxetic yapı tasarımında 20x20 ölçüsünde karenin içerisine birim hücrenin en küçük parçası yerleştirilmiştir. Yapıda y ve θ açısı sabit olup a , b , c , d değerleri y cinsinden yazılmıştır. Geometrik iç kalınlık (t) değeri değişken parametre olarak seçilerek geometrinin mekanik özelliklerinin nasıl tepki vereceğini öğrenmek amaçlanmıştır.

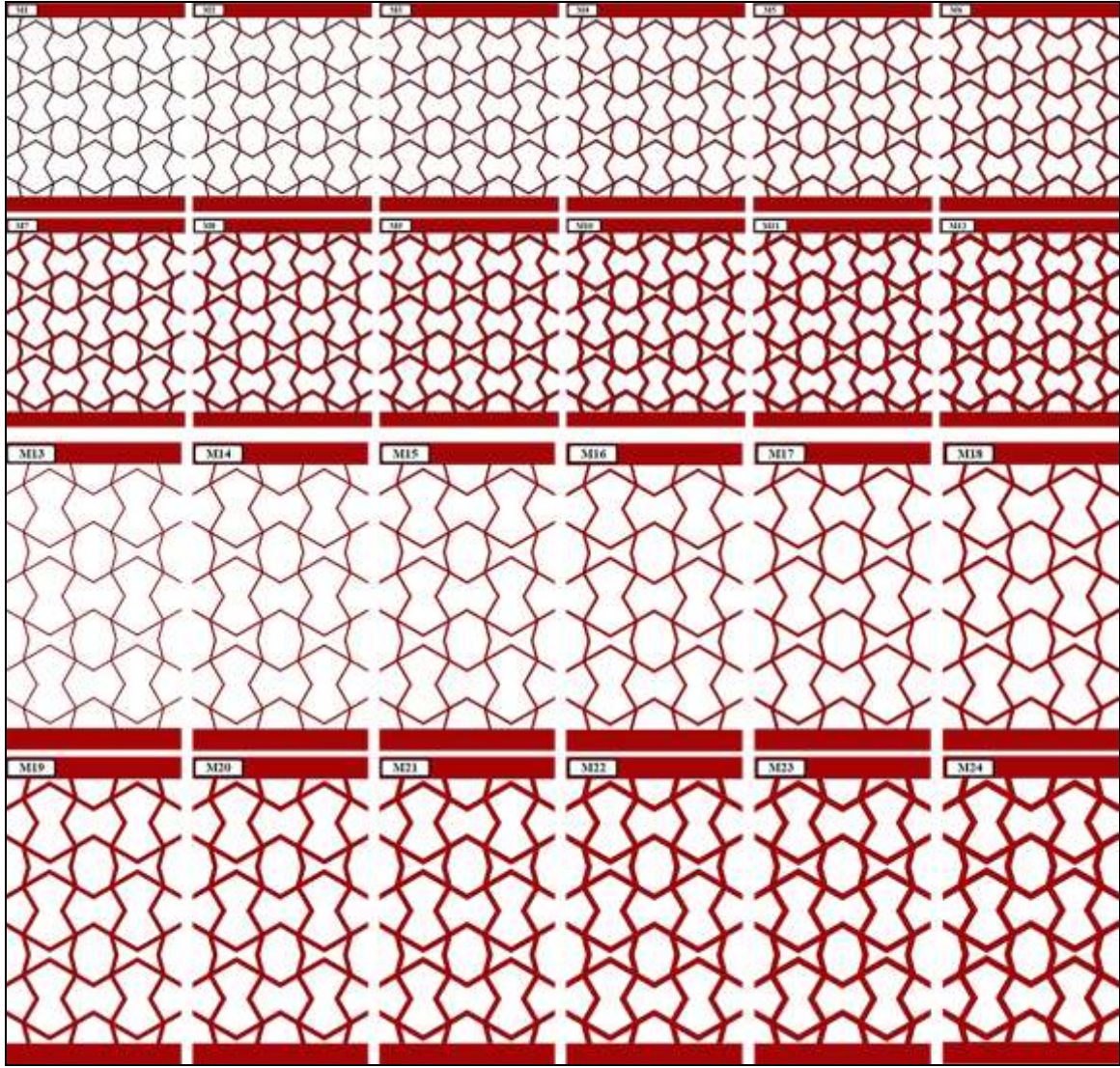


Şekil 5.9. Yaprak auxetic yapının matematiksel modeli

3x3 matrisli ve 2x3 matrisli yapı için x ve y uzunlukları ile geometrik iç kalınlık ölçüleri Çizelge 5.2’de, matrisli yapıların 3B görüntüleri Şekil 5.12’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. 3x3 ve 2x3 matrisli kafes yapılar için x, y ve geometrik iç kalınlık ölçüleri

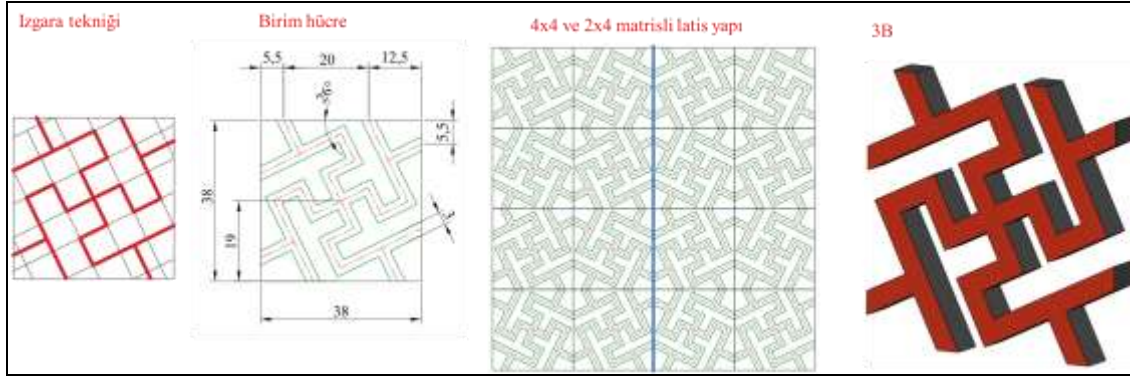
<i>Numune no</i>	<i>Matris tipi</i>	<i>Geometrik iç kalınlık (t) (mm)</i>	<i>İlk boy X-ekseni [Xo mm]</i>	<i>İlk boy Y-ekseni [Yo mm]</i>
M1	3 x 3	0,80	120	120
M2	4 x 4	1,00	120	120
M3	4 x 4	1,20	120	120
M4	4 x 4	1,40	120	120
M5	4 x 4	1,60	120	120
M6	4 x 4	1,80	120	120
M7	4 x 4	2,00	120	120
M8	4 x 4	2,20	120	120
M9	4 x 4	2,40	120	120
M10	4 x 4	2,60	120	120
M11	4 x 4	2,80	120	120
M12	4 x 4	3,00	120	120
M13	2 x 4	0,80	60	120
M14	2 x 4	1,00	60	120
M15	2 x 4	1,20	60	120
M16	2 x 4	1,40	60	120
M17	2 x 4	1,60	60	120
M18	2 x 4	1,80	60	120
M19	2 x 4	2,00	60	120
M20	2 x 4	2,20	60	120
M21	2 x 4	2,40	60	120
M22	2 x 4	2,60	60	120
M23	2 x 4	2,80	60	120
M24	2 x 4	3,00	60	120



Şekil 5.12. Yaprak auxetic yapı kafes yapılarının 3B görselleri

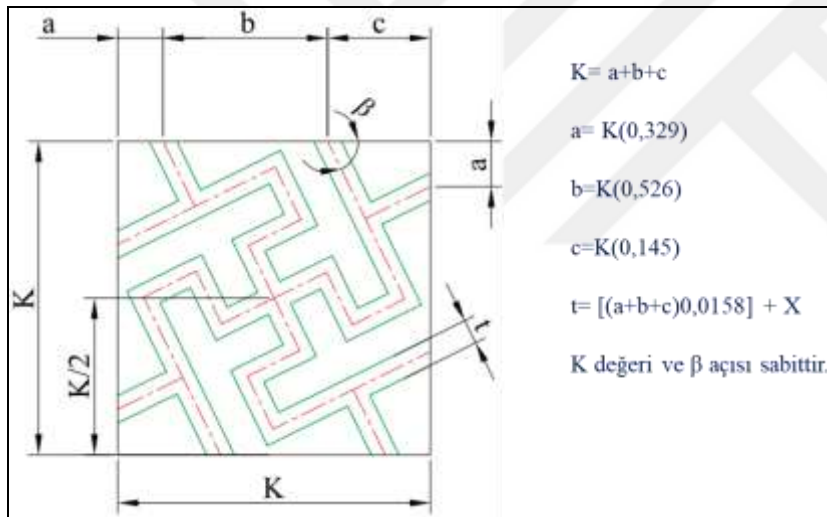
5.1.3. Makili auxetic yapı tasarımı

Makili auxetic yapı tasarımında yaprak auxetic yapıda olduğu gibi ızgara çizim tekniği ile modelleme yapılmıştır. Oluşan birim hücreye çift yönlü kalınlık verilerek aynalama tekniği ile çoğaltmalar yapılmış ve kafes yapılar oluşturulmuştur. Bu tasarımda da diğer tasarımlarda olduğu gibi özgün bir auxetic yapı tasarlamak amaçlanmıştır. 2B ve 3B çizimleri Şekil 5.13’de ki gibi yapılmıştır.



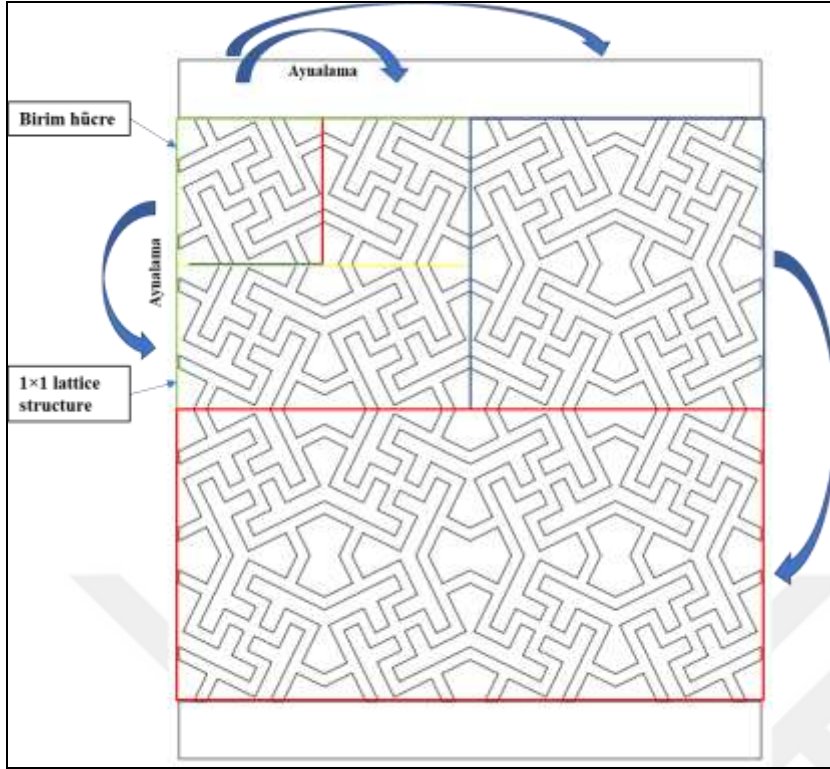
Şekil 5.13. Makili auxetic yapının ızgara tekniği ile birim hücre çizimi ve kafes yapı oluşumu

Birim hücrenin matematiksel modeli Şekil 5.14'de gösterilmiştir. Yapıda K ve β açısı sabit olup a , b , c değerleri K cinsinden yazılmıştır. Geometrik iç kalınlık (t) için x değeri 0,2'dir.



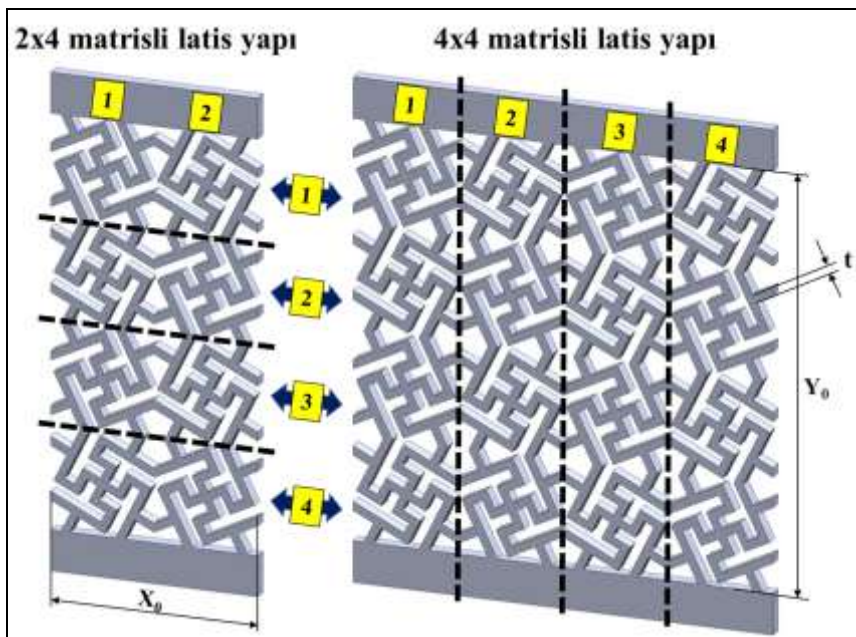
Şekil 5.14. Makili auxetic yapının matematiksel modeli

Tasarlanan birim hücrelerden aynalama yöntemi ile 4x4 ve 2x4 matris yapıları oluşturulmuştur. Birim hücre ilk olarak dikey yönde sağ tarafa doğru aynalanacak çizgi seçilerek aynalanmıştır. Daha sonra aynalanan kısımlar tekrar seçilerek bu sefer yatay yöndeki çizgi seçilerek 1x1 matris yapısı oluşturulmuştur. Bu yöntemle gerekli çoğaltmalar yapılmış ve istenilen miktarlarda matrisler elde edilmiştir (Şekil 5.15).



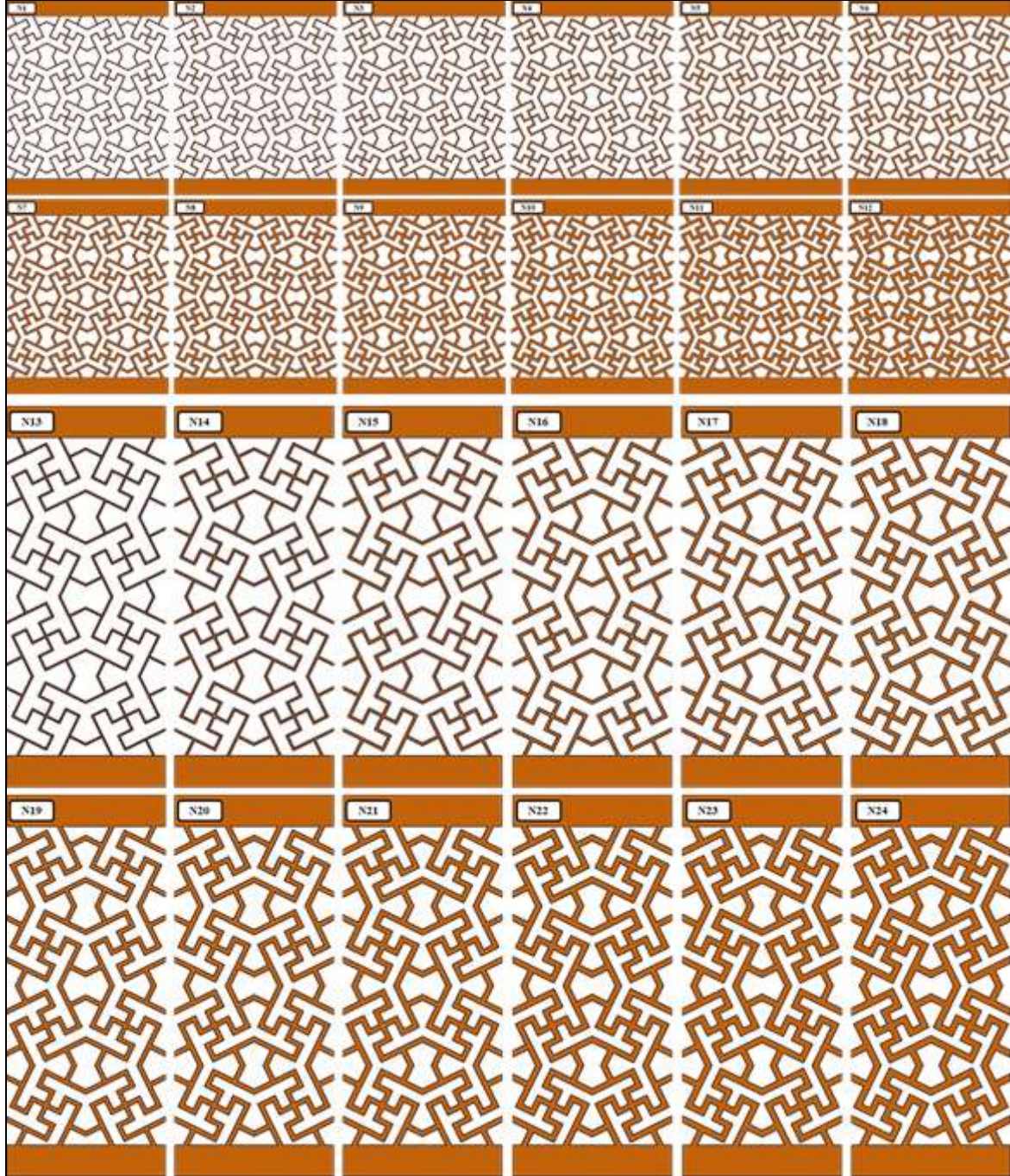
Şekil 5.15. Makili auxetic yapının matrisli olarak modelleme süreci

Aynalama yöntemi ile çoğaltmanın amacı ardışık birim hücreler oluşturmaktır. Matrislerin farklı olması, geometrik iç kalınlık parametresine ek olarak poisson oranı ile ilişkisinin incelenmesi için gereken bir diğer parametredir (Şekil 5.16).



Şekil 5.16. Makili auxetic yapının matris şeklinin oluşturulması

4x4 ve 2x4 matrisli kafes yapılarının, negatif poisson oranı üzerine etkisi incelenmiştir. 4x4 matrisli ve 2x4 matrisli yapı için x ve y uzunlukları ile geometrik iç kalınlık ölçüleri Çizelge 5.3’de, matrisli yapıların 3B görüntüleri Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17. Makili auxetic yapı kafes yapılarının 3B görselleri

Çizelge 5.3. 4x4 ve 2x4 matrisli kafes yapılar için x, y ve geometrik iç kalınlık ölçüleri

<i>Numune no</i>	<i>Matris tipi</i>	<i>Geometrik iç kalınlık (t) (mm)</i>	<i>İlk boy X-ekseni [Xo mm]</i>	<i>İlk boy Y-ekseni [Yo mm]</i>
N1	4 x 4	0,80	152	152
N2	4 x 4	1,00	152	152
N3	4 x 4	1,20	152	152
N4	4 x 4	1,40	152	152
N5	4 x 4	1,60	152	152
N6	4 x 4	1,80	152	152
N7	4 x 4	2,00	152	152
N8	4 x 4	2,20	152	152
N9	4 x 4	2,40	152	152
N10	4 x 4	2,60	152	152
N11	4 x 4	2,80	152	152
N12	4 x 4	3,00	152	152
N13	2 x 4	0,80	76	52
N14	2 x 4	1,00	76	152
N15	2 x 4	1,20	76	152
N16	2 x 4	1,40	76	152
N17	2 x 4	1,60	76	152
N18	2 x 4	1,80	76	152
N19	2 x 4	2,00	76	152
N20	2 x 4	2,20	76	152
N21	2 x 4	2,40	76	152
N22	2 x 4	2,60	76	152
N23	2 x 4	2,80	76	152
N24	2 x 4	3,00	76	152

5.2. Auxetic Yapı Tasarımlarının Yarı-Statik Analizleri

Yeni tasarlanan 3 farklı yapıda, geometrik iç kalınlığı ile poisson oranı arasındaki ilişkisini tespit etmek için sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Poisson oranı hesaplanırken sonlu elemanlar analiz programı olarak Ansys 17.0 kullanılmıştır. Tasarımlar Solidworks programından .x_t dosya formatında kaydedilerek Ansys 17.0 programına aktarılmıştır.

Bütün tasarımlarda malzeme olarak AlSi10Mg kalite alüminyum alaşımı atanmıştır (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4. AlSi10Mg için mekanik özellikler [119]

	Yoğunluk (g/cm ³)	Poisson oranı	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)
AlSi10Mg	2,68 g/cm ³	0,33	440	240	70

5.2.1. Auxetic yapı tasarımları için eleman ağı (mesh) yakınsaması

Sonlu elemanlar analiz çalışmalarında analiz sonuçlarının doğruluk hassasiyetini arttırmak için mesh kalitesi oldukça önem teşkil etmektedir. Bu sebeple mesh aşamasında düğüm noktaları ne kadar çok olursa, analizlerin sonuçlarının doğruluğuda bir o kadar fazla olmaktadır. Tasarımları gerçekleştirilen auxetic yapılarda mesh kalitesine karar vermek için bir tasarımda pilot çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışılan auxetic yapılar isotropic özellikte olduğu için mesh olarak “body sizing” mesh seçilmiştir. Pilot çalışma 0,40 mm geometrik iç kalınlığa sahip olan yapıda von mises geriliminin üzerinden gidilerek mesh yakınsaması yapılmıştır. Von mises gerilimi maksimum seviyeye ulaşana kadar meshlerdeki ağ modellerinde yapılan uygulamalarla mesh yakınsaması gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde yapılan çalışma ile en temel ve en doğru yöntem kullanılmış olmaktadır (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. 6 yıldız mozaik auxetic yapının ayarlanabilir meshli kafes yapı görünümü (a) %20 ayarlaması mesh modeli (b) %5 ayarlamalı mesh modeli (c) %0 ayarlamalı mesh modeli

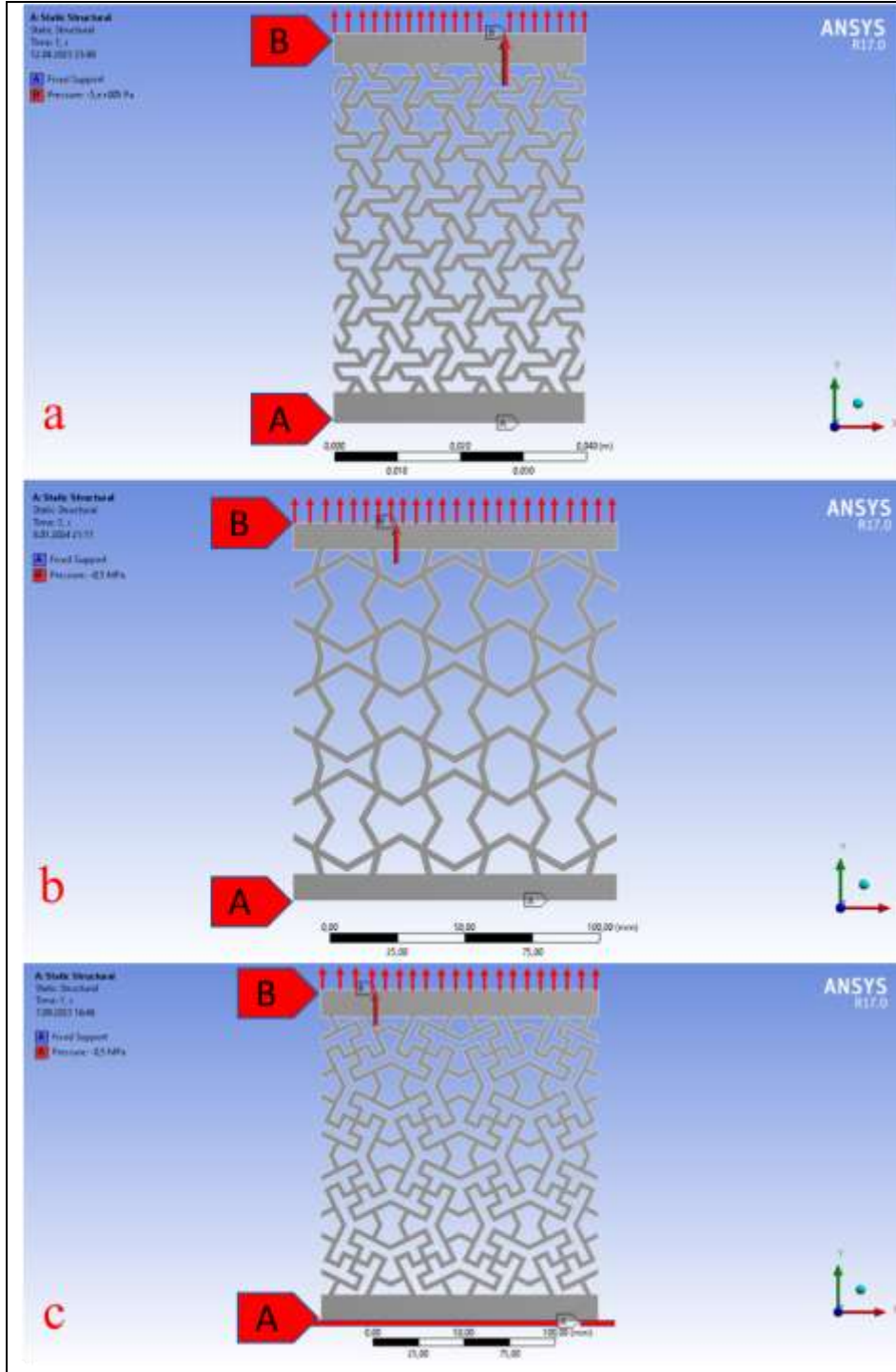
Analiz, programın yakınsama sekmesinde default olarak gelen ayarlanabilir değişken değeri %20 ile mesh modellemesi yapılarak çözdürülmüştür. Bu şekilde belirlenen düğüm nokta sayısı 298484 olarak bulunmuştur. Ardından ayarlanabilir değişken değeri %5 olarak değiştirilmiş ve analiz tekrar çözdürülmüştür. Bu durumda çıkan düğüm noktası sayısı 1092088 olarak bulunmuştur. Von Mises gerilim değeri bu yakınsama ile %22,58 artarak 26,432 MPa çıkmıştır. Daha sonra ayarlanabilir değişken değeri %0 seçilerek tekrar çözümleme yapıldığında ise düğüm nokta sayısı 2068716 ile en yüksek değere ulaşmıştır. Von Mises değeri 31,265 MPa çıkmıştır ve bu sonuca göre mesh yakınsaması %0 değişken değerine düzenlenerek analizler gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.5. Mesh yakınsaması ile von Mises geriliminin değişim,

Ayarlanabilir mesh yüzdesi (%)	von Mises gerilimi (Mpa)	Değişim yüzdesi (%)	Düğüm noktası	Eleman sayısı
Default %20	21,07	Default	298484	55230
5%	26,432	22,58	1092088	651538
0%	31,265	16,752	2068716	1317447

5.2.2. Auxetic yapı tasarımında yarı-statik analizler için sınır koşulları

Tasarımlar için oluşturulan sınır koşulu Şekil 5.19’da detaylıca verilmiştir. A bayrağı ile gösterilen kısım sabitlenirken, B bayrağı ile gösterilen ve aynı zamanda oklarla da ifade edilen kısım ise -0,5 Mpa basınç uygulanarak çekme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.19. Auxetic yapıların sınır koşulları (a) altı yıldız mozaik auxetic yapının sınır koşulları (b) yaprak auxetic yapının sınır koşulları, (c) makili auxetic yapının sınır koşulları

5.2.3. Auxetic yapı tasarımında poisson oranı hesabı

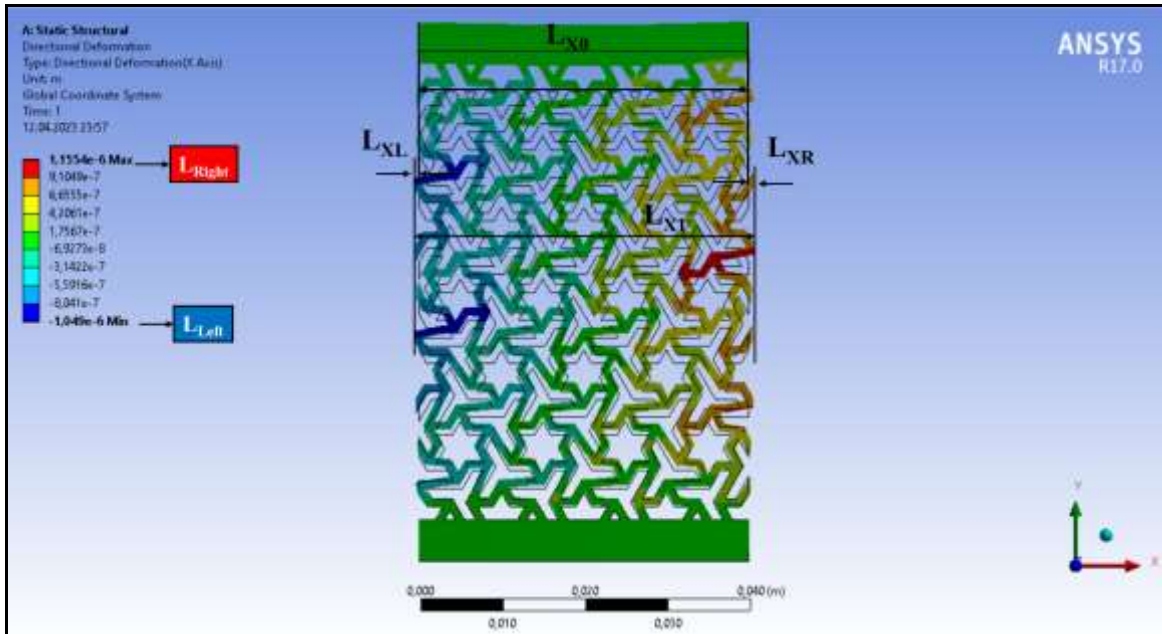
Çalışılan yapıların poisson oranları, X eksenindeki enine uzama oranının, Y eksenindeki boyuna uzama oranına oranlanması ile elde edilmektedir. Poisson oranı birimsizdir ve “ ν ” ile gösterilmektedir.

$$L_{X1} = L_{X0} + L_{XL} + L_{XR} \quad (5.1)$$

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_{X0}} = \frac{L_{X1} - L_{X0}}{L_{X0}} \quad (5.2)$$

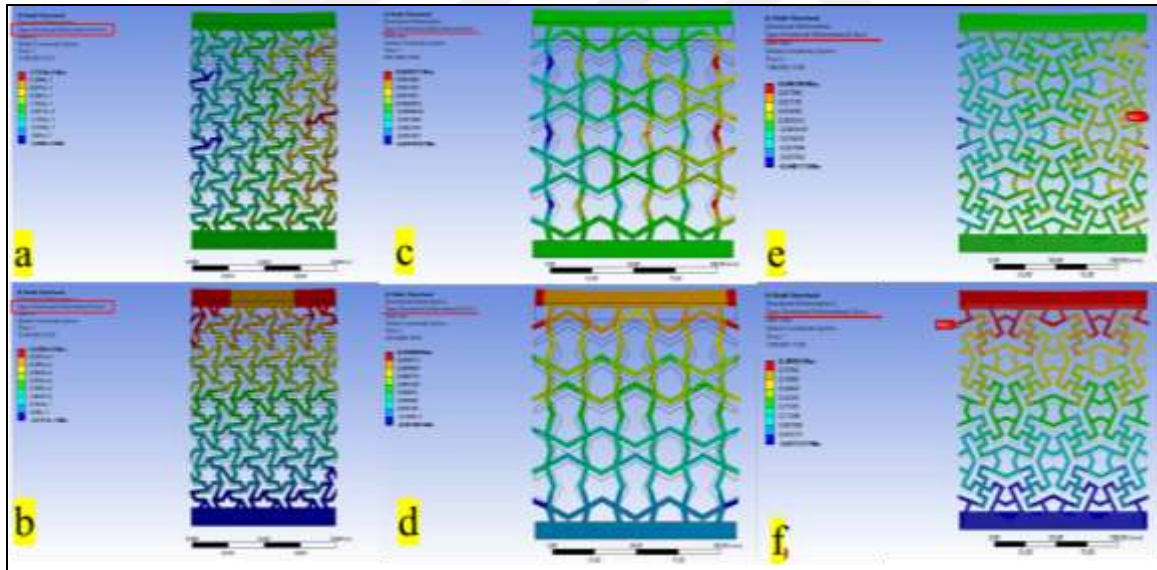
$$\epsilon_y = \frac{\Delta L_y}{L_{y0}} = \frac{L_{y1} - L_{y0}}{L_{y0}} \quad (5.3)$$

Eş. 5.1 L_{X1} 'i hesaplamak için formüle edilmiştir. Eş. 5.2'de ϵ_x ile Eş. 5.3'te ϵ_y tanımlanmıştır. L_{XL} ve L_{XR} 'i hesaplama yöntemi Şekil 5.20'de detaylandırılmıştır.



Şekil 5.20. Auxetic yapı için ΔL_x şematik gösterimi

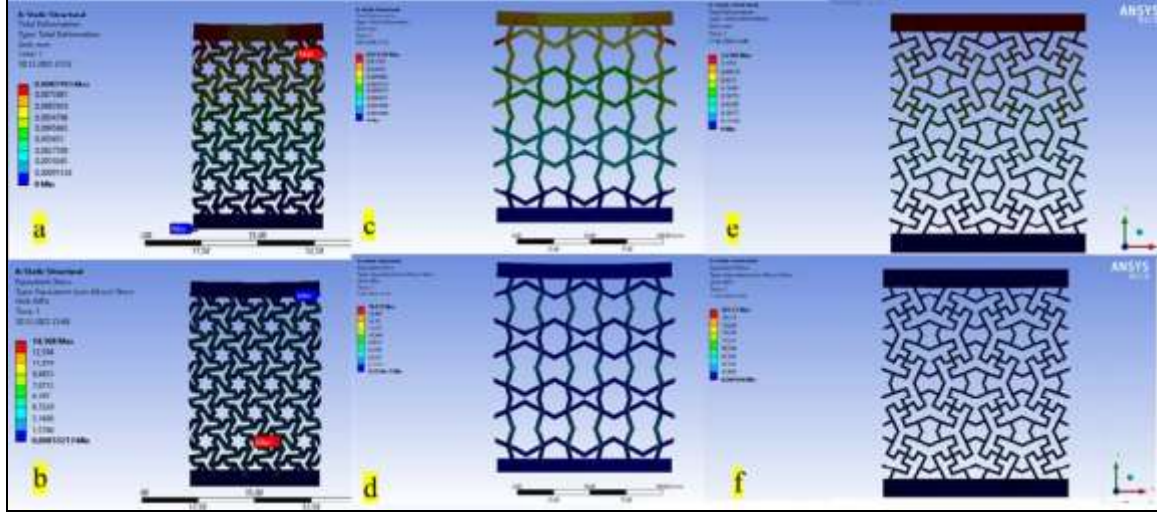
Auxetic yapıların poisson oranını belirlemek için, enine uzama olarak ifade edilen X yönündeki şekil değişimleri ve boyuna uzama olarak ifade edilen Y yönündeki şekil değişimlerine bakılmıştır (Şekil 5.21). Altı yıldız mozaik auxetic yapının X yönündeki şekil değişimi 1,00 mm geometrik iç kalınlıkta, X_0 : 40 mm olan ölçü çekme kuvveti ile yaklaşık 2,2 mm genişleyerek 42,22 mm, Y_0 : 52 mm'den uzamanın etkisi ile yaklaşık 5,5 mm artarak 57,5 mm gelmektedir. Yaprak auxetic yapısının ise 2,00 mm iç geometrideki auxetic yapı örnek ele alınarak X yönündeki şekil değişimi X_0 : 120 mm'den 0,01 genişleyerek 120,01 mm, Y yönündeki şekil değişiminde Y_0 : 120 mm'den çekme kuvvetinin etkisiyle 120,013 mm ölçülmüştür. Makili auxetic yapı tasarımında 2,00 mm geometrik iç kalınlık örnek olarak alınmış olup X yönündeki şekil değişimi X_0 : 152'den 0,096 mm genişleyerek 152,096 mm, Y yönündeki şekil değişimi ise Y_0 : 152 mm 0,38 mm uzayarak 152,38 mm olarak ölçülmüştür. Yapıların X ve Y yönündeki değişen değerlerine göre yapıların auxetic özellik göstermiş olduğu gözlenmektedir.



Şekil 5.21. Auxetic yapıların X ve Y yönündeki şekil değişimleri (a) altı yıldız mozaik auxetic yapıda X yönündeki şekil değişimi (b) altı yıldız mozaik auxetic yapıda Y yönündeki şekil değişimi (c) yaprak auxetic yapıda X yönündeki şekil değişimi (d) yaprak auxetic yapıda Y yönündeki şekil değişimi (e) makili auxetic yapıda X yönündeki şekil değişimi (f) makili auxetic yapıda Y yönündeki şekil değişimi

X ve Y yönüne şekil değişimlerine ek olarak tasarımın çekme analizinin şekil değişimlerinden ötürü toplam deformasyon ile akma mukavemeti gerilim limit değeri için von Mises gerilim çözümlemeleri de yapılmıştır. Şekil 5.22'de altı yıldız mozaik auxetic

yapıda 1,00 mm geometrik iç kalınlıkta toplam deformasyon miktarı 0,008 mm gelirken, von Mises gerilimi değeri 14,168 MPa olarak ölçülmüştür. Yaprak auxetic yapıda 2,00 mm geometrik iç kalınlıkta toplam deformasyon değeri 0,013 mm, von Mises gerilimi 19,016 MPa olarak bulunmuştur. Makili auxetic yapıda ise toplam deformasyon 0,382 mm iken von Mises gerilimi 95,715 MPa bulunmuştur.



Şekil 5.22. Auxetic yapıların toplam deformasyon ve von Mises gerilimleri a) altı yıldız mozaik auxetic yapıda toplam deformasyon (b) altı yıldız mozaik auxetic yapıda von Mises gerilimi (c) yaprak auxetic yapıda toplam deformasyon (d) yaprak auxetic yapıda von Mises gerilimi (e) makili auxetic yapıda toplam deformasyon (f) makili auxetic yapıda von Mises gerilimi

5.3. Auxetic Yapı Tasarımında Eksplisit Dinamik Analizler

Dinamik analiz için tasarımlara öncelikle HyperMesh yazılım programı kullanılarak mesh modelleri yapılmıştır. Hazırlanan meshli modeller LS-Prepost yazılımı kullanılarak analiz için ön hazırlıklar tamamlanmıştır. Hazırlanan modellerin eksplisit dinamik analizleri LS-DYNA sonlu elemanlar programı kullanarak gerçekleştirilmiştir. Detaylı olarak açıklamaları 6. bölümde verilmiştir.

5.4. Auxetic Yapının Eklemeli İmalatı

Numuneler seçici lazer eritme tekniği ile, SLM Solutions 280 2.0 makinesi, lazer spot boyutu 80 μm ve dalga boyu 1070 nm ile üretilmiştir. Üretim 700 W lazer gücünde ve 60 μm katman kalınlığında gerçekleştirilmiştir. Malzeme olarak AlSi10Mg kullanılmıştır.

Numunelerin üretiminde virgin+reused karışımı toz kullanılmıştır. Üretim sonrasında parçalara gerilim giderme işlemi uygulanmış ve destek yapıları temizlenmiştir.

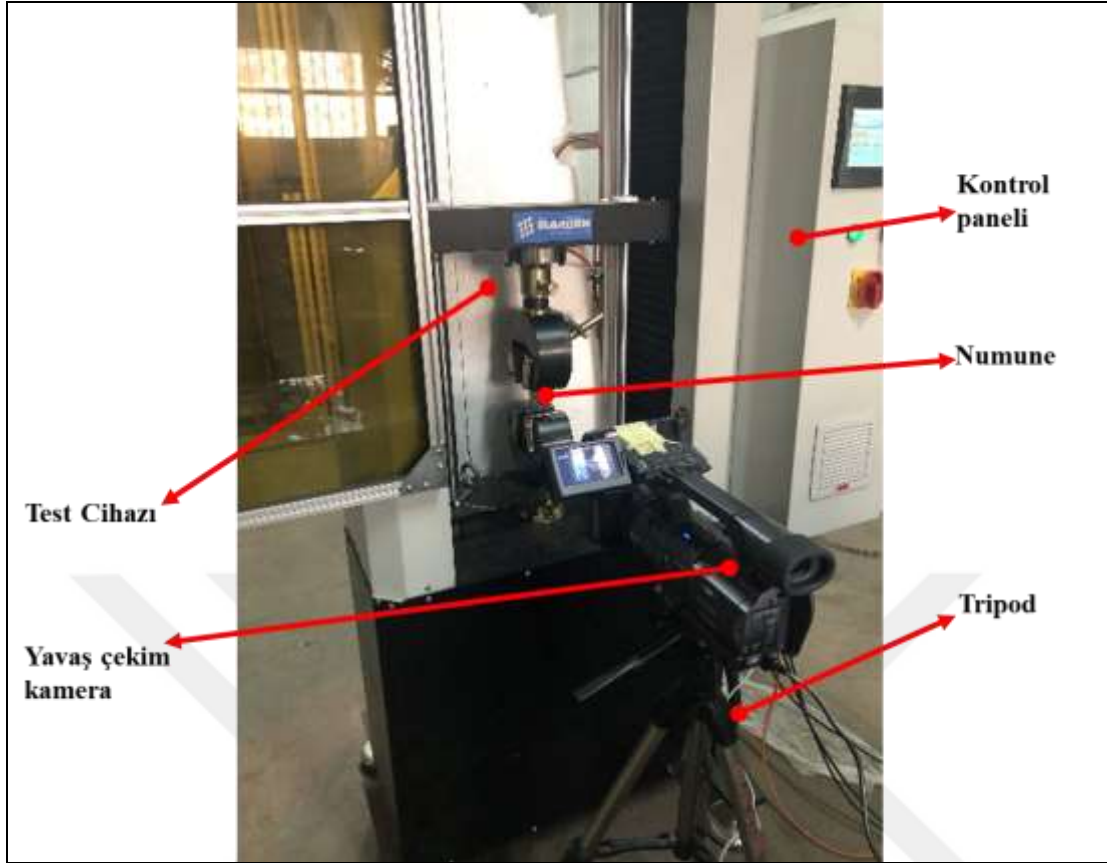
5.5. Auxetic Yapının Deneysel Çalışmasında Kullanılan Ekipmanlar

Deneyleri gerçekleştirilecek numunelere çekme ve basma testleri uygulanmıştır. Üretilen numunelerin ölçüsel kontrolleri ve deney sonrası ölçümleri MITUTOYO marka PJ-A3000 model profil projeksiyon ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Resim 5.1).



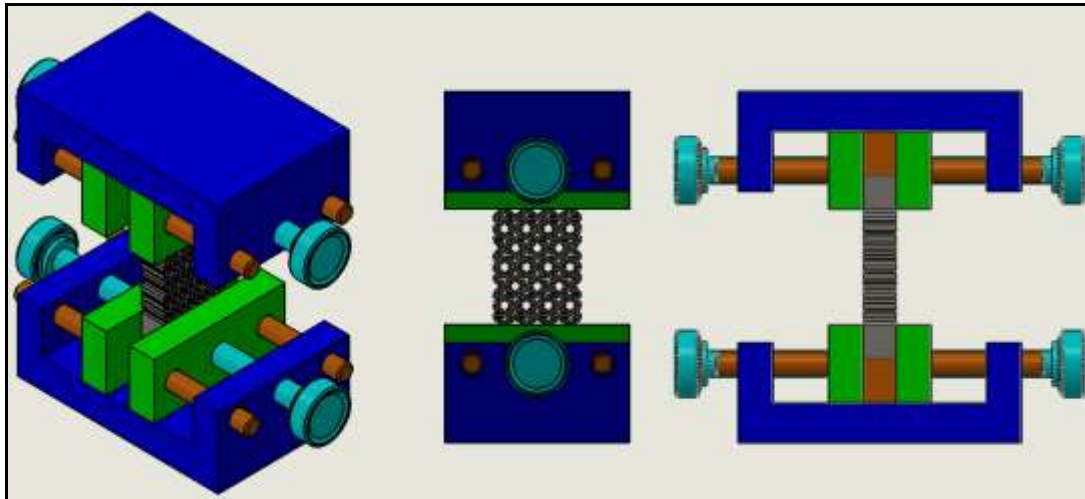
Resim 5.1. Profil projeksiyon ile numune ölçümleri

Üretilen numuneler için çekme ve basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan test numunelerine 5 ton kapasiteli RAAGEN ETM50S marka çekme-basma test makinesinde 1 mm/dak ilerleme hızında çekme ve basma testleri uygulanmıştır. Çekme ve basma testleri, numunelerde ilk kırılma gerçekleşene kadar uygulanmıştır. Tek tek birim hücrelerin eksenel ve yanal hareketlerini yüksek çözünürlükte kaydetmek için tripod üzerine bir yavaş çekim kamerası kurulmuştur (Resim 5.2).



Resim 5.2. Numuneler için hazırlanan deney düzeneği

Deney numunelerinde çekme testi için numunenin kalınlığı 5 mm olarak alınmıştır. Basma testinde düzlem içi deformasyonun sağlanması için numune kalınlığı 15 mm olarak üretilmiştir. Ayrıca basma testinde kullanılan ASTM C364 standardına göre fikstür tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.23) (Ek-2).



Şekil 5.23. ASTM C364 standardına uygun fikstür tasarımı

Fikstür 4140 kalite alaşımlı çelikten üretilmiş olup, üretim sonrası 45 HRC ısıl işleme tabi tutulmuştur. Son işlem olarak sert krom kaplama yapılmıştır (Resim 5.3).



Resim 5.3. İmalatı gerçekleştirilmiş fikstür

Tüm basma ve çekme işlemi, yapının farklı bölümlerinin yer değiştirme modellerinin daha ayrıntılı analizi için baştan sona video kaydına alınmıştır. Numunelerin basma ve çekme yükü altında yanal ve uzunlamasına yer değiştirmesini hesaplamak için, deforme olmayan bir numunenin bilinen bir başlangıç boyutu, kıyaslama olarak ImageJ yazılımı ile ölçülmüştür. Yazılım, bilinen uzunluğu belirli piksel sayısına dönüştürür ve buna bağlı olarak, saptırılan örneklerin boyutlarını hesaplar. Deforme görüntülerden elde edilen yanal ve boylamsal yer değiştirmeler ile poisson oranı hesaplanmıştır.



6. TASARIM DOĞRULAMA VE ANALİZ ÇALIŞMALARI

6.1. Auxetic Yapıların Poisson Oranı Hesabı

6.1.1. Altı yıldız mozaik auxetic yapı için poisson oranı hesaplaması

Bu çalışmada tasarlanan matrisli yapının sonlu elemanlar analizi ile poisson oranı incelenmiştir. Geometrik iç kalınlık değişkenlerinde 6 farklı kalınlık ile 6x4 ve 6x3 matrisli olarak toplam 12 farklı yapı incelenmiştir. 12 farklı tasarıma da aynı yük çekme işlemi uygulanmıştır. X ve Y eksen yönündeki şekil değişimleri incelenmiştir. 5. bölümde ifade edildiği gibi poisson oranları hesaplanmıştır.

Eş. 5.1 ile poisson oranını bulabilmek için, x eksenindeki enine uzama ile y eksenindeki boyuna uzama Eş. 5.2 ve Eş. 5.3 kullanılmıştır. 5 numaralı numune için x eksen deformasyon değeri 0,002318, y eksen deformasyon değeri 0,00564280'dir. Aşağıdaki formüller ile hesaplanan poisson oranı;

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_{x0}} = \frac{L_{x1} - L_{x0}}{L_{x0}} = \frac{0,0023108}{40} = 5,78E - 5$$

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta L_y}{L_{y0}} = \frac{L_{y1} - L_{y0}}{L_{y0}} = \frac{0,0056428}{52} = 1,09E - 4$$

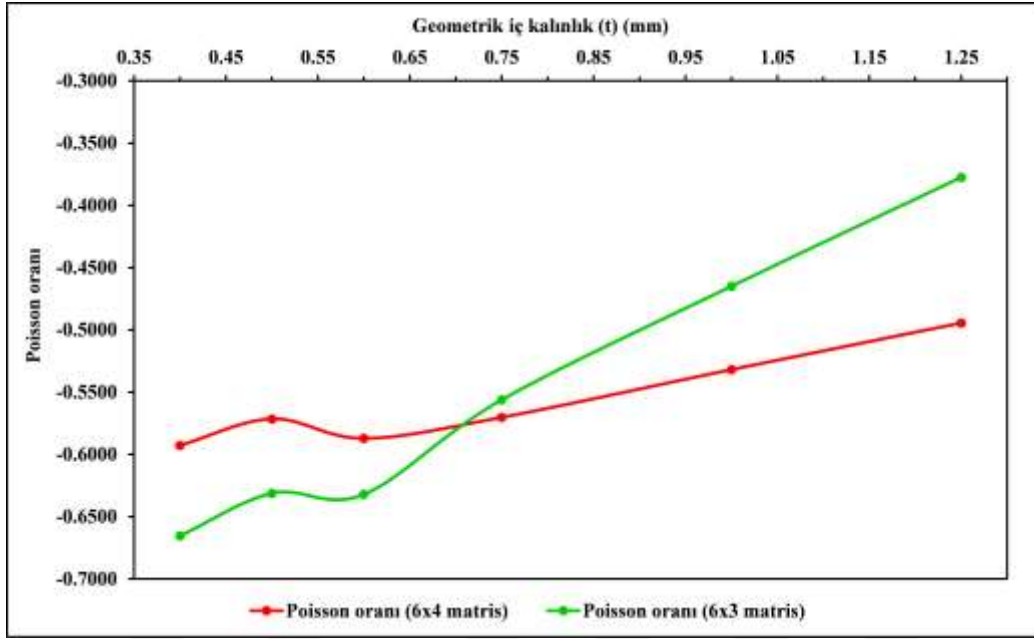
$$\nu = - \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = \frac{5,78E - 5}{1,09E - 4} = -0,531973$$

Seçilen numune için poisson oranı -0,531973 olarak bulunmuştur. Diğer yapılarda da poisson oranı aynı şekilde bulunmuştur. Poisson oranı ve matrisli yapıların geometrik iç kalınlıkları ile ilgili bilgiler Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Altı yıldız mozaik auxetic yapıda poisson oranı değişimi ile von Mises gerilmesi ve toplam deformasyon sonuçları

Numune no	Matris tipi	Geometrik iç kalınlık (t) (mm)	Poisson oranı	Toplam deformasyon	von Mises gerilmesi (Mpa)
1	6 x 4	0,40	-0,5928	0,0948	143,640
2	6 x 4	0,50	-0,5715	0,0470	83,393
3	6 x 4	0,60	-0,5872	0,0273	59,606
4	6 x 4	0,75	-0,5703	0,0138	39,498
5	6 x 4	1,00	-0,5320	0,0057	21,070
6	6 x 4	1,25	-0,4945	0,0030	14,168
7	6 x 3	0,40	-0,6655	0,1164	211,270
8	6 x 3	0,50	-0,6313	0,0583	129,710
9	6 x 3	0,60	-0,6322	0,0338	93,826
10	6 x 3	0,75	-0,5562	0,0176	47,328
11	6 x 3	1,00	-0,4650	0,0074	25,722
12	6 x 3	1,25	-0,3776	0,0039	18,033

Grafikte geometrik iç kalınlığı ile poisson oranı arasındaki ilişki verilmektedir (Şekil 6.1). Grafik incelendiğinde, kafes yapının geometrik iç kalınlığı düştükçe poisson oranının -1'e yaklaştığı görülmektedir. 6x4 ve 6x3 matris yapılarındaki geometrik iç kalınlıkları ile poisson oranı incelenmiş ve 6x3 matrisli yapıda daha fazla auxetic özellik gösterdiği gözlenmiştir. Fakat 6x3 matrisli yapıda geometrik iç kalınlık artışında poisson oranına bakıldığında 6x4 matrisli yapıya göre daha stabil bir azalma gözlenmemiştir. Bu nedenle 6x4 matrisli yapı auxeticlik özelliğinde daha kararlı yapıda olduğu gözlenmiştir. Deng ve Lu [120], tarafından yapılan çalışmada yeni tetra nervürlü petek yapıların geometrik iç kalınlığı sahip alıp matris tiplerine göre analizlerini gerçekleştirmişlerdir. 10x106 matris tipinde 8x106 matris tipine göre daha fazla negatif poisson oranı etkisine sahip olduğunu bulmuşlardır.



Şekil 6.1. Altı yıldız mozaik auxetic yapıda geometrik iç kalınlık ile poisson oranı ilişkisi

6.1.2. Yaprak auxetic yapı için poisson oranı hesaplaması

İkinci auxetic yapı için tasarlanan kafes yapının geometrik iç kalınlığı ile poisson oranı arasındaki ilişki analiz edilmiştir. 12 farklı geometrik iç kalınlık değişkenine sahip 2x3 matris ve 3x3 matris yapılardan oluşan toplam 24 farklı yapı analiz edilmiştir. Tasarımların her birine aynı çekme değeri uygulanmıştır. Kafes yapıların x ve y eksenli yönlerindeki şekil değişimlerine bakılmıştır (Çizelge 6.2). Poisson oranı şu şekilde hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_{x0}} = \frac{L_{x1} - L_{x0}}{L_{x0}} = \frac{0,0013787}{120} = 1,15E - 4$$

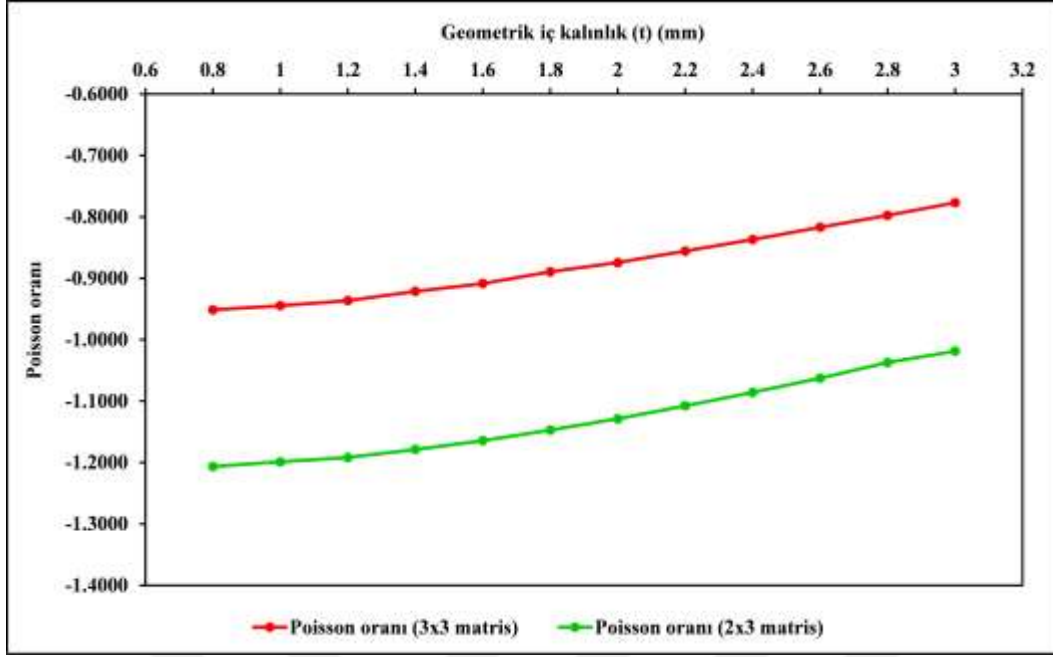
$$\varepsilon_y = \frac{\Delta L_y}{L_{y0}} = \frac{L_{y1} - L_{y0}}{L_{y0}} = \frac{0,173890}{120} = 0,01449$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = \frac{1,15E - 4}{0,01449} = -0,9515$$

Çizelge 6.2. Yaprak auxetic yapıda poisson oranı değişimi ile von Mises gerilmesi ve toplam deformasyon sonuçları

Numune no	Geometrik iç kalınlık (mm)	Poisson oranı (3x3 matris)	Poisson oranı (2x3 matris)	Toplam deformasyon (3x3 matris)	Toplam deformasyon (2x3 matris)	von Mises gerilmesi (3x3 matris)	von Mises gerilmesi (2x3 matris)
1	0,80	-0,9515	-1,2066	0,178	0,630	138,490	229,640
2	1,00	-0,9446	-1,1989	0,091	0,194	99,735	92,984
3	1,20	-0,9362	-1,1919	0,148	0,075	55,202	50,415
4	1,40	-0,9212	-1,1787	0,095	0,238	57,832	179,640
5	1,60	-0,9085	-1,1644	0,065	0,161	45,115	135,140
6	1,80	-0,8894	-1,1473	0,046	0,114	40,768	125,040
7	2,00	-0,8744	-1,1289	0,034	0,084	32,486	102,940
8	2,20	-0,8558	-1,1077	0,026	0,064	28,790	88,890
9	2,40	-0,8368	-1,0858	0,021	0,050	24,808	75,435
10	2,60	-0,8169	-1,0626	0,016	0,040	21,011	65,743
11	2,80	-0,7975	-1,0371	0,013	0,033	19,015	57,472
12	3,00	-0,7769	-1,0186	0,011	0,026	16,223	54,063

Yaprak auxetic yapıda geometrik iç kalınlık arttıkça poisson oranı 0'a yaklaşma eğilimi göstermiştir. 0,80 mm geometrik iç kalınlıkta poisson oranı -0,9515 gelirken, en yüksek geometrik iç kalınlık olan 3,00 mm'de poisson oranı -0,7769 gelmiştir (Şekil 6.2). Yapılan 24 farklı analizde bütün yapılarda negatif poisson oranı bulunmuştur. Yaprak auxetic yapıda 2x3 matris, 3x3 matris tipine göre daha fazla auxetic özellik göstermiştir. Yani 0,80 mm geometrik iç kalınlıktan örnek gösterecek olursak, 3x3 matrisde bu kalınlıkta poisson oranı -0,9515 gelirken, 2x3 matrisde bu kalınlıkta poisson oranı -1,2066 olarak bulunarak daha negatif yönde daha düşük seviyeye ulaşmıştır. Aksoy ve Toktaş'ın yaptıkları çalışmada da poisson oranı geometrik iç alınlık arttıkça poisson oranı değeri 0'a yaklaşmıştır [115].



Şekil 6.2. Yaprak auxetic yapıda geometrik iç kalınlık ile poisson oranı ilişkisi

6.1.3. Makili auxetic yapı için poisson oranı hesaplaması

Tasarlanan kafes yapının geometrik iç kalınlığı ile poisson oranı arasındaki ilişki analiz edilmiştir. 12 farklı geometrik iç kalınlık değişkenine sahip 2x4 matris ve 4x4 matris yapılarından oluşan toplam 24 farklı yapı analiz edilmiştir. Tasarımların her birine aynı çekme değeri uygulanmıştır. Kafes yapıların x ve y eksen yönlerindeki şekil değişimleri, toplam deformasyonları ve von Mises gerilmeleri analiz edilmiştir (Çizelge 6.3). Poisson oranı şu şekilde hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_{x0}} = \frac{L_{x1} - L_{x0}}{L_{x0}} = \frac{0,0976}{152} = 0,00064$$

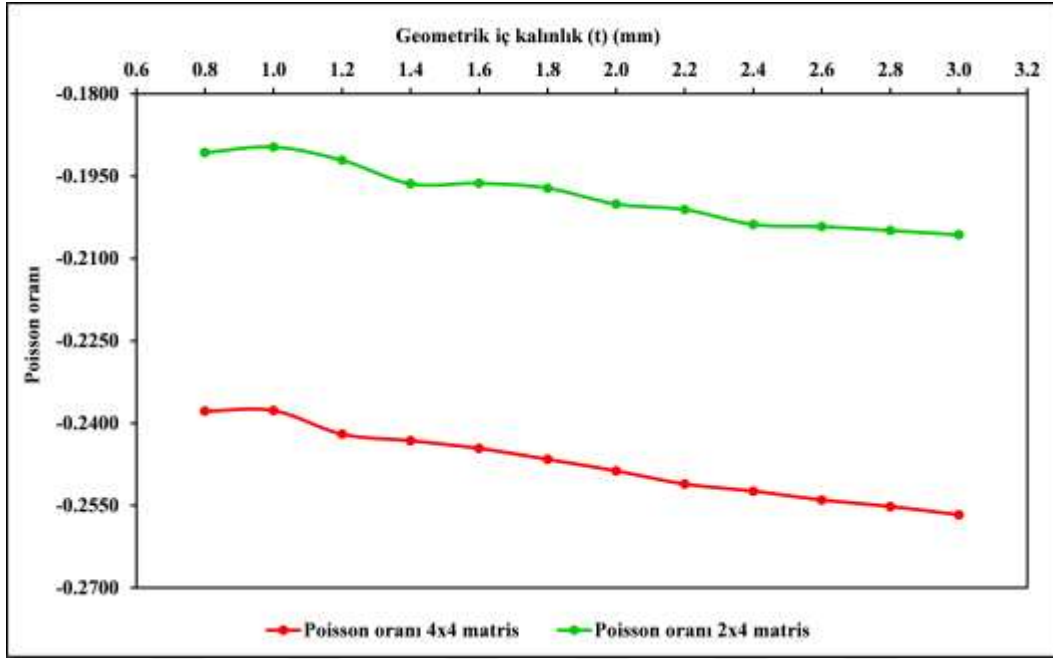
$$\varepsilon_y = \frac{\Delta L_y}{L_{y0}} = \frac{L_{y1} - L_{y0}}{L_{y0}} = \frac{0,3800}{152} = 0,0025$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = \frac{0,00064}{0,0025} = -0,2567$$

Çizelge 6.3. Makili auxetic yapıda poisson oranı değişimi ile von Mises gerilmesi ve toplam deformasyon sonuçları

Numune no	Geometrik iç kalınlık (mm)	Poisson oranı 4×4 matris	Poisson oranı 2×4 matris	von Mises gerilimi 4×4 matris	von Mises gerilimi 2×4 matris	Toplam deformasyon 4×4 matris	Toplam deformasyon 2×4 matris
1 - 13	0,80	-0,2378	-0,1907	1004,4	880,34	19,6040	21,3910
2 - 14	1,00	-0,2377	-0,1897	680,85	744,34	10,1480	11,3300
3 - 15	1,20	-0,2420	-0,1921	443,51	512,37	5,8825	6,5707
4 - 16	1,40	-0,2432	-0,1964	345,09	372,26	3,6982	4,1175
5 - 17	1,60	-0,2446	-0,1963	260,47	280,52	2,4754	2,7479
6 - 18	1,80	-0,2466	-0,1972	252,37	270,98	1,7520	1,9379
7 - 19	2,00	-0,2487	-0,2001	203,77	219,34	1,2769	1,4079
8 - 20	2,20	-0,2511	-0,2011	163,32	179,65	0,9609	1,0532
9 - 21	2,40	-0,2524	-0,2038	154,88	164,02	0,7412	0,8088
10 - 22	2,60	-0,2540	-0,2042	137,95	119,14	0,5861	0,6365
11 - 23	2,80	-0,2552	-0,2049	112,19	120,07	0,4701	0,5076
12 - 24	3,00	-0,2567	-0,2057	95,715	102,35	0,3827	0,4110

2x4 ve 4x4 matris yapılar için geometrik iç kalınlık ile poisson oranı arasındaki ilişki Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Yapılara uygulanan çekme kuvveti ile grafikten de görüleceği üzere 4x4 matris yapıda geometrik iç kalınlık arttıkça kafes yapının poisson oranının -0,5'e yaklaştığı gözlemlenmektedir. Erdoğan ve Toktaş'ın [80], çalışmasında olduğu gibi kalınlık arttıkça poisson oranı da artmıştır. Ayrıca auxetic yapılar geometrilerinden dolayı farklı davranışlar sergilemektedir. Zhang ve diğerlerinin [116], çalışmasında, re-entrant kiral yapının analiz ve deneysel sonuçlarına göre, tek yönlü uygulanan kuvvet yönünde deformasyon sırasında poisson oranı değerinin değiştiği ve negatif yönde neredeyse -4'e kadar auxetic özellik gösterdiği bulunmuştur.

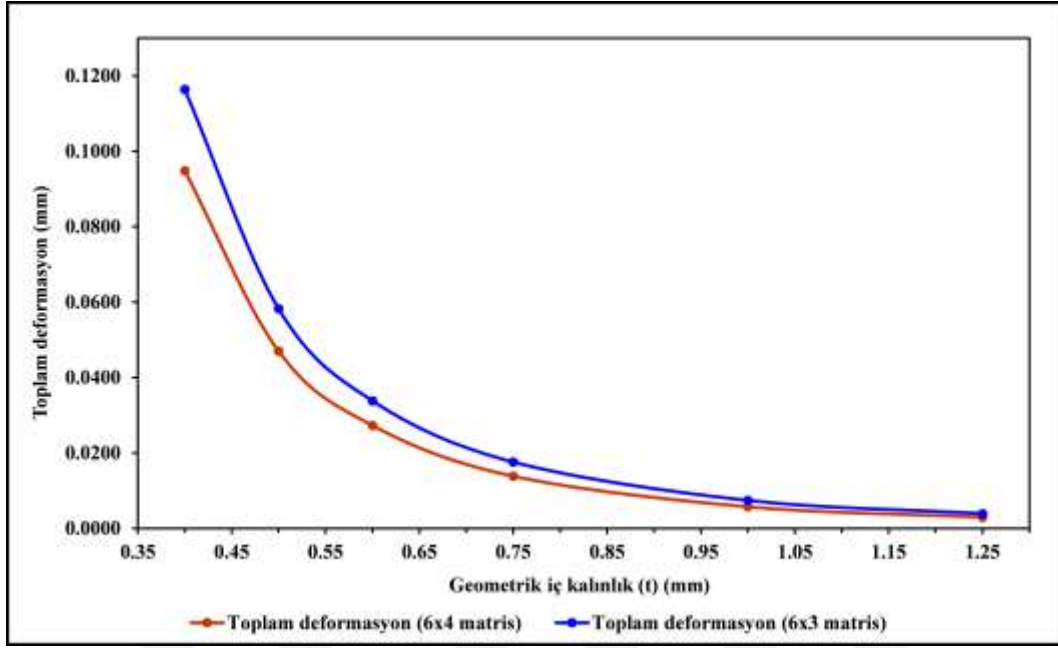


Şekil 6.3. Makili auxetic yapı için geometrik iç kalınlık ile poisson oranı arasındaki ilişkisi

6.2. Auxetic Yapılarda von Mises Gerilimi ve Toplam Deformasyon

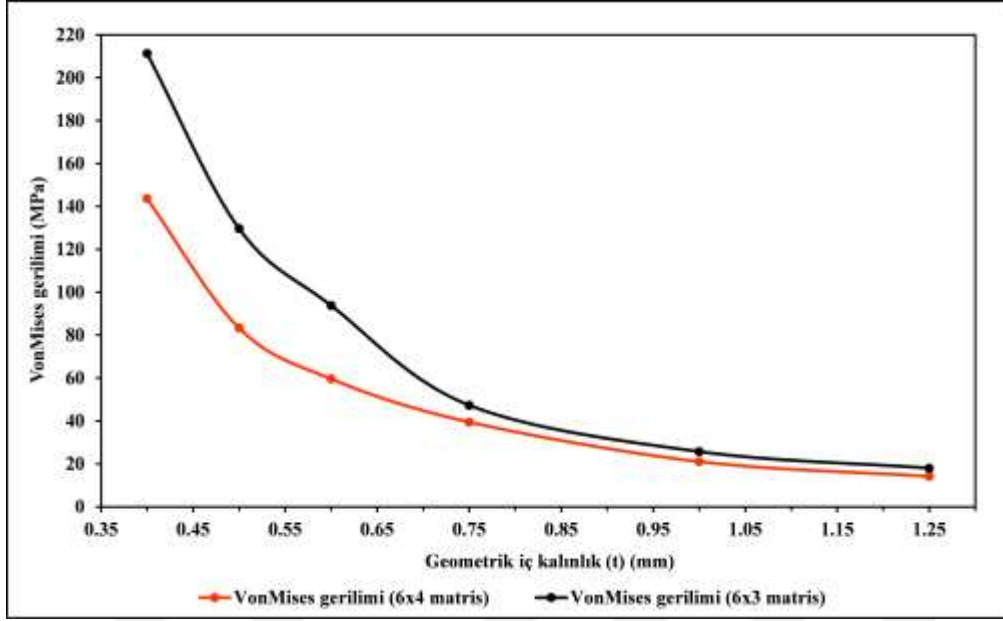
3 farklı auxetic yapının analiz sonuçlarına göre von Mises gerilimi ve toplam deformasyon değerlerine bakılmıştır.

Altı yıldız mozaik auxetic yapı için toplam deformasyon en fazla 6x3 matrisli 0,40 mm geometrik iç kalınlıkta 0,1164 mm olarak bulunmuştur. 6x4 matriste 0,40 mm geometrik iç kalınlıkta toplam deformasyon miktarı ise 0,095 mm olarak çıkmıştır. Analizleri gerçekleştirilen iki matrisli yapıda da geometrik iç kalınlık arttıkça toplam deformasyon miktarı azalmıştır. Poisson oranı ile toplam deformasyon sonuçları doğru orantılı olarak azaldığı bulunmuştur (Şekil 6.4).



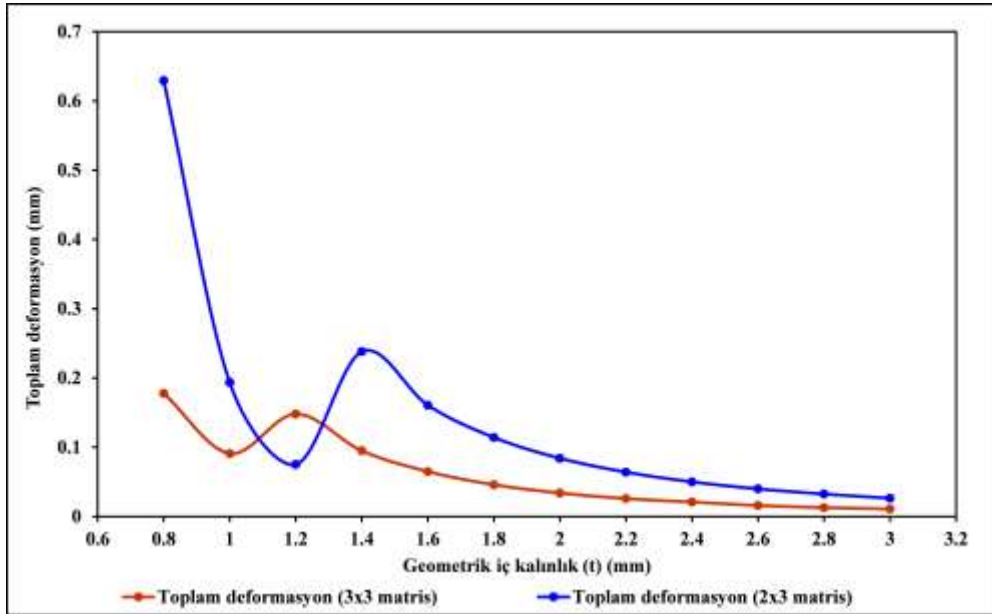
Şekil 6.4. Altı yıldız mozaik auxetic yapı için geometrik iç kalınlık ile toplam deformasyon ilişkisi

Toplam deformasyonda olduğu gibi von Mises geriliminde de geometrik iç kalınlık arttıkça von Mises gerilimi azalmıştır. Enerjinin korunumu olarak bilinen termodinamiğin birinci yasasına göre enerji yaratılamaz ve mevcut enerji yok edilemez. Yalnızca bir enerji türü diğerine dönüştürülebilir. Sonuç olarak, bir bileşene mekanik kuvvet uygulandığında enerji, parçada gerinim enerjisi olarak depolanır. Toplam enerjinin bir kısmı malzemenin hacminin değişmesine neden olurken, geri kalanı malzemenin deforme olmasına neden olur. Von Mises gerilimi aynı zamanda gerinim enerjisiyle de ilişkilidir ve malzemeye yük eklenmesi sonucunda malzemenin güvenlik faktörü ile ilişkisini gösterir [111]. Bir malzeme, plastik deformasyon noktası olarak da bilinen akma dayanımına ulaşana kadar elastik olarak şekil değişimine uğramaktadır. "Akma gerilimi", malzemenin elastik bölgeden plastik bölgeye geçtiği noktayı ifade eder. Malzeme üzerindeki gerilim akma dayanımını aştığında, yani plastik deformasyon noktasını geçtikten sonra akma ve boyun verme meydana gelir ve parça ikiye ayrılır. Buna göre altı yıldız mozaik auxetic yapıda von Mises geriliminin en düşük olduğu 6x4 matriste 1,25 mm kalınlıkta 14,168 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek von Mises gerilimi ise 6x3 matrisli 0,40 mm geometrik iç kalınlıkta bulunmuştur. Bu durumda kalınlık arttıkça malzemenin süneklik özelliğini kaybetmesinden ötürü von Mises gerilimi azalmıştır (Şekil 6.5).



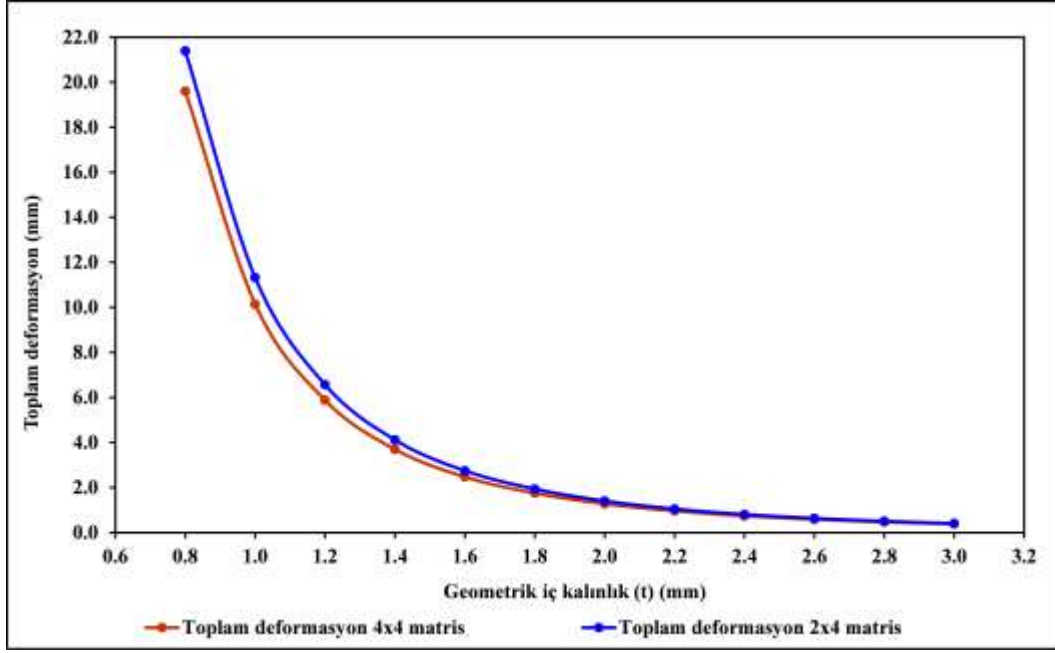
Şekil 6.5. Altı yıldız mozaik auxetic yapıda geometrik iç kalınlık ile von Mises gerilimi ilişkisi

Yaprak auxetic yapı için toplam deformasyonda kalınlık arttıkça toplam deformasyon miktarı azalmıştır. 0,80 mm geometrik iç kalınlığa sahip yapının ince olmasından ötürü iç içe girmeler daha fazla gözlenmektedir. Y ekseninde kuvvet uygulandığında tasarımlarda x ve z eksen yönlerinde uzamalar gözlenmektedir. Bu da negatif poisson özelliğine sahip olduğunun bir kanıtıdır (Şekil 6.6).



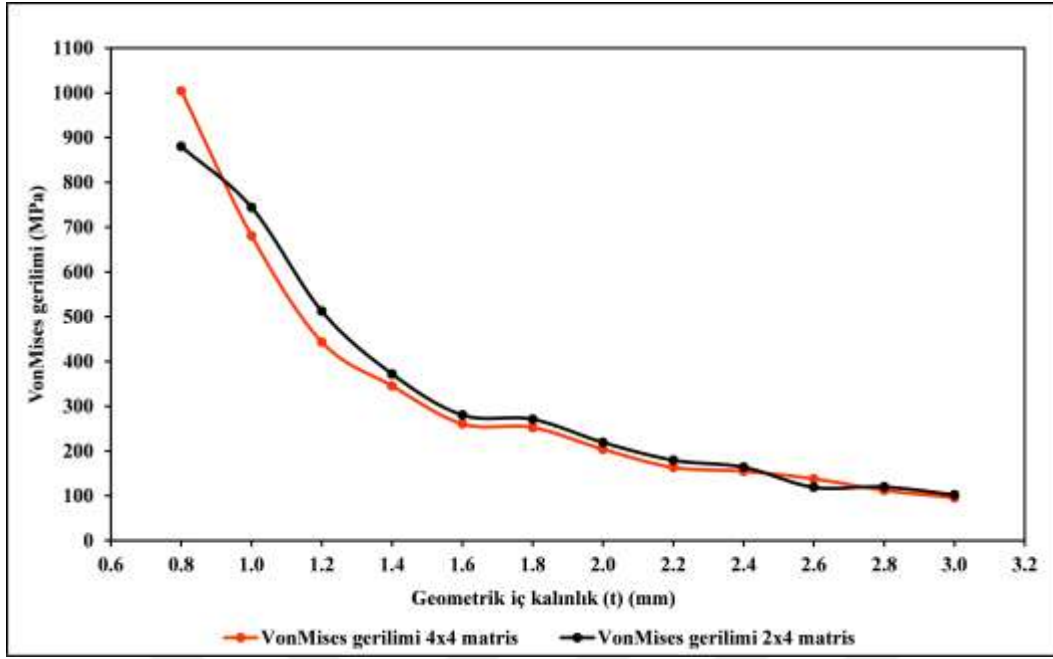
Şekil 6.6. Yaprak auxetic yapı için geometrik iç kalınlık ile toplam deformasyon ilişkisi

Yaprak auxetic yapı için poisson oranı arttıkça toplam deformasyonun azaldığı görülmektedir (Şekil 6.7). Zhang ve arkadaşlarının birim hücre tasarımında olduğu gibi, yapının esnekliğinden dolayı düşük kalınlıklarda enine boyuna uzamalar daha fazla olduğundan, düşük poisson oranında yüksek yer değiştirme gözlemlendi. Yapının kalınlığı arttıkça esnekliğin azalmasına bağlı olarak toplam yer değiştirme miktarı azalır [78].



Şekil 6.7. Makili auxetic yapı tasarımı için geometrik iç kalınlıkla toplam deformasyon ilişkisi

Makili auxetic yapı tasarımında kafes yapılar plastik deformasyona uğrayabildiğinden von Mises gerilme değerleri bu yapılar için çok önemlidir. Burada amaç yapının kapasitesinin üzerinde gerilmelere maruz kalmamasını ve işlevini yerine getirmesini sağlamaktır. Bu durumda 1 numaralı kafes yapısının -0,23 poisson oranına sahip olduğu ve en yüksek von Mises geriliminin 1004 MPa olduğu görülmektedir. Şekil 6.8'deki grafikte görüldüğü gibi poisson oranı arttıkça yapıların maksimum von Mises gerilmesinin ters orantılı olarak azaldığı gözlenmiştir. Potheir ve diğerleri, birim hücrenin kalınlığı arttıkça von Mises geriliminin de arttığını rapor etmişlerdir [76]. İki farklı sonucun ortaya çıkmasının temel nedeni birim hücrelerin farklı geometrik yapılarından kaynaklanmaktadır. Örneğin, bu tür yapıların, yeniden giriş yapan yapılarda çekme yükü altında daha düzgün von Mises gerilme dağılımı nedeniyle daha yüksek çekme mukavemetine ve çekme mukavemetine sahip olduğu bulunmuştur [117].

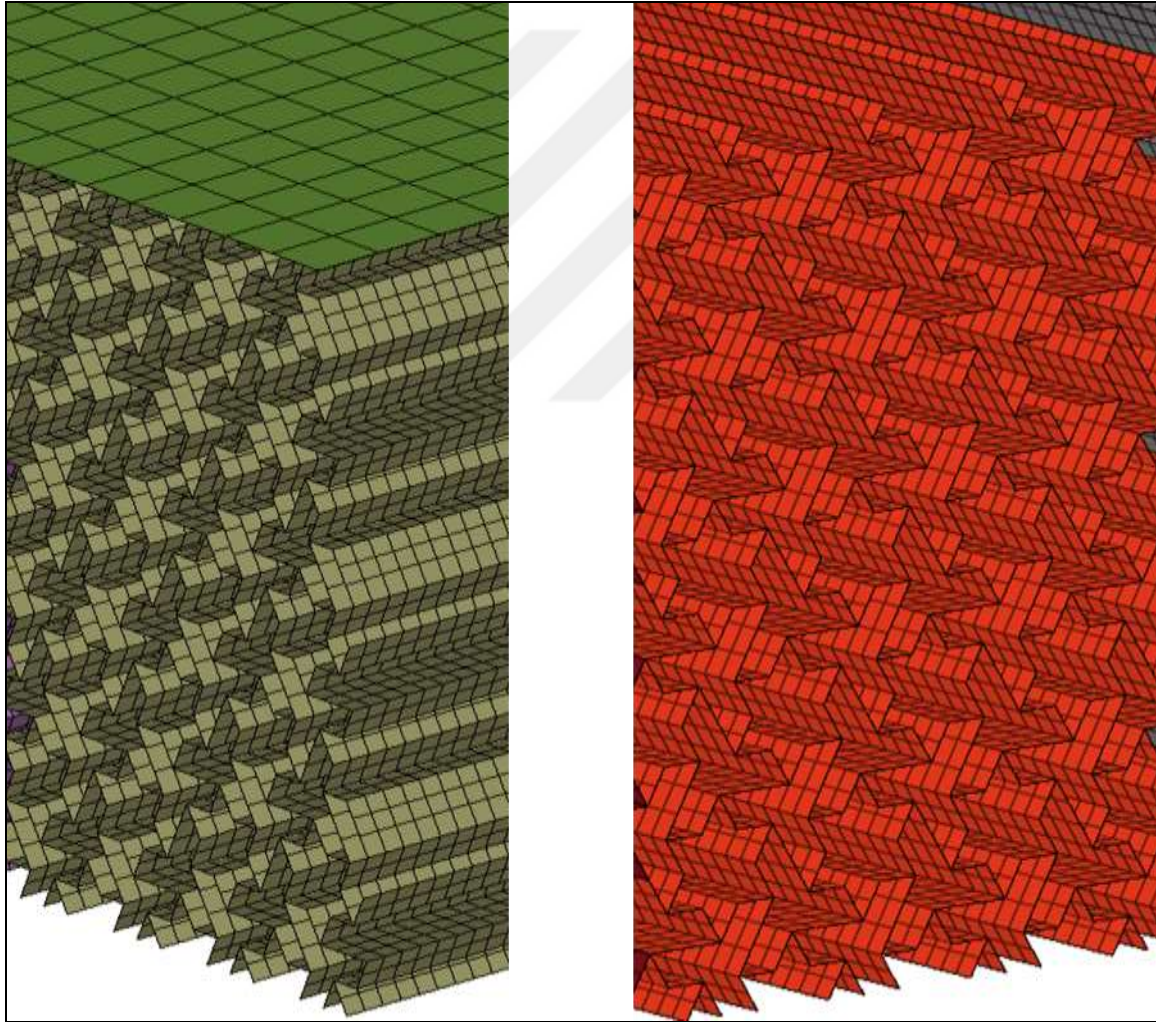


Şekil 6.8. Makili auxetic yapıda geometrik iç kalınlık ile von Mises gerilimi ilişkisi



7. AUXETİC YAPI TASARIMLARININ EKSPLİSİT DİNAMİK ANALİZİ

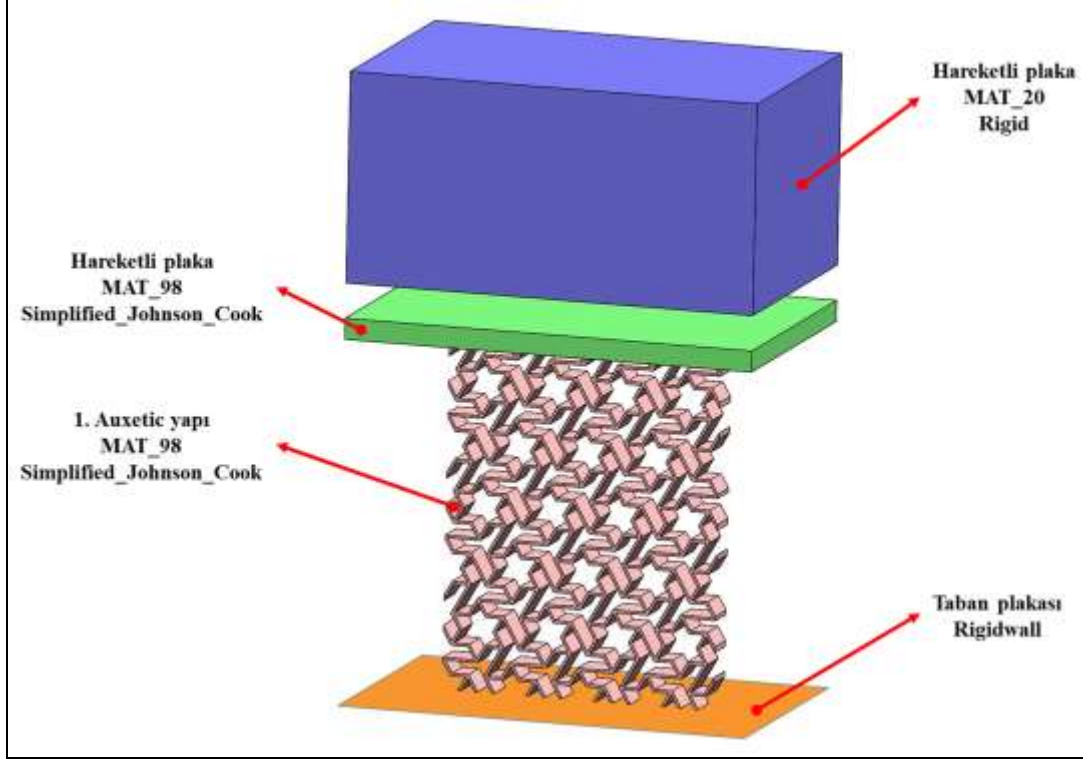
Dinamik analiz için tasarımlara öncelikle HyperMesh yazılım programı kullanılarak mesh modelleri yapılmıştır. Modellere 2B orta eskenli ağ modellemesi yapılmıştır. Dinamik analizleri gerçekleştirilen tüm tasarımlarda auxetic yapılar için 2D shell – kabuk elemanlar kullanılmıştır. Kabuk elemanlar için “ELFORM 16” eleman formulasyonu tercih edilmiştir. Hareketli ve sabit plakalar için ise shell quad ağ elemanı kullanılmıştır (Şekil 7.1).



Şekil 7.1. Hypermesh için hazırlanan mesh modellemesi

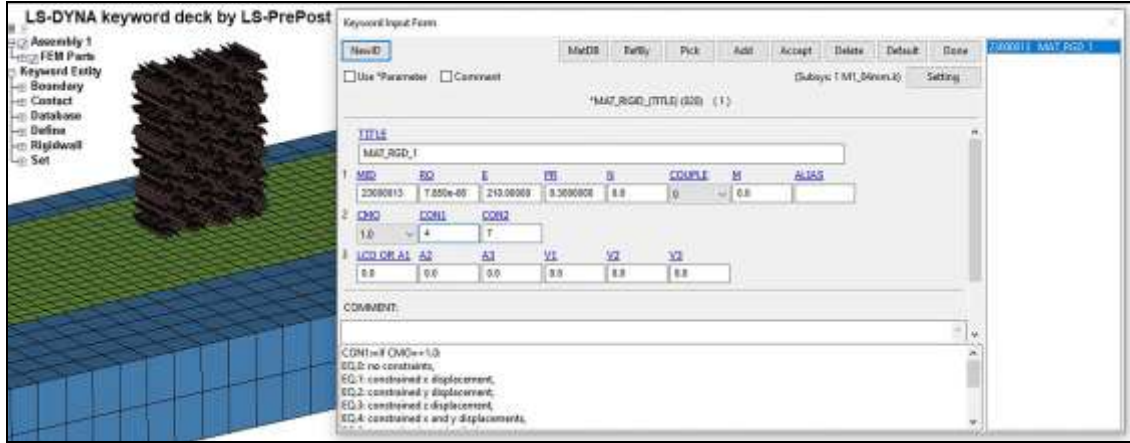
Hazırlanan meshli modeller LS-Prepost yazılımı kullanılarak analiz için ön hazırlıklar tamamlanmıştır. LS-Prepost ile hazırlanan modelin açıklaması Şekil 7.2’de verilmiştir. Alt ve üst kısımlar sabit malzeme, numune ve üstündeki plaka hareketli olarak adlandırılmıştır.

Numunenin üzerine koyulan yeşil renkli plaka numunenin üzerine yük dağılımının daha düzgün olması için tercih edilmiştir. Hareket verilen ve basma kuvveti ile ezilecek parçalar hareketli olarak adlandırılmıştır. Taban plakası olarak isimlendiren kısımda ise numune sabitlenerek dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.2. LS-Prepost ile hazırlanan modelin açıklanması

Eksplisit dinamik analizlerin gerçekleştirilmesi için modele malzeme özelliklerinin atanması gerekmektedir. Bu yüzden hareketli ve sabit plakalar için farklı malzeme kartları seçilmiştir. Hareketli plakaya malzeme kartı olarak MAT-20 Rigid malzeme kartı atanmıştır (Şekil 7.3).



Şekil 7.3. MAT20RIGID malzeme kartı

Kart özelliklerinde MAT20RIGID malzeme kartı için genel yapı çeliği malzeme özellikleri olan “RO” malzeme yoğunluğu $7,85E-6 \text{ kg/mm}^3$, “E” elastik modülüne 210 GPa, “PR” poisson oranına ise 0,3 girilmiştir. Birimlerde kütle için kilogram (kg), ölçüsel uzunluklarda milimetre (mm), süre için ise milisaniye (ms) kullanılarak analiz sonuçlarında oluşan kuvvetlerin kilonewton (kN) olarak çıkması hedeflendiğinden bu birim sistemi kullanılmıştır. Ls Dyna yazılımı içerisinde Rijit malzeme tanımlamasına özel olarak bu malzemenin atalı olduğu parça için sınır koşulları malzeme kartı içerisinde tanımlanmaktadır. Malzeme kartında CMO 1 olarak seçildiğinde malzemede sınır koşulu tanımı aktif hale gelmektedir. Sonrasında CON1 ve CON2 tanımlamaları ise sırayla ilerleme ve dönme yönlerindeki kısıtlamaları aktif hale getirmektedir. Ardından modelin X, Y ve Z yönlerinde kısıtlama ayarları için CMO 1 olarak seçilmiştir. CON1: 4 seçilerek X ve Y yönünde modelin hareketi kısıtlanmış ve sadece Z eksen yönünde hareketine izin verilmiştir. CON2: 7 seçilmiş ve tüm yönlerde rotasyonu kısıtlanmıştır.

Altı yıldız mozaik auxetic yapı için malzeme kartı olarak AlSi10Mg alaşımı atanmıştır. Yüksek ağırlık/mukavemet oranı ve iyi derecede mekanik özellikler sergilemesi sebebiyle AlSi10Mg tercih edilmiştir. Bu malzeme kartı için MAT-98 Simplified Johnson Cook seçilmiştir. Burada “RO” malzeme yoğunluğu $2,67 \text{ g/cm}^3$, “E” elastik modülü 72 GPa, “PR” poisson oranı 0,33, A akma mukavemeti 251 MPa, “B, N, C” değerleri için literatürden faydalanılmıştır. Simplified Johnson Cook modeli formülasyonu Eş. 7.1, Eş. 7.2, Eş. 7.3’de gösterilmiştir. [121].

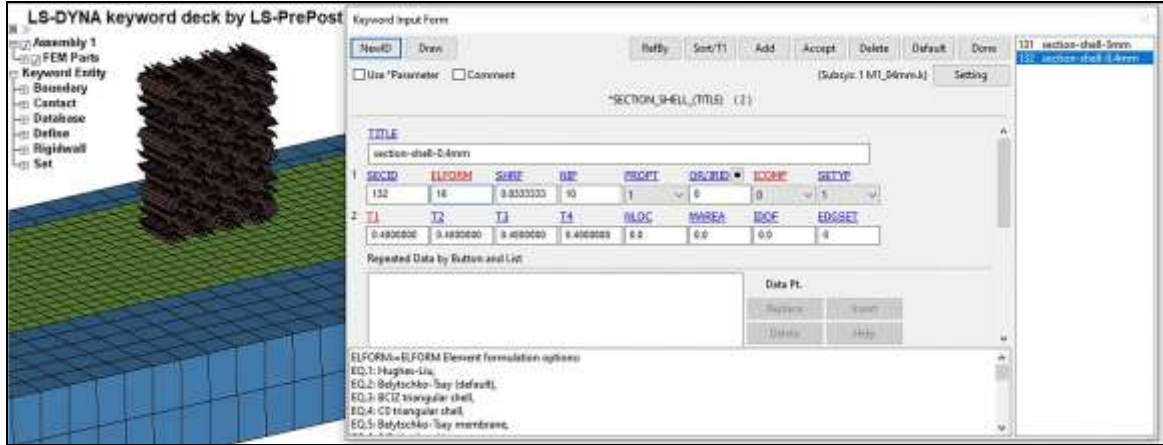
$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (7.1)$$

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{EPSO} \quad (7.2)$$

$$\sigma_y = \min\{\min[A + B\bar{\epsilon}^n, SIGMAX](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*, SIGSAT)\} \quad (7.3)$$

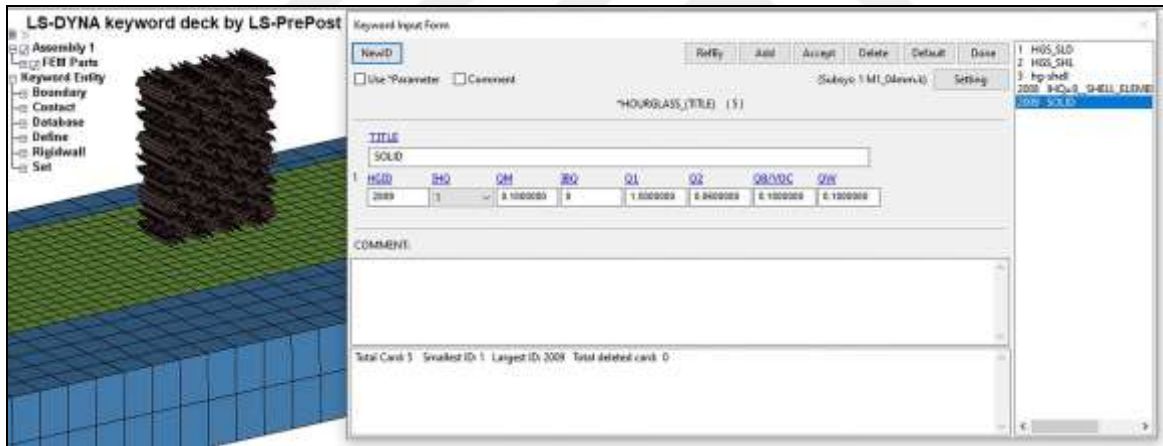
Tamamen ampirik olan Johson-Cook dayanım modeli akış (flow) gerilmesini açık bir formda gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık cinsinden ifade etmektedir. Burada A, B, n, C ve m malzeme sabitleri, ϵ' 0 referans gerinim hızı ve T* ise homolog sıcaklıktır. Denklem içerisinde ki ilk parantez gerinim sertleşmesini, ikinci parantez gerinim hızına bağlı sertleşmeyi ve son parantez de sıcaklık etkilerini belirtir. “PSFAIL” hasar değeri ise 0,25 olarak girilmiştir. Plastik deformasyonda bu değere ulaştığında yapıda kırılmalar meydana gelecektir (Şekil 7.4).





Şekil 7.5. Shell kartlarının oluşturulması

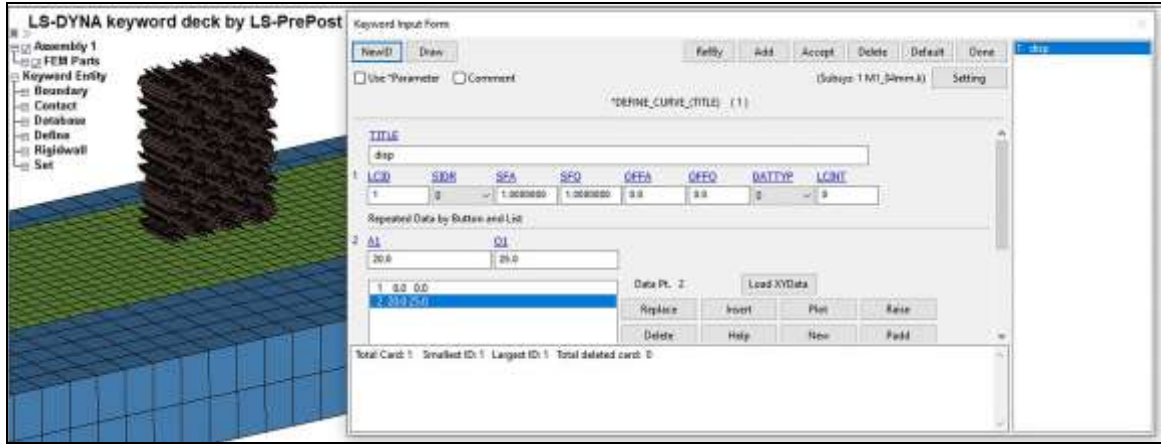
Shell kartlarını oluşturulmasından ötürü hourglass etkisine maruz kalmamak için hourglass kartı seçilmiştir. Seçilen tüm shell ve solid kartlar için bu kartı seçerek analizlerin daha doğru sonuç vermesini sağlamıştır (Şekil 7.6).



Şekil 7.6. Hourglass kartının oluşturulması

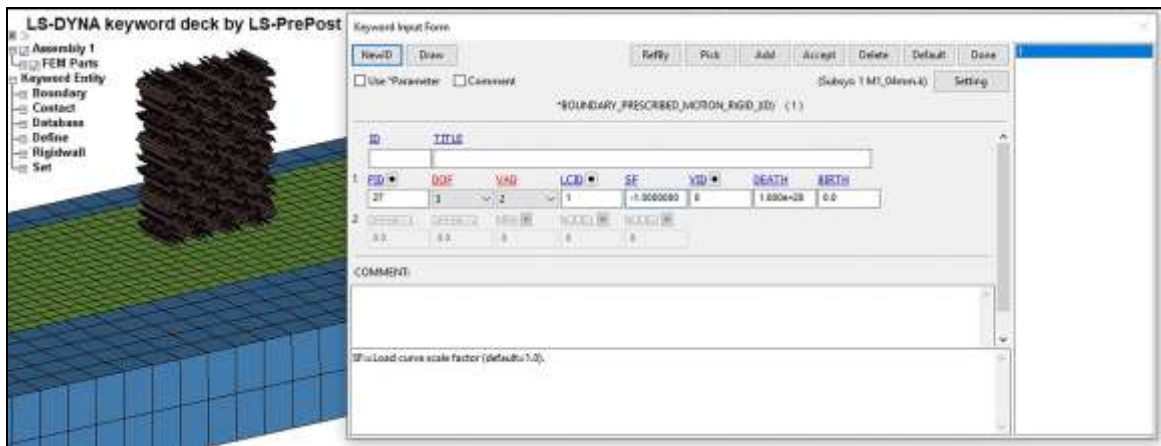
Rigid malzeme için solid kartı atanmış ve eleman formülasyonu olarak 1 seçilmiştir (Şekil 7.7).

plakalara kuvvet zaman grafiği tanımlanarak 20 ms süre içerisinde 25 mm hareket etmesi tanımlanmıştır (Şekil 7.9).



Şekil 7.9. Parça için kuvvet tanımlanması

Hareketli üst plakaya `BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID` kartı oluşturulmuştur. Bu kartın oluşturulmasının nedeni ise hareketli plaka için deplasman oluşturmaktır. Burada sırasıyla; “DOF” 3 olarak seçildiğinde Z ekseninde hareket edeceği belirtilmiştir. Ardından “VAD” 2 seçilerek bu yapı için deplasman alınacağını, son olarak “SF” kısmına da bir önceki kartta oluşan curve seçilmektedir (Şekil 7.10).

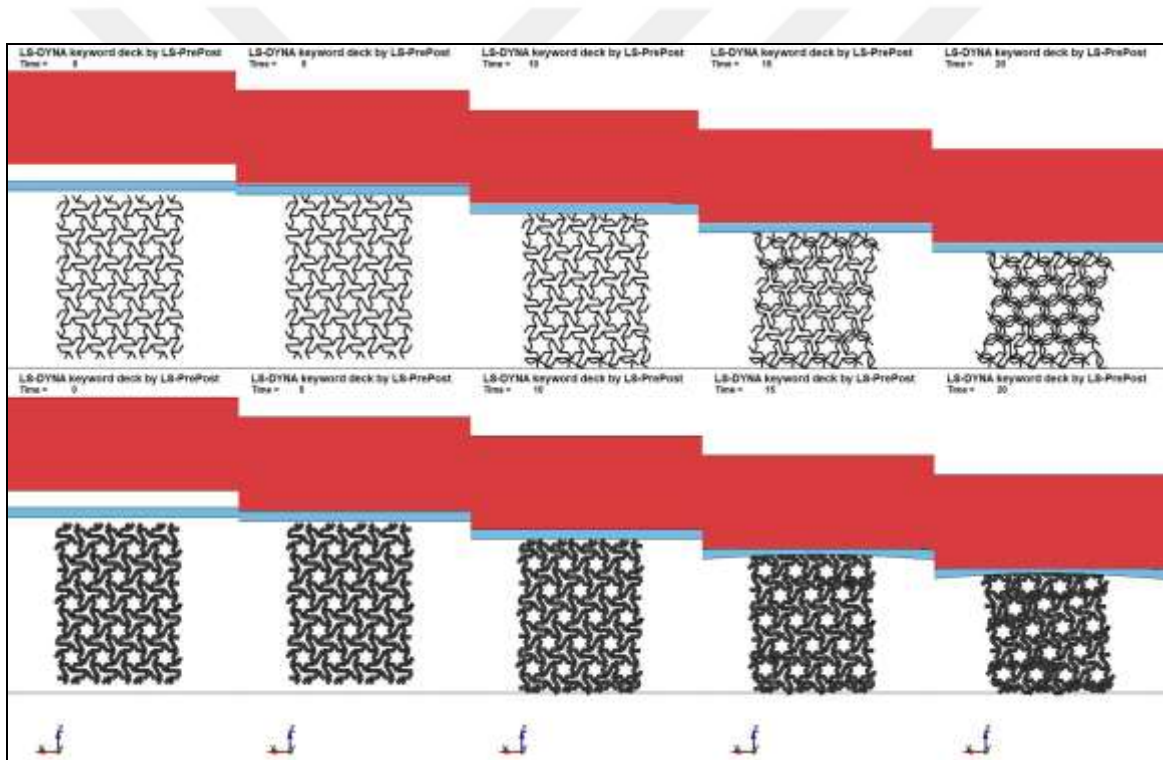


Şekil 7.10. Hareketli üst plaka için `BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID` kartı oluşturulması

7.1. Auxetic Yapılarda Eksplisit Dinamik Analiz Sonuçları

7.1.1. Altı yıldız mozaik auxetic yapı tasarımının eksplisit dinamik analizi

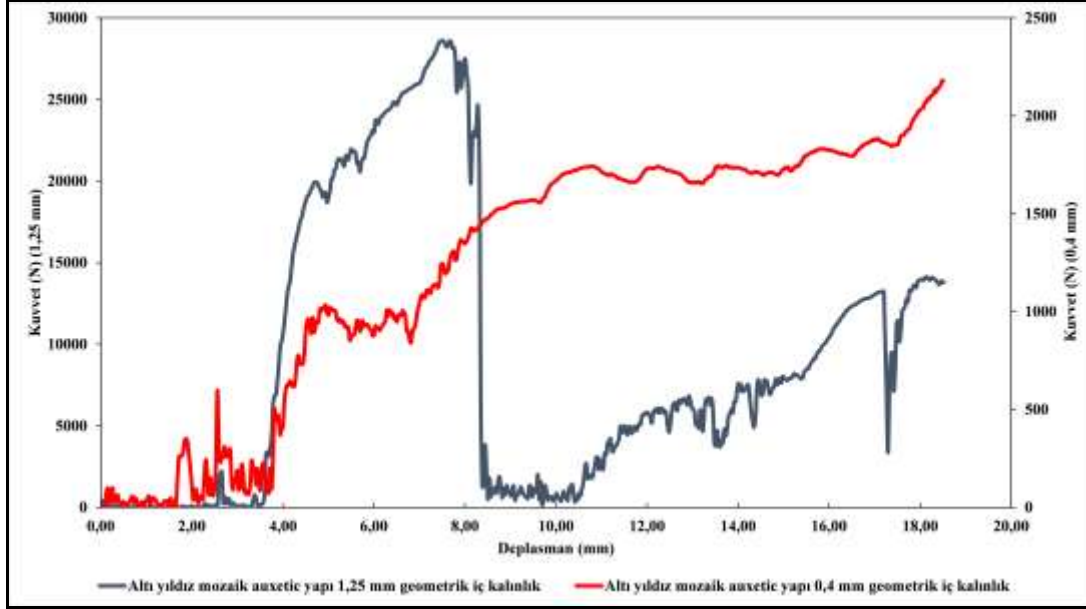
Altı yıldız mozaik auxetic yapı tasarımlarından 0,40 ile 1,25 mm geometrik iç kalınlığa sahip olan numuneleri, 20 ms'de ve 25 mm sıkıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Sıkıştırma işleminde auxetic özellikli yapı olduğundan ötürü, numunelerde x eksen yönünde genişlemek yerine x yönünde daralmalar gözlenmiştir. Yıldız şeklinin çevresindeki yapılar iç içe girmişlerdir. 0,40 mm geometrik iç kalınlık 1,25 mm geometrik iç kalınlığa göre daha ince olmasından ötürü daha çok iç içe geçmeler meydana gelmiştir. (Şekil 7.11)



Şekil 7.11. Altı yıldız mozaik auxetic yapının 0,40 mm ile 1,25 mm geometrik iç kalınlıkta eksplisit görüntüleri

Kuvvet deplasman grafiğine bakıldığında 1,25 mm geometrik iç kalınlıkta 7 ms'de en yüksek 27000 N bulunmuştur (Şekil 7.12). Ardından ani bir düşüş gözlenmiştir. Bu düşüşe birim hücrede meydana gelen deformasyonlar sebep olmuştur. 0,40 mm geometrik iç kalınlıkta sıkıştırma boyunca ince yapısından ötürü iç içe geçmeler daha düzenli olmasından ötürü grafikte daha doğrusal bir artış gözlenmiştir. Nasim ve diğerleri de re-

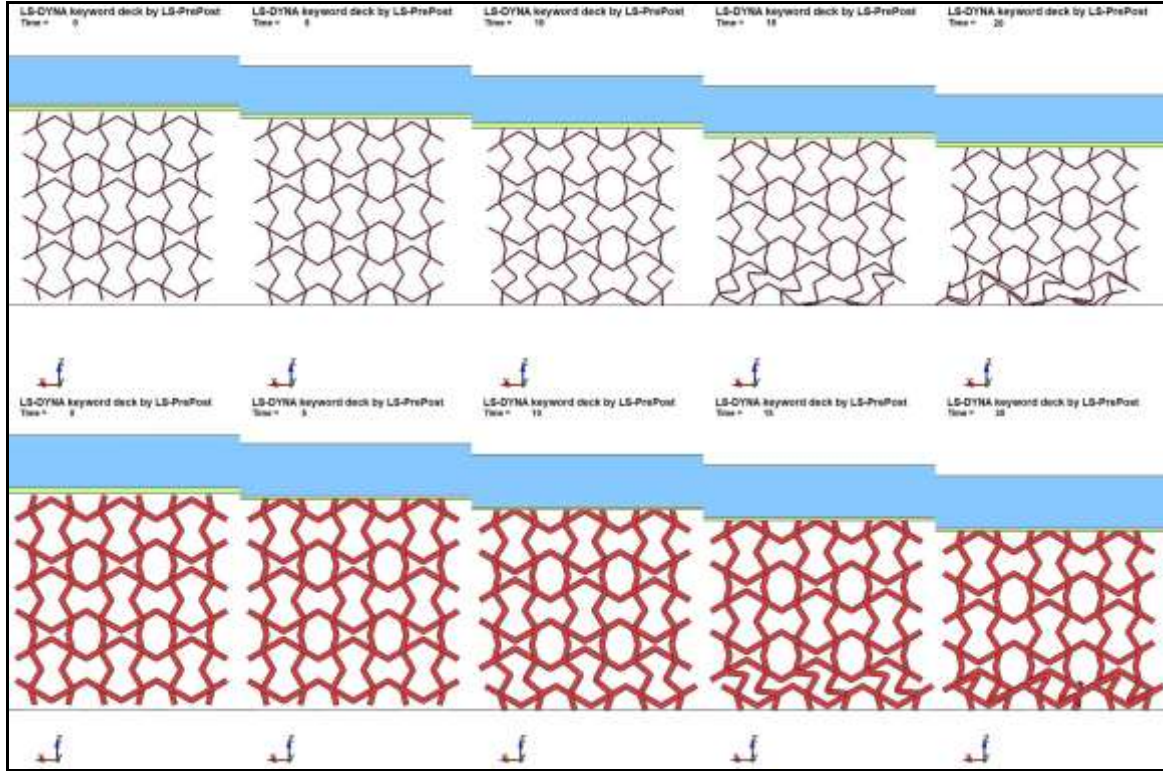
entrant yapısı ile bal peteği yapısının enerji sönümle özelliklerini karşılaştırmışlar ve benzer sonuçlar elde etmişlerdir [118].



Şekil 7.12. Altı yıldız mozaik auxetic yapıda kuvvet – deplasman grafiği

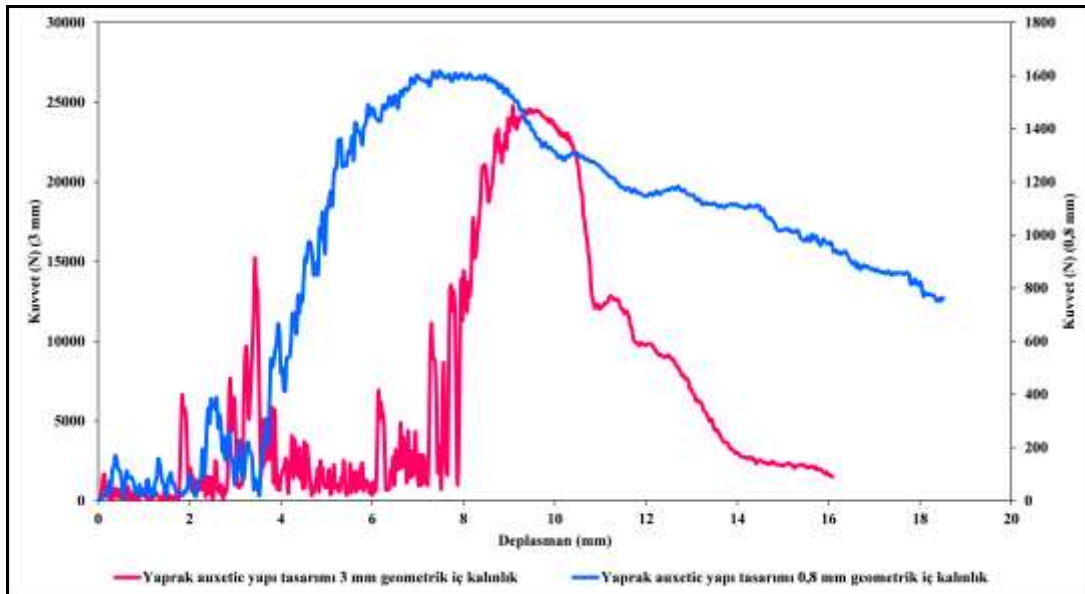
7.1.2. Yaprak auxetic yapı tasarımının eksplisit dinamik analiz sonuçları

Yaprak auxetic yapı tasarımında 0,80 mm ile 3,00 mm geometrik iç kalınlıkta eksplisit dinamik analizine gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.13’de görüldüğü üzere, yapının en alt kısmında içe geçmeler başlamıştır. 0,80 mm geometrik iç kalınlık, 3,00 mm geometrik iç kalınlığa göre 20 ms’de daha çok deformasyona uğramıştır.



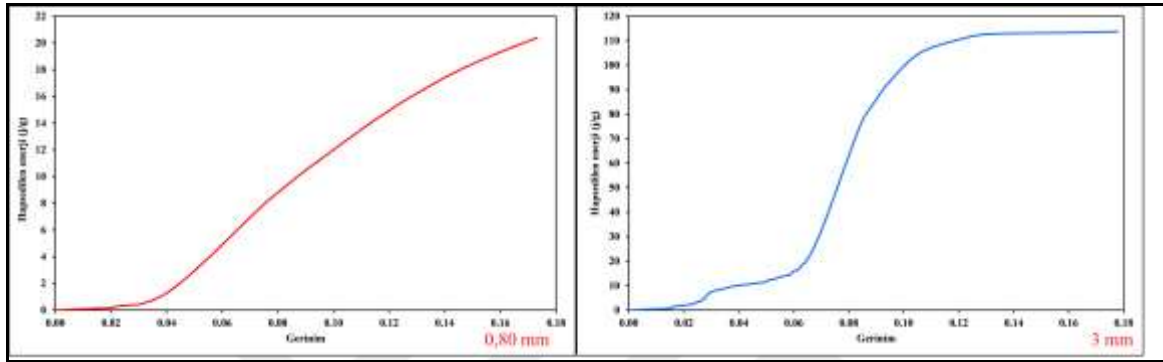
Şekil. 7.13. Yaprak auxetic yapının eksplisit dinamik analiz görüntüleri

3,00 mm geometrik iç kalınlığa sahip yapının 20 ms'lik analiz süresinin 10 ms zamanında en yüksek 25000 N kuvveti karşılayan analiz sonucu çıkmıştır. 0,80 mm'de ise 8 ms'de 1600 N'a yakın bir kuvvet çıkmıştır. Kuvvetlerin bu kadar farklı olması geometrik iç kalınlıktan kaynaklanmaktadır (Şekil 7.14).



Şekil 7.14. Yaprak auxetic yapıda kuvvet – deplasman grafiği

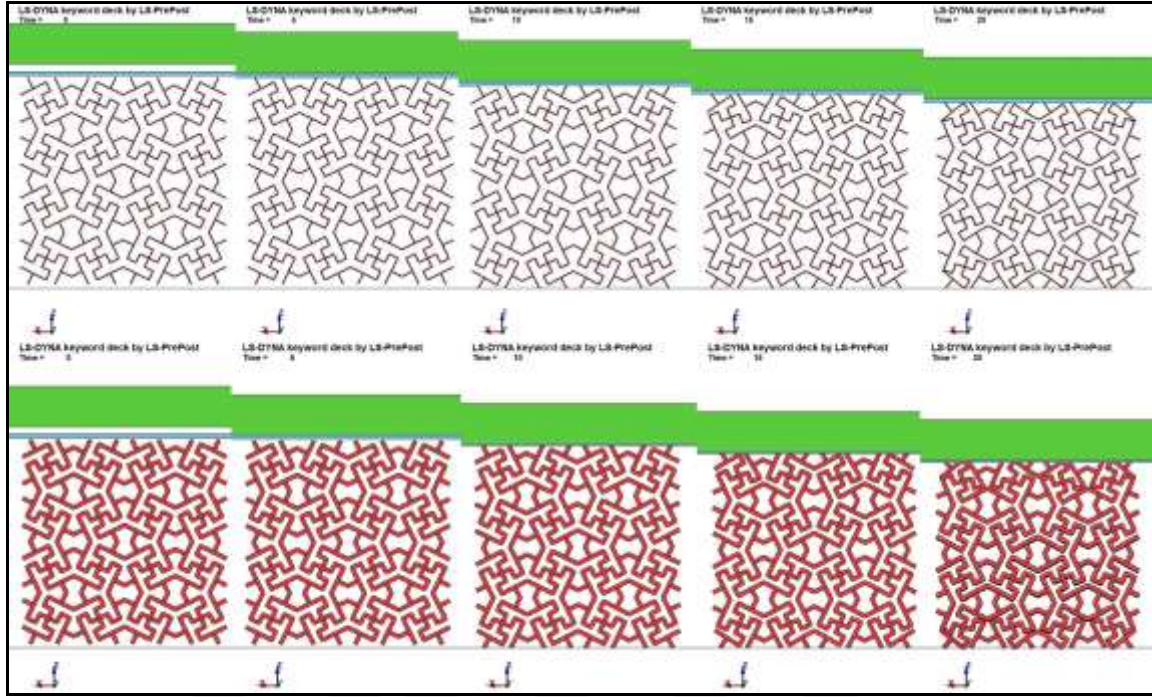
Kafes yapıların kullanılmasının ana nedenlerinden biri yüksek enerji emme kapasiteleridir. Tek eksenli düzlem içi sıkıştırma yüklemesinde yaprak auxetic yapı tasarımında, 0,80 mm geometrik iç kalınlıkta 20 J/g enerji emilimi ölçülürken, 3,00 mm geometrik iç kalınlıkta ise 114 J/g enerji hapsettiği bulunmuştur (Şekil 7.15). Re-entrant yapıları auxetic olmayan yapılara göre %57,75 kadar daha fazla enerji hapsetme kapasitesine sahiptir [118].



Şekil 7.15. Yaprak auxetic yapının hapsettiği enerji

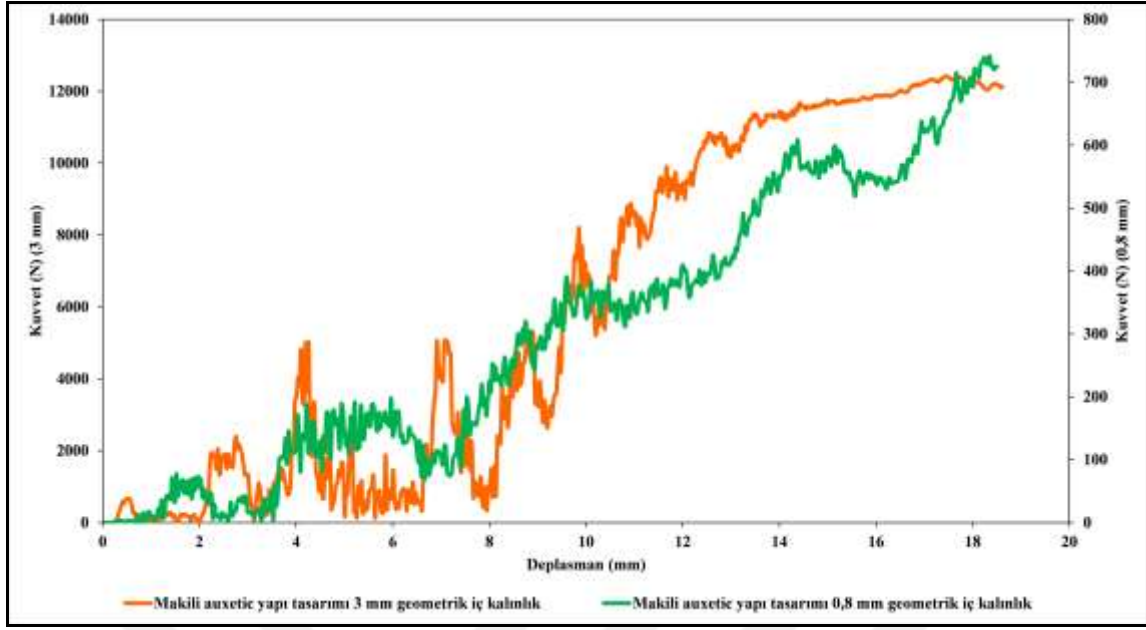
7.1.3. Makili auxetic yapı tasarımının eksplisit dinamik analiz sonuçları

Makili auxetic yapıda eksplisit analizler gerçekleştirilmiş olup, kuvvet ve deplasman grafikleri alınmıştır. Analizler, diğer analizlerde olduğu gibi 20 ms'de 25 mm ezme olacak kadar gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.16).



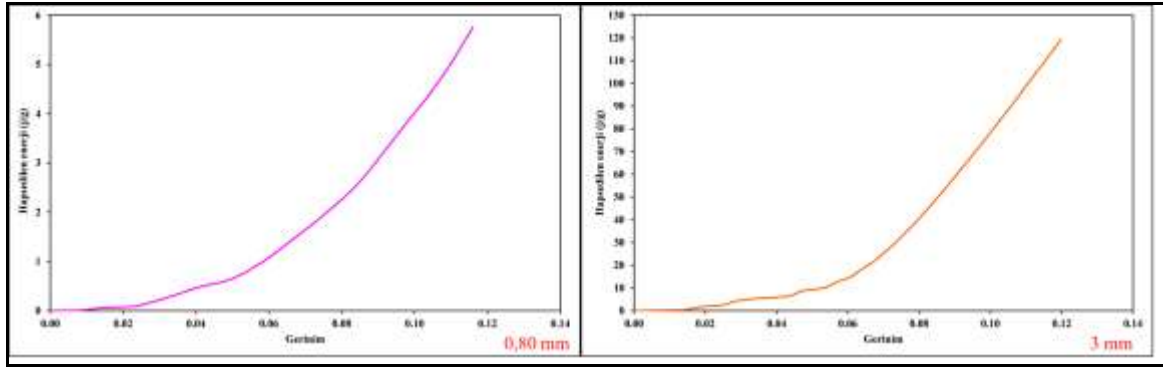
Şekil 7.16. Makili auxetic yapının eksplisit dinamik analiz görüntüleri

0,80 mm ile 3,00 mm geometrik iç kalınlıktaki numunelere z eksenini yönünde tek eksenli sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Bu sıkıştırma işlemi sırasında deplasman değişimiyle artan kuvvete bakılmıştır. Bu durumda 3,00 mm geometrik iç kalınlıkta 12000 N kuvvete ulaşırken 0,80 mm geometrik iç kalınlıkta ise 750 N kadar kuvvet değerine ulaşmıştır (Şekil 7.17). Birim hücrelerin çökmelerini alt ve üst kısımlarda görülmüştür. Bu tür yapılarda birim hücrelerin çökme çeşitleri çok farklı olmaktadır. Bunlarında en büyük nedeni birim hücrelerin geometrik farklılıklarından kaynaklanmaktadır [85]. İlk hücre sıraları çöktükçe kuvvet değeri düşer, ardından çöken hücrelerin yoğunlaşması nedeniyle kuvvet değeri tekrar artmaya başlamıştır.



Şekil 7.17. Makili auxetic yapıda kuvvet – deplasman grafiği

Sıkıştırma sırasında emilen toplam enerji, her numune için hesaplanmıştır. 0,80 mm geometrik iç kalınlıkta enerji hapsedme kapasitesi yaklaşık 6 J/g bulunurken, 3,00 mm geometrik iç kalınlıkta ise bu değerin yaklaşık 120 J/g olduğu bulunmuştur (Şekil 7.18). Yapıların geometrik iç kalınlıkları arttıkça hapsedtiği enerjinin arttığını yani doğru orantılı olarak artış ya da azalma gözlenmektedir.

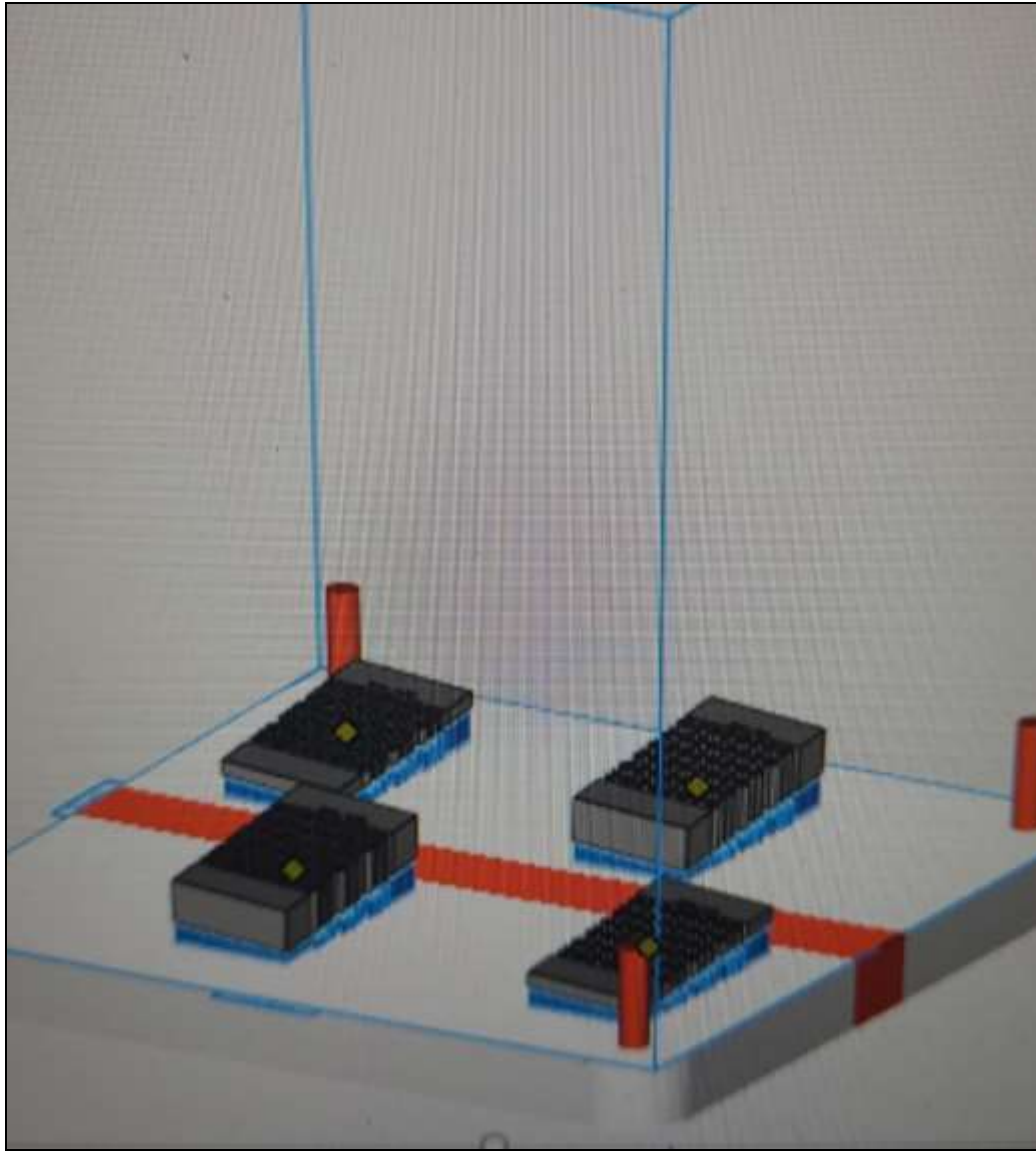


Şekil 7.18. Makili auxetic yapının hapsedtiği enerji



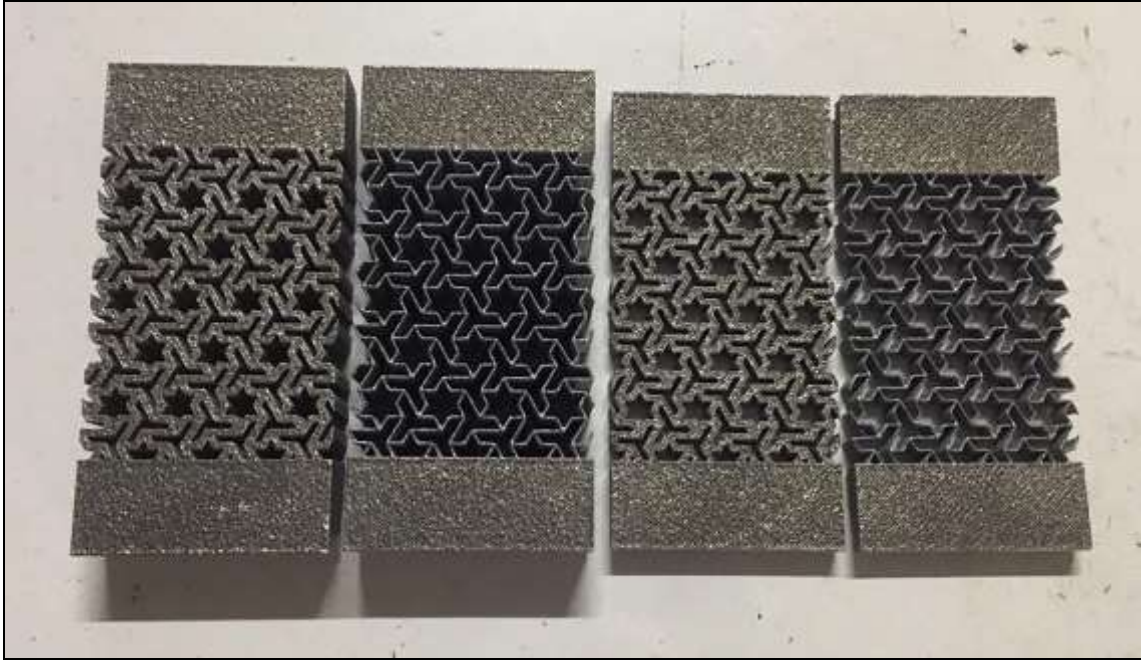
8. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez kapsamında tasarlanan 3 farklı auxetic yapının poisson oranları incelenmiştir. İncelemeler sonucunda altı yıldız mozaik auxetic yapı tasarlanan diğer yapılara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu nedenle altı yıldız mozaik auxetic yapı tasarımının analiz sonuçlarını deneysel sonuçlar ile karşılaştırmak için bu yapıya çekme ve basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 0,40 mm ile 1,25 mm geometrik iç kalınlıktaki altı yıldız mozaik auxetic numunelere uygulanmıştır.



Şekil 8.1. Eklemeli imalat ile üretilen yapıların inşa düzlemi

Eklemeli imalat ile üretimleri gerçekleşen numunelerin baskı parametreleri malzeme kompozisyonuna ve cihazın teknik yeteneklerine göre seçilmiştir. Genelde parametre setleri bir dizi geliştirme ve örnekleme sonucu oluşturuldukları için parça geometrisinin parametreler bir bağı olmadığından bağımsız olarak ele alınmıştır. İnşa düzlemi olarak Şekil 8.1’de görüleceği üzere x düzleminde üretim gerçekleştirilmiştir. X yönünde inşa edilmesinin nedeni; destek parçalarının daha az ve daha rahat ayrılması ve sıcaklık dağılımının bu yönde daha stabil dağılmasından ötürü numunelerin çarpılmasını önlemek amaçlanmıştır. Bu numunelerden eklemeli imalat yöntemiyle 3’er adet baskı alınmıştır (Resim 8.1).



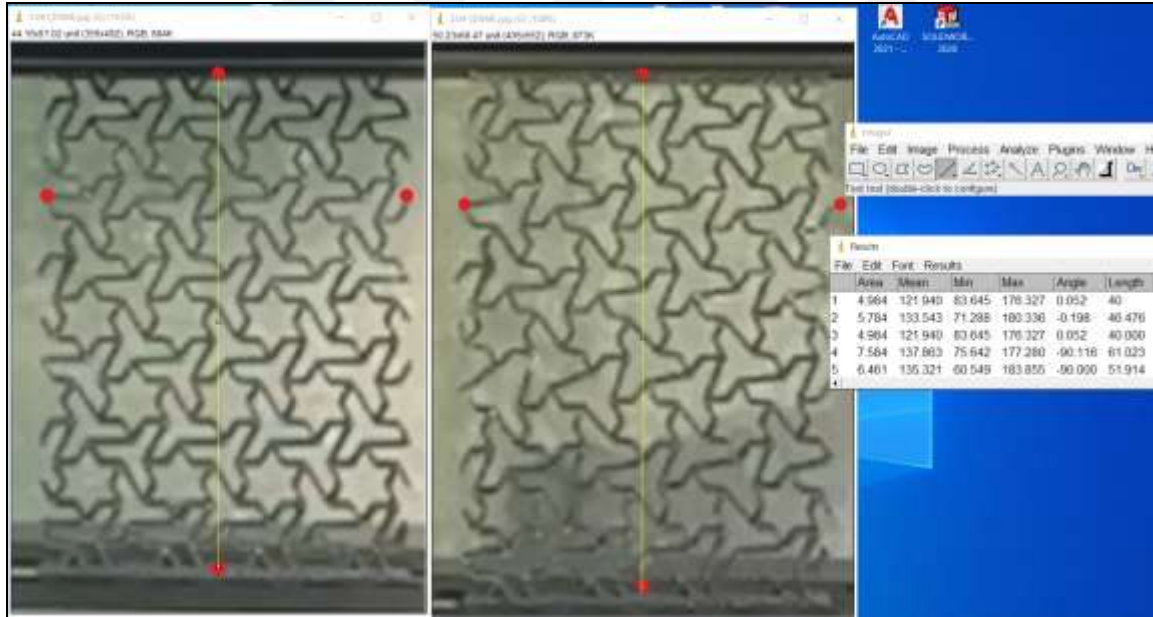
Resim 8.1. 6 yıldız mozaik auxetic yapının eklemeli imalat yöntemi ile 3B baskısı

Baskı deneyleri gerçekleştirilecek yapıların eklemeli imalat yöntemi ile üretilmesinden sonra ölçüsel kontrolleri profil projeksiyon ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Çizelge 8.1’de gösterildiği üzere çekme numuneleri için 5 mm olan kalınlıkta 0,40 mm geometrik kalınlıkta X ölçüsü 39,908 mm iken Y ölçüsü 51,812 mm olarak ölçülmüş olup, 1,25 mm geometrik iç kalınlıkta ise X ölçüsü 39,996 iken Y ölçüsü 51,778 mm olarak ölçülmüştür.

Çizelge 8.1. Profil projeksiyon ile üretim sonrası ölçüm sonuçları

		X	Y
5 mm kalınlık	0,40 mm geometrik		
	iç kalınlık	39,908	51,812
	1,25 mm geometrik		
	iç kalınlık	39,996	51,778
15 mm kalınlık	0,40 mm geometrik		
	iç kalınlık	40,280	52,222
	1,25 mm geometrik		
	iç kalınlık	40,030	51,902

Görüntü yakalama ve sonraki analiz yoluyla deformasyon tepkilerini yakından yakalamak için yapının kritik bağlantı noktaları Şekil 8.2'de görülen kırmızı işaretler aracılığıyla vurgulanmıştır.



Şekil 8.2. İşaretlenen numunelerin çekme deneyi sonrası IMAGE J ile ölçümleri

Çekme deneyleri için video ekstansometre olmadığından ötürü deneyleri doğrulamak amacıyla deney sonrasında ölçümler tekrardan profil projeksiyon ölçüm cihazında ölçülmüştür (Resim 8.2).



Resim 8.2. Numunelerin deney sonrası profil projeksiyon ile ölçülmesi

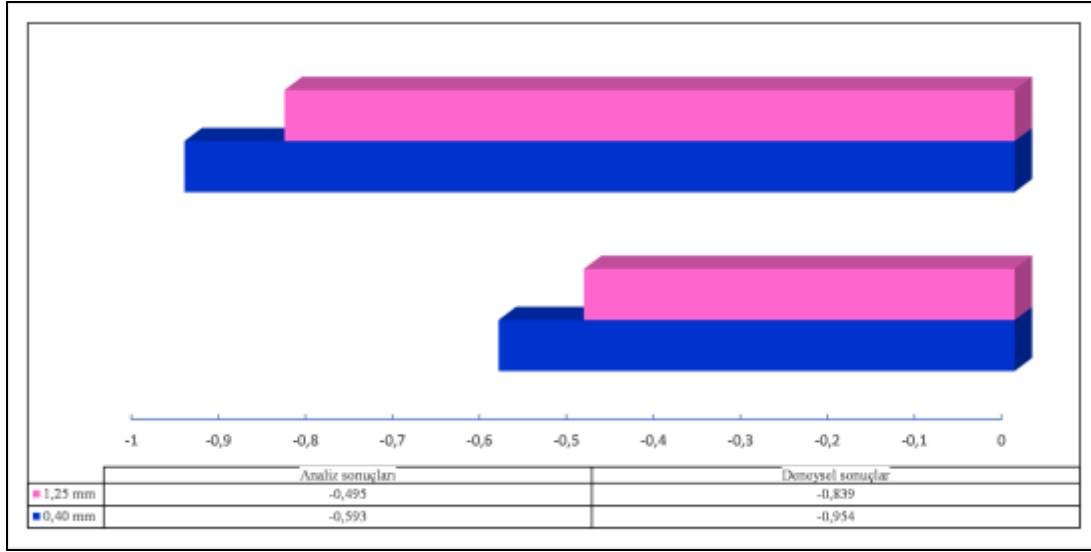
Ayrıca profil projeksiyon ölçüm metodunu da doğrulamak amacı ile IMAGE J ölçüm programı kullanılmıştır. Profil projeksiyon ölçüm cihazında bulunan sonuçlar Çizelge 8.2’de verilmiştir.

Çizelge 8.2. Profil projeksiyon ile deney sonrası numunelerin ölçüm sonuçları

		X_1	X_2	Y_1	Y_2
5 mm kalınlık	0,40 mm geometrik iç kalınlık	39,908	41,570	51,812	54,074
	1,25 mm geometrik iç kalınlık	39,996	40,450	51,778	52,478
15 mm kalınlık	0,40 mm geometrik iç kalınlık	40,280	36,288	52,222	36,554
	1,25 mm geometrik iç kalınlık	40,030	40,250	51,902	44,648

8.1. Altı Yıldız Mozaik Auxetic Yapının Analiz ile Deneysel Çalışmaları Sonuçların Karşılaştırılması

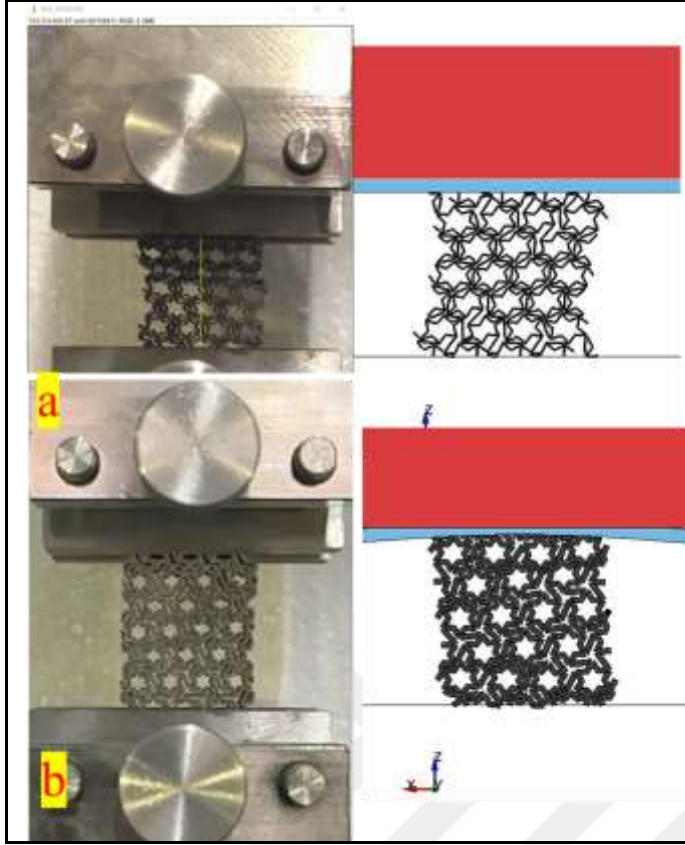
Deneylemlerden sonra ölçülen sonuçlar X_2 ve Y_2 olarak gösterilmiştir. Bu durumda 6 yıldız mozaik auxetic yapısının deney sonrasında 0,40 mm geometrik iç kalınlığa sahip yapıyı örnek alacak olursak, X_1 değeri 39,908 iken X_2 ’nin 41,570 olarak ölçüldüğünü ve Y yönünde çekme kuvvetinin etkisi ile Y_1 değerinin 51,812’den Y_2 54,074’e ulaştığı bulunmuştur. Bu durumda yapının auxetic özellik gösterdiği açıkça görülmektedir. Deneysel çalışmada auxetic yapının bu sonuçlara göre poisson oranları 0,40 mm geometrik iç kalınlığa sahip auxetic yapı için poisson oranı -0,956 iken, 1,25 mm geometrik iç kalınlığa sahip auxetic yapı için ise poisson oranı -0,839 olarak bulunmuştur (Şekil 8.3).



Şekil 8.3. Altı yıldız mozaik auxetic yapının analiz ve deneysel sonuçlarına poisson oranı karşılaştırması

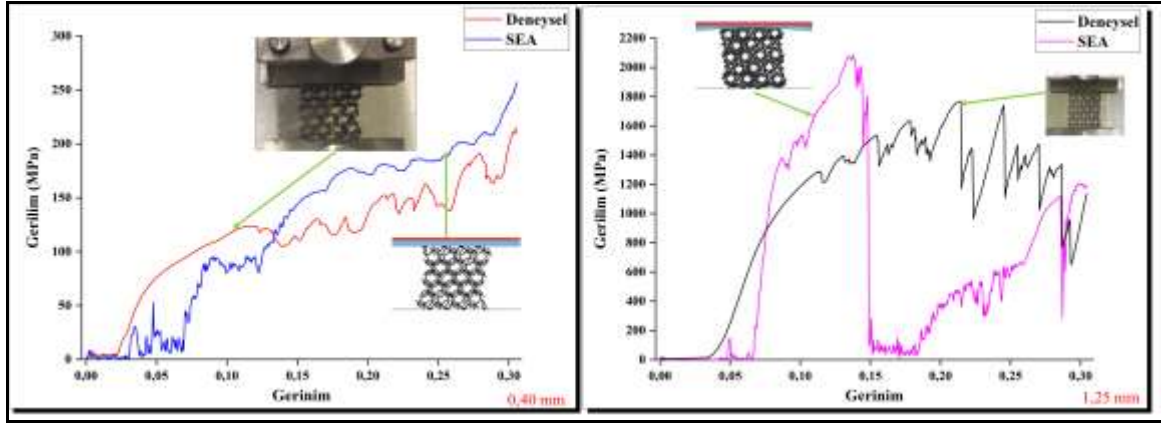
Deneysel sonuçların analiz sonuçlarına göre -1 negatif poisson oranına sınırına ulaştığı bulunmuştur. Altı yıldız mozaik auxetic yapıların yıldızları çekme yükü altında açılarak auxetic özellik göstermiştir. Analiz ve deneysel sonuçlar arasına 0,3 kadar bir fark gözlenmiştir. Bu farkın nedenleri arasında analiz programından kaynaklanan mesh parametrelerinden olduğu düşünülebilir.

Altı yıldız mozaik auxetic yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz deformasyon görüntüleri ile tutarlı davranış sergilemiştir (Resim 8.3). Tasarımda 0,40 mm geometrik iç kalınlığa sahip yapının 1,25 mm geometrik iç kalınlığa göre birim hücrelerde daha yoğun iç içe geçmeler gözlenmiştir. Tasarımlarda birim hücrelerinin ilk kırılma aşamasından sonra basma işlemine son verilmiştir. Bu nedenle 1,25 mm geometrik iç kalınlığa sahip yapı 0,40 mm geometrik iç kalınlığındaki yapıya göre daha az sıkışma durumu gözlenmiştir. Buda yapının ince olmasıyla elastik özelliğinin, kalın yapıya göre daha fazla olmasından kaynaklanmıştır.



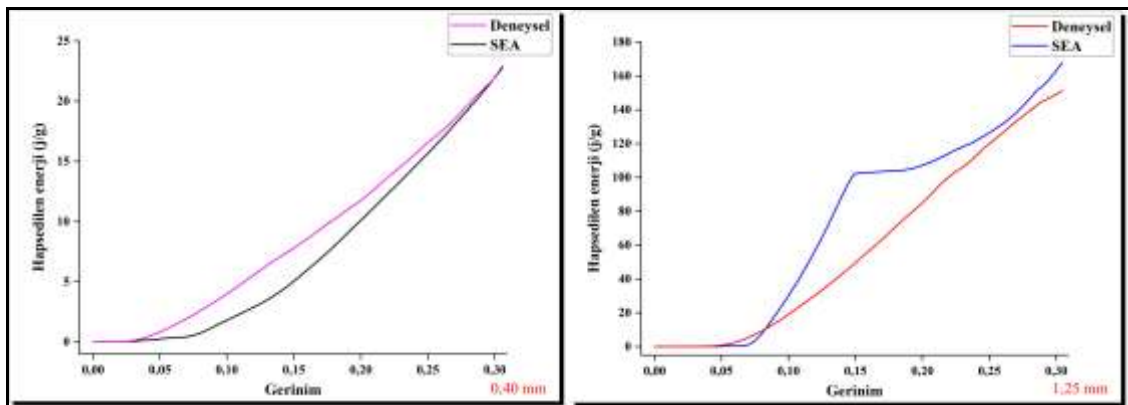
Resim 8.3. Altı yıldız mozaik auxetic yapının sonlu elemanlar ile deneysel görüntüleri (a) 0,40 mm kalınlıkta (b) 1,25 mm kalınlıkta

Şekil 8.4’de sonlu elemanlar modellemesi ve deneysel çalışmanın gerilim-gerinim diyagramları arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Deformasyonlar başlangıçta elastik deformasyonla başlamıştır. Ancak elastik veya plastik burkulma nedeniyle gerilim kritik bir seviyeye ulaştığında hücreler iç içe girmiştir. Birim hücrenin duvarları uygulanan sıkıştırma nedeniyle çökmeler arttıkça ve enerji emilimi büyük ölçüde artmaktadır. Ayrıca daha fazla sıkıştırma nedeniyle tüm hücreler çökerse malzemenin sertliği artacak ve yapı daha yoğun olacaktır. Logakannan ve diğerleri [122], tarafından çapraz bağlı ve çapraz bağlı olmayan re-entrant elmas yapıları ile gerilim-gerinim eğrileri ve enerji emilimi açısından geleneksel re-entrant ve balpeteği yapısı ile karşılaştırmışlardır. Çapraz bağlantılı ve çapraz bağlantılı olmayan re-entrant yapıların, geleneksel re-entrant yapısına göre %140 daha yüksek gerilim değerine sahip olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca bu yapıların sertliklerine de bakıldığında birim hücrelerin elmaslarına çapraz bağların eklenmesi yapıyı sertleştirmiş olup, minimum Poisson oranıyla sonuçlanmış ve mukavemeti önemli ölçüde arttığını bulmuşlardır.



Şekil 8.4. Altı yıldız mozaik auxetic yapının gerilim – gerinim diyagramı

Deneysel çalışmada altı yıldız mozaik auxetic yapının gerilim ve gerinim diyagramının altındaki kalan alan hesaplanarak enerji sönümleme kabiliyeti bulunmuştur. Bu durumda altı yıldız mozaik auxetic yapı tasarımında 0,40 mm geometrik iç kalınlıkta hapsettiği enerji, deneysel ve sonlu elemanlar çözümünde birbirine yakın sonuçlar çıkmış olup, yaklaşık 27 J/g bir enerji hapsettiği bulunmuştur. 1,25 mm geometrik iç kalınlıkta da yaklaşık %9'luk hata payı ile hapsettiği enerjiyi yaklaşık 160 J/g olarak bulunmuştur (Şekil 8.5). Guo ve diğerlerinin [123], yaptığı çalışmada da olduğu gibi okbaşı auxetic yapısı ile okucu yapısını “U” şeklinde yaparak yeni bir yapının basma kuvveti altında gerilim – gerinim analizlerine bakarak enerji sönümleme kabiliyetine bakmışlardır. Bu durumda yeni tasarlanan yapının, okucu auxetic geometrisine göre daha iyi mekanik özelliklerinden ötürü enerji sönümleme kabiliyetinin daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca bu “U” şeklinde okucu yapısının geleneksel okucu yapısına göre daha fazla auxetic özellik gösterdiğini bulmuşlardır.



Şekil 8.5. Altı yıldız mozaik auxetic yapının sonlu elemanlar ve deneysel sonuçlara göre hapsettiği enerji



9. ALTI YILDIZ MOZAİK AUXETİC YAPI İLE TASARLANAN AYAK PEDİ (ÖRNEK VAKA ÇALIŞMASI)

Askeri operasyonlarda personelin patlama tehditlerine karşı güvenliği için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Genellikle mayın patlamasına karşı enerji absorbe edebilmesi ve enerjiyi hızlı ve verimli bir şekilde dağıtabilmesi gerekmektedir [110]. Auxetic yapıların yüksek enerji sönümleme kabiliyeti ile savunma sistemlerinde yer bulmaya başlamıştır. Negatif poisson oranı ile karakterize edilen auxetic yapılar ile enerji sönümleyebilen, darbelere karşı dayanıklı olan ve aynı zamanda hafif tasarımlar gerçekleştirilmiştir [111].

Mayınlar özellikle anti-tank (AT) yada diğer adıyla tanksavar mayınları askeri araçlar ve personeller için bir tehdit unsuru olmuştur [112]. AT mayınları, genellikle zırhlı savaş araçlarına zarar vermesi için tasarlanmıştır. Bu mayınlar, infilak ya da kimyasal maddelerin güçlü patlayıcı ve büyük tahrip güçleri ile tüm toprak türlerine, demiryolu hatlarına, kıyı bölgelere gömülebilmektedir. Mayın tarlaları oluşturmak için ayrı ayrı veya gruplar halinde de gömülebirlirler.

İlk modern tanksavar mayınları I. Dünya Savaşı'nda ilk zırhlı araçlara karşı bir silah olarak ortaya çıkmıştır. Dünya savaşı sırasında AT mayınları üretimindeki teknolojik ilerleme ile bu mayınların yaygınlaşmasını sağlamıştır. 2. Dünya Savaşı'ndan sonra teknolojinin daha da gelişmesi ile AT mayını, en etkili ve en ucuz ölümcül silahlardan olmuştur [113].

Bir aracın altında mayın patlaması sonucunda parçalanma, yangın, gaz, patlama, gibi etkilerin yanı sıra mekanik şok ve dikey darbe yükü de oluşmaktadır. Tüm bu etkiler araç içindeki personelleri hem psikolojik hem de fiziksel olarak etkilemektedir.

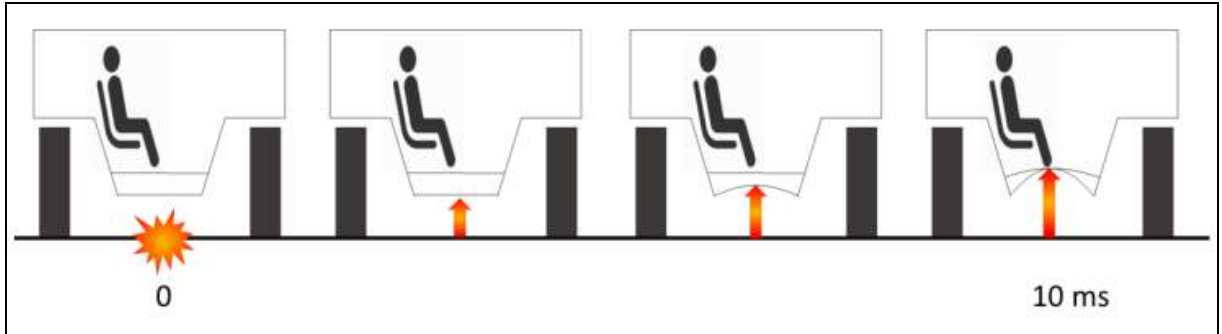
NATO ülkeleri, askeri araçların ve personellerin bu tür mayınlardan korumak amacıyla NATO-STANAG 4569 standardını oluşturmuşlardır.

Bir mayın patlamasının ardından araçta bir şok dalgası meydana gelmektedir. Elastik ve aynı zamanda plastik deformasyon ile birlikte büyük bir etki meydana gelmektedir. Bu tür büyük etkilerde aracın bütünlüğü korunsun bile ağırlıklı olarak şok ve etki aracın içindeki personeli etkilemektedir.

9.1. Anti-Tank Mayın Patlamasının Etkileri

9.1.1. Yerel etkiler

Bir aracın altında mayın patlaması sonucunda bir şok dalgası oluşmaktadır. Bu şok dalgası 0,5 ms içinde aracın alt plakasına çarpar ve daha sonra geri yansıyan olarak şok dalgası ile alt plakanın ivmelenmesiyle son büyük bir basınca dönüşmektedir. Patlamadan yaklaşık 5 ms içinde alt plaka hem elastik hem de plastik deformasyona uğramaktadır. Şok dalgası ayrıca araçta mekanik bir şoka da neden olmaktadır (Şekil 9.1) [114] .



Şekil 9.1. Yerel etkiler [114]

9.1.2. Küresel etkiler

Aracın altından yansıyan patlaması dalgası ile, aracın alt kısmının tamamına kısa süreliğine bir basınç kuvveti etki eder. Bu basınç kuvvetinin toplam darbe yükü, aracın tamamının sıçramasına neden olan ilk dikey kuvvettir. Sıçrama yüksekliği toplam kütle ve ağırlık merkezi etrafındaki momentlere bağlıdır. Genel olarak patlamadan sonra aracın tamamının harekete geçmesi yaklaşık 10 ila 20 ms içinde olurken, maksimum yüksekliğe ulaşması ise 100 ila 300 ms arasında gerçekleşmektedir [114].

9.1.3. Aşağı düşme etkileri

Patlama sonrası maksimum yüksekliğe ulaşan araç yer çekiminin etkisiyle aşağıya düşmeye başlamaktadır. Gerçek mayın patlamalarında araç hareket halinde olduğundan patlama sonucu oluşan çukura düşmemektedir. Deneysel çalışmalarda statik bir durumda test edildiğinden ötürü araç patlama çukuruna düştüğünden kaynaklı olarak daha yüksek

dikey yüke maruz kalmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda düşme aşamasında yerel ve küresel etkiler önemli yükler oluşturmamaktadır. Bu yüzden bu tür olaylar için kullanılan önleme sistemleri yerel ve küresel etkilerde hasar görmemeli ve araç içindeki personel korunmalıdır [114].

9.1.4. Patlama sonrası etkiler

Mayın patlamasından sonra meydana gelen takla atma ve çarpma gibi olaylar sınır koşullarındaki yüksek değişkenlik nedeniyle dikkate alınmamaktadır. Çarpışma testleri ile ilgili incelemeler değerlendirilmelidir [114].

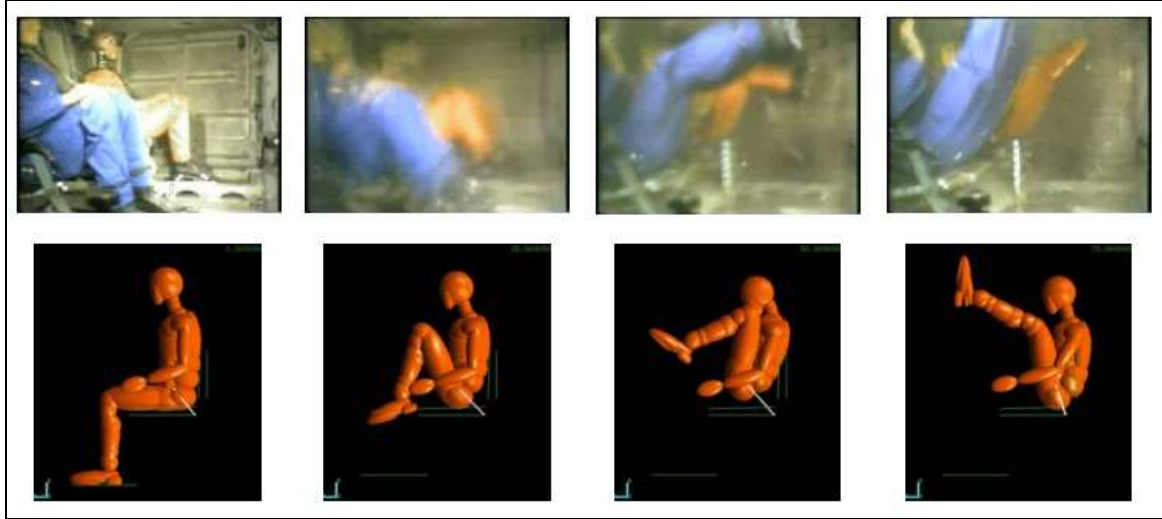
9.2. Mayın Patlamasının Araç İçindeki Personele Etkisi

Mayın patlamalarında araç bütünlüğü sağlanmasına rağmen aşırı ivmenin, basıncın, gazların ve ısının araç içindeki personele etkileri olmaktadır. Patlama süresince araç içindeki personel yerel ve küresel etkilerden etkilenmektedir.

İnsan vücudunun doğrudan şok yüküne uğraması birincil etki olarak adlandırılmaktadır. Patlamada oluşan yerel etkiye maruz kalmasına ikincil etki denirken, vücudun araç içindeki hareketinden kaynaklı darbelere ise üçüncül etki denilmektedir.

Araç içindeki personelin patlama sırasında göreceği hasar oluşacak yüklerin şiddeti, patlama noktası ile personel arasındaki uzaklığın yanı sıra aracın yapısına, aracın alt plakasının geometrik yapısına, personel koltuk ve bağlantılarına, ayak plakası gibi aracın iç yapısındaki konfigürasyonlara da bağlı olmaktadır.

Genel olarak bacak ve ayak bileği patlama noktasına en yakın bölgedir. Bu yüzden mayın patlamalarında en çok etkilenen bölge ayak, ayak bileği ve bacaklardır. Ayaklar aracın zeminine yerleştirildiğinde patlamanın ardından şiddetli bir şekilde yüke maruz kalarak ivmelenmektedir. İvmelenme kuvveti ile bacaklar aracın diğer parçalarına çarpmasıyla yukarı doğru hareket eder. Bu hareket ile bel omurgasına ve vücudun diğer kısımlarına da etki etmektedir (Resim 9.1).

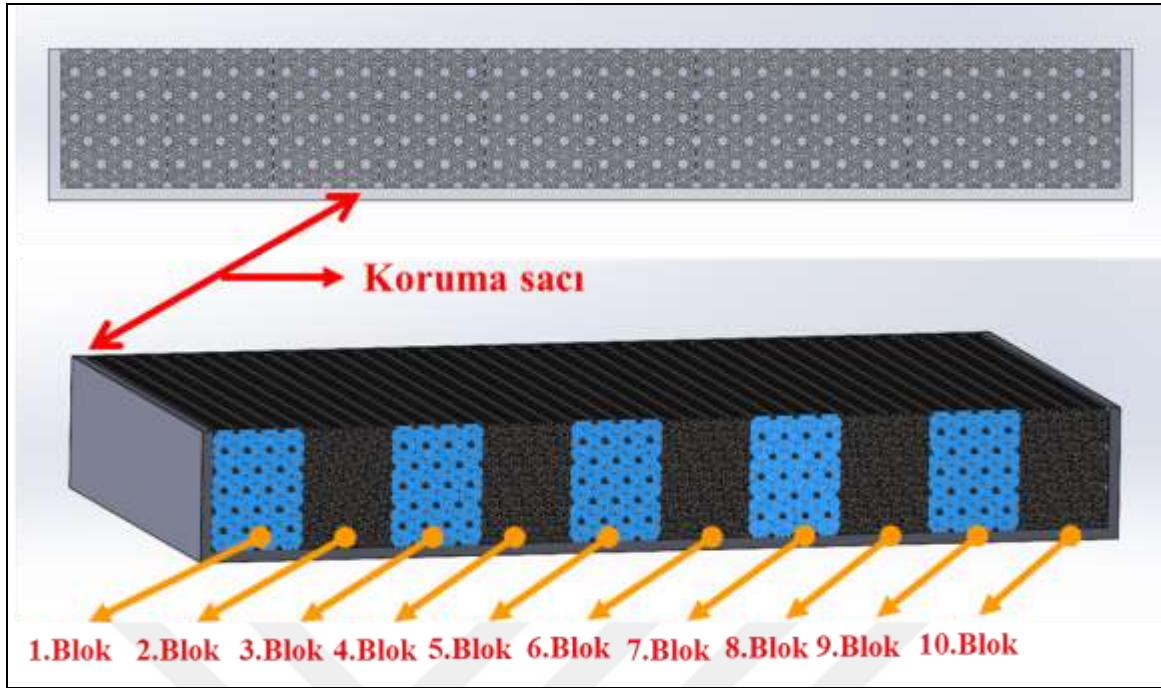


Resim 9.1. Patlama anında ayak ve bacakların hareketi [114]

Bu bölümde de amacımız Resim 9.1’de görüleceği üzere ayak bileğine ve bacaklara gelen yükü absorbe etmek amacıyla bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Personelin ayağının altına yerleştirilen auxetic yapı bir plaka ile ayak/ayak bileği ve bacak yaralanmalarını minimize etmek amaçlanmıştır.

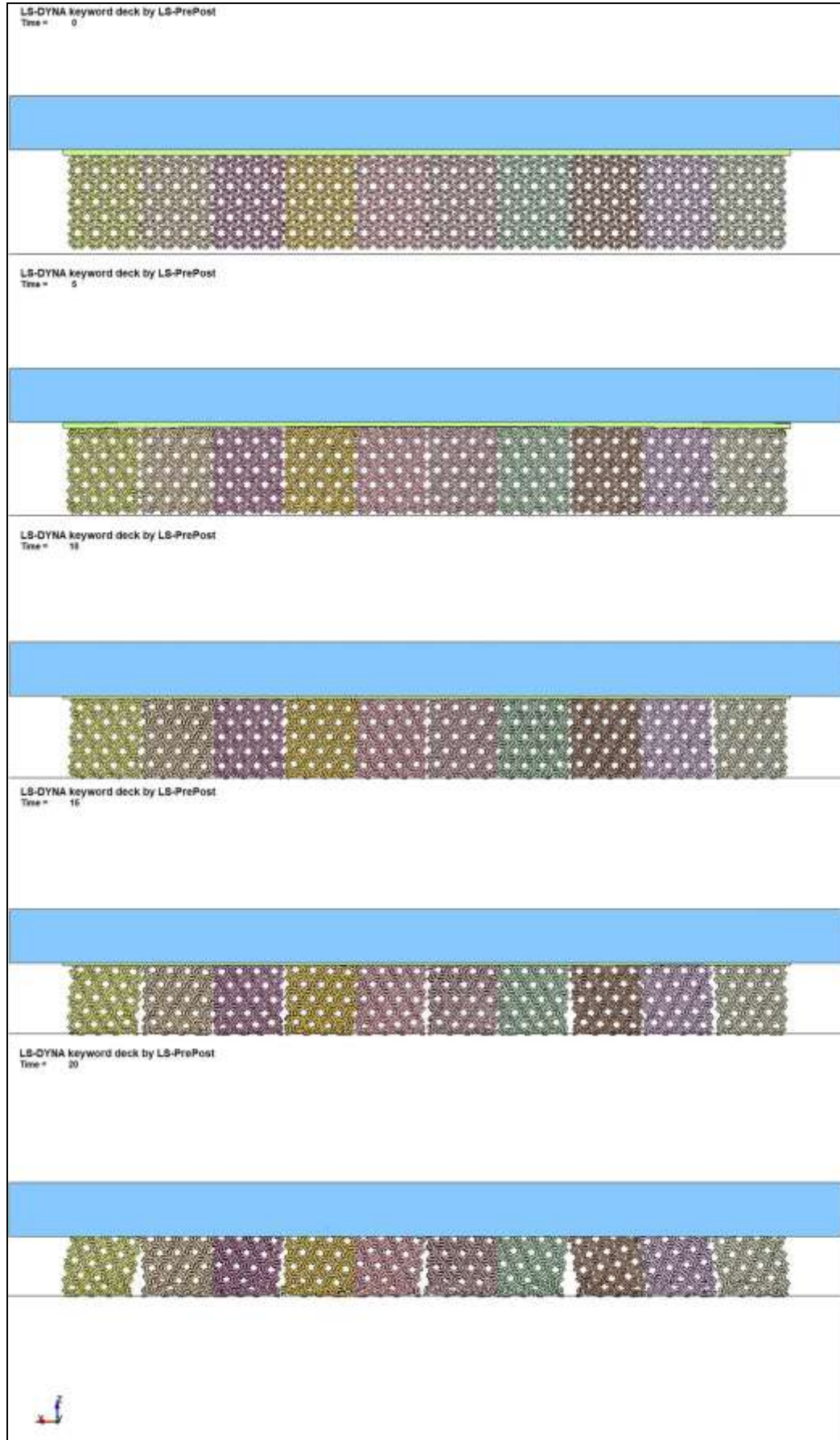
9.3. Auxetic Yapı ile Tasarlanmış Ayak Pedi ve Analizi

Askeri zırhlı araçlarda mayın patlaması sonucu personelin ayak, ayak bileği ve bacaklarına gelen hasar verici kuvveti azaltarak yaralanma seviyesini en aza indirmek amacıyla ayak pedi tasarlanmış ve auxetic yapı bu ayak pedine entegre edilmiştir. Bu çalışmada tasarlanan 3 farklı auxetic yapıdan altı yıldız mozaik auxetic yapı olarak adlandırılan yapı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmaları sonucunda 1,25 mm geometrik iç kalınlığa sahip yapı 400x400 mm 6061 alüminyum kutu içerisine yerleştirilmiştir. Savunma sistemi ekipmanları tasarımlarında ağırlık önemli bir parametre olduğu için malzeme olarak hafif olan alüminyum alaşımı seçilmiştir. 1,25 mm geometrik iç kalınlığa sahip yapı 10 blok halinde alüminyum kutuya yerleştirilmiştir (Şekil 9.2).



Şekil 9.2. Ayak pedinin 3B tasarımı

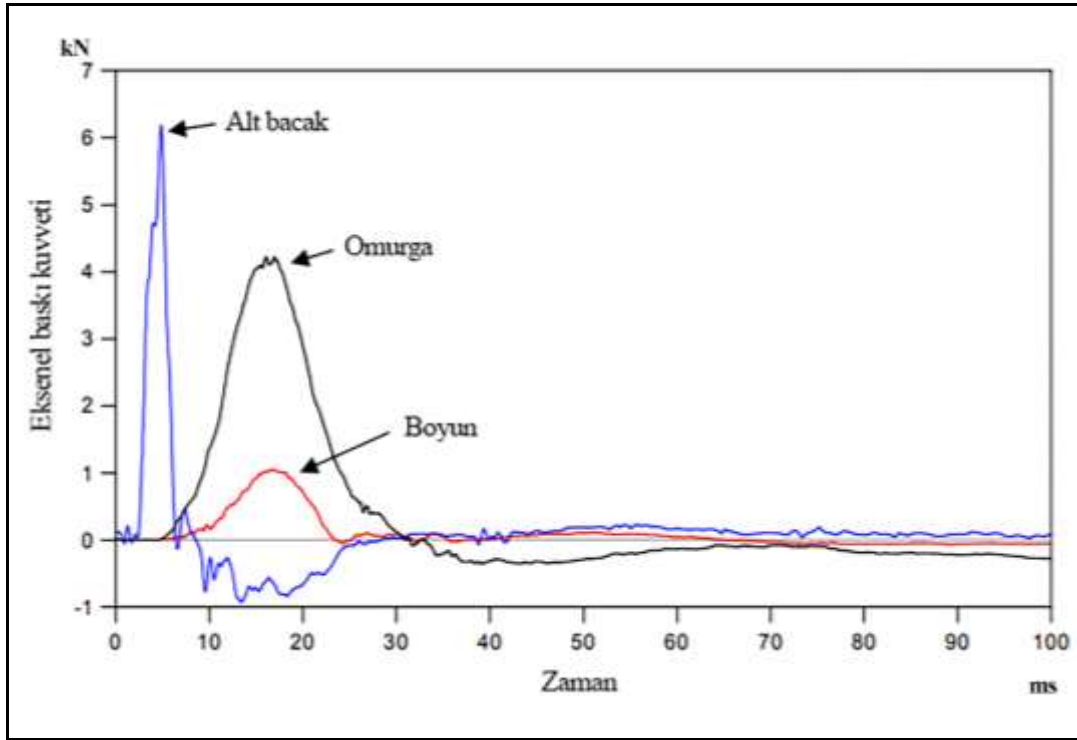
Tasarım, Solidworks 2020 3B yazılım programı ile çizilmiştir. Tasarım “x.t” formatında kaydedilerek Hypermesh programında ağ modelleri yapılmıştır. “.k” uzantılı olarak kaydedilen tasarım LS-Prepost programında hazırlanarak LS-Dyna programında eksplisit dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz 20 ms’de 25 mm boyunca sıkıştırma uygulanarak tasarımın ne kadar kuvveti absorbe ettiği öğrenilmesi amaçlanmıştır. Bu yüzden yapının enerji sönümlemesini bulabilmek için kuvvet – deplasman grafiği alınmıştır. Analizin yapılması için seçim kartları diğer bölümde tek yapılarda uygulandığı gibi aynı işlemler ayak pedi içinde yapılmıştır (Şekil 9.3).



Şekil 9.3. Ayak pedinin eksplisit dinamik analizi

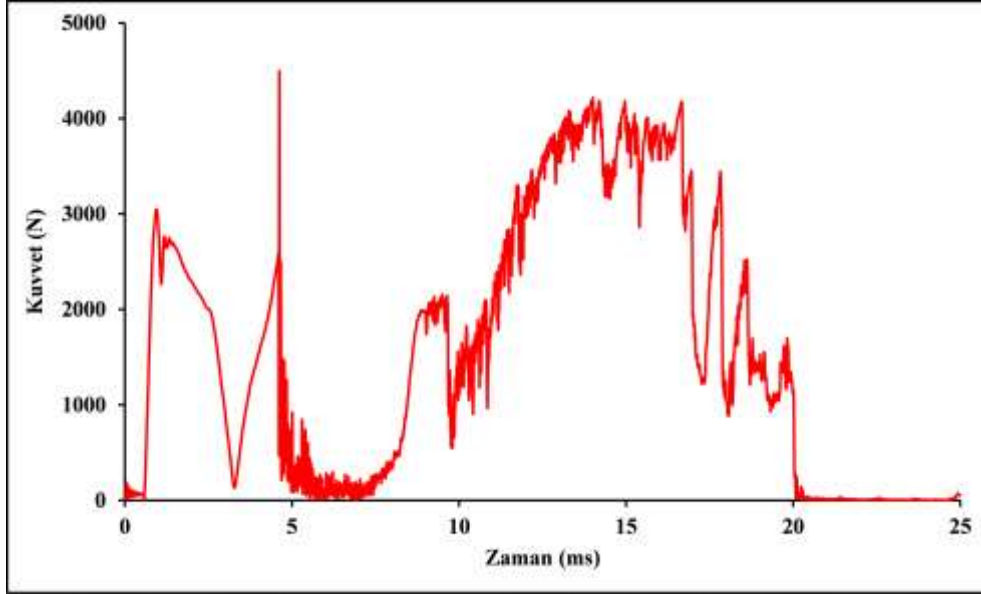
9.4. Ayak Pedinin Eksplicit Dinamik Analiz Sonuçları

Ls-Dyna’da eksplisit analizi yapılan tasarım için Şekil 8.4’deki grafik değerlerini yakalamak amaçlanmıştır. Bir mayın patlamasında yerel etkilerde tibia’ya gelen maksimum kuvvet yaklaşık 6 kN’dur. Ayrıca omurgaya gelen maksimum kuvvetin patlamadan yaklaşık 20 ms sonra etki ettiği gözlenmektedir [124].



Şekil. 9.4. Yerel etkilerin farklı vücut bölgelerine etkisi [124]

Bu çalışmada yapılan analiz sonuçlarında uygulanan kuvvet değerinin 6 kN'nun altında kalması amaçlanmıştır. Şekil 8.5'de görüldüğü üzere tasarımın ilk 5 ms'de maksimum ulaştığı kuvvet değeri yaklaşık 4,5 kN ölçülmüştür. Ayrıca auxetic yapının enerji sönmülemesiyle 20 ms sonuna kadar değişken olarak maksimum 4 kN değerlerine ulaşılmaktadır.



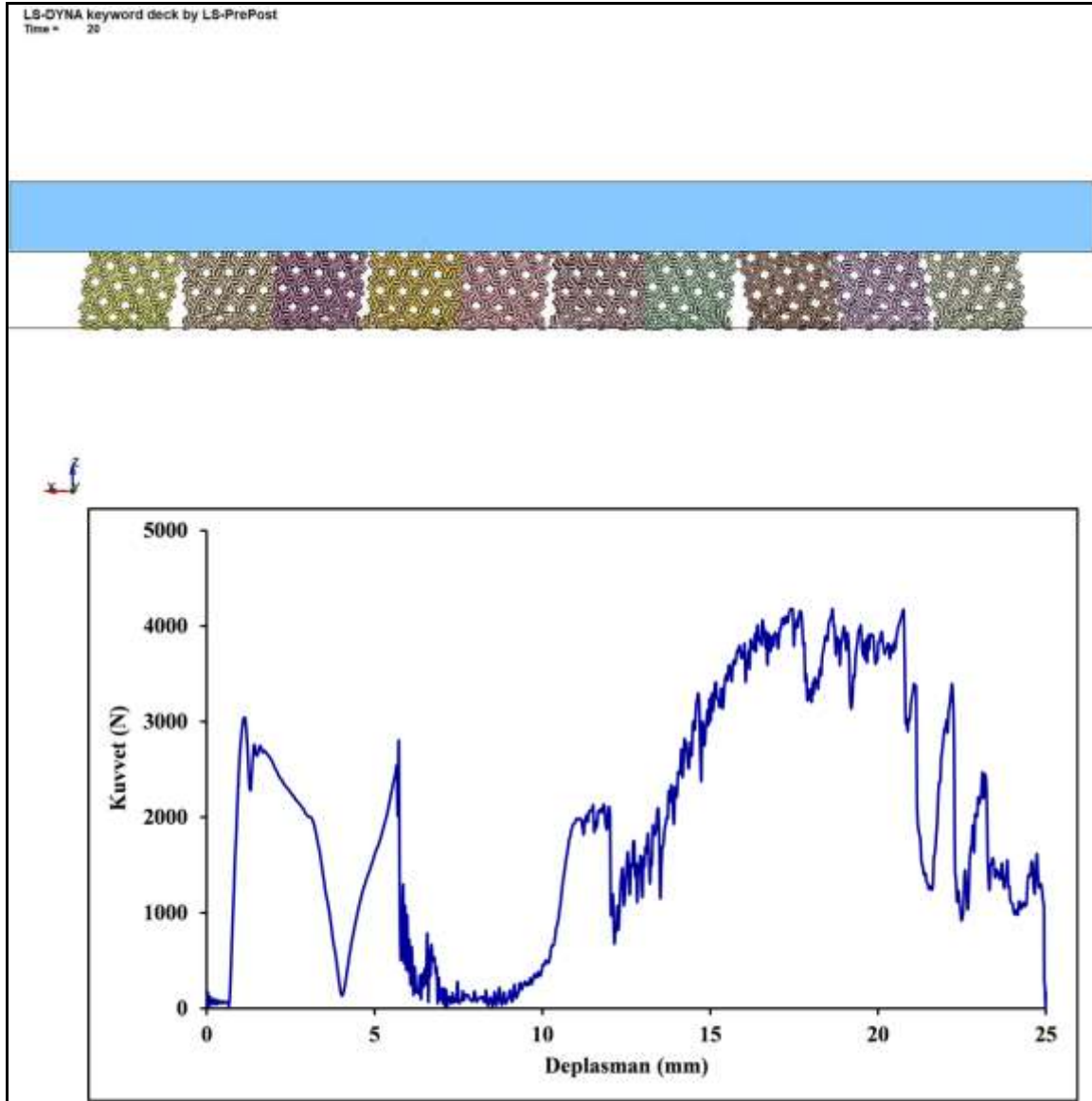
Şekil 9.5. Ayak pedinin kuvvet – zaman grafiği

AEP-55 vol2 prosedüründe tanımlanan, yaralanma limit değerleri Çizelge 9.1’de verilmiştir.

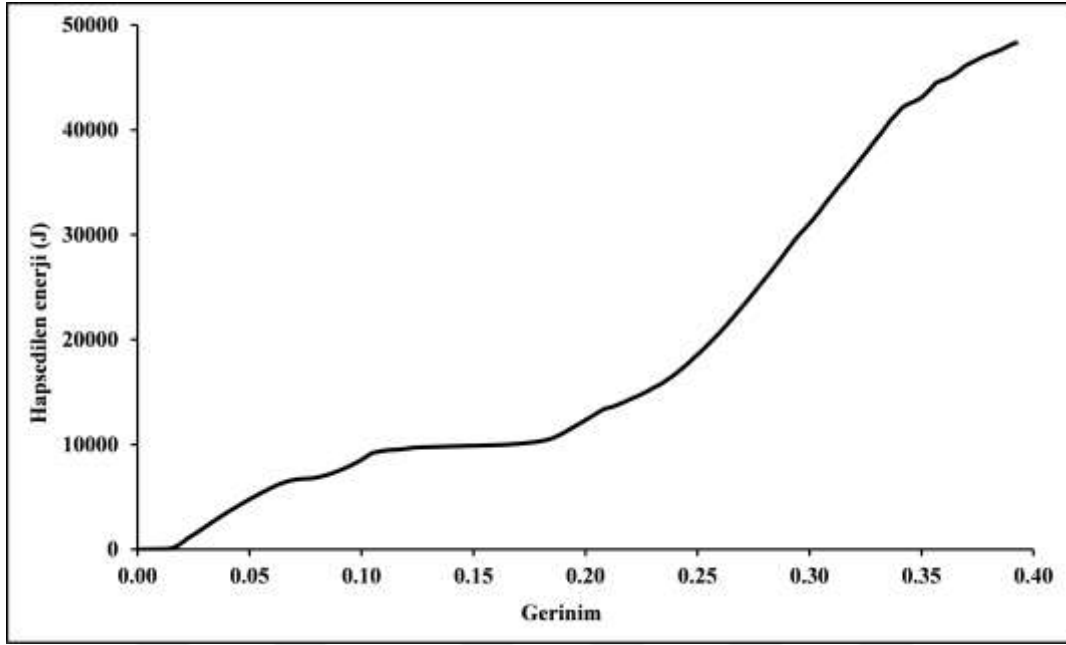
Çizelge 9.1. AEP-55 vol2 standardına göre yaralanma limit değerleri [125]

Vücut Bölgesi	Kriter	Limit Değer
Baş	Baş Yaralanma Kriteri	250
Boyun	Eksenel Basma Kuvveti	4,0 kN – 0 ms / 1,1 kN > 30 ms
	Eksenel Gerilme Kuvveti	3,3 kN @ 0 ms / 2,8 kN @ 35 ms / 1,1 kN > 45 ms
	Kesme Kuvveti	3,1 kN @ 0 ms / 1,5 kN @ 25-35 ms / 1,1 kN > 45 ms
	Eğilme Momenti (Esname)	190 Nm
	Eğilme Momenti (Uzama)	77 Nm
Göğüs Kafesi	Göğüs Kafesi Sıkışma Kriteri	30 mm
	Viskoz Kriteri	0,70 m/s
Omurga	Dinamik Reaksiyon Endeksi (DRI)	17,7
Üst Bacak	Eksenel Basma Kuvveti	6,9 kN
Alt Bacak	Eksenel Basma Kuvveti	5,4 kN (HIII) / 2,6 kN (MIL-LX)

AEP-55 vol2 yaralanma kriterine göre Şekil 9.6’da görülen kuvvet – deplasman grafiğinde tasarımın strok mesafesinde karşıladığı kuvveti göstermektedir. Tasarımın %50’sine kadar ezilme gerçekleştiğinde karşıladığı kuvvet 4,4 kN olarak bulunmuştur.



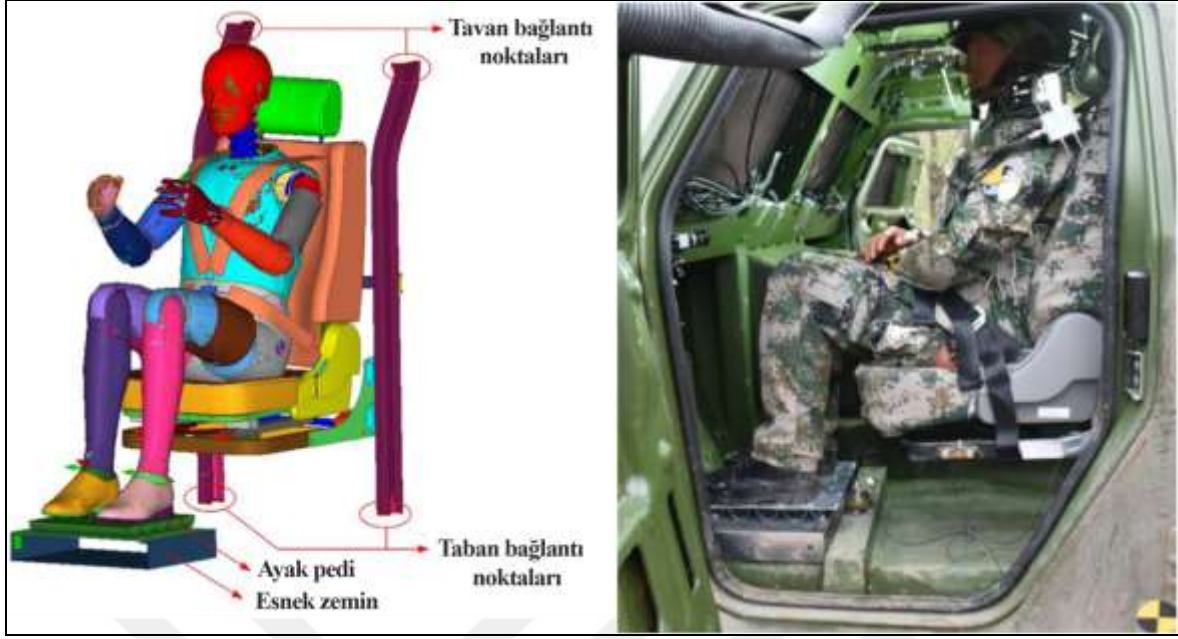
Şekil 9.6. Ayak pedinin kuvvet – deplasman grafiği



Şekil 9.7. Ayak pedinin enerji absorbe grafiği

Kuvvet – deplasman grafiğinin 20 ms’de karşıladığı kuvvet değeri 4 kN bulunmuştur. Tibia için yaralanma limit değeri 5,4 kN olarak AEP-55 vol2 prosedüründe verilmiştir. Tasarımın analiz sonucunda karşıladığı kuvvet, limit değerinin altında kalarak bu şekilde yapılan bir tasarımın böyle bir enerjiyi sönümleyeceği öngörülmüştür (Şekil 9.7). Ayrıca bu tasarımın hapsedtiği enerji değerinin 50000 J olduğu bulunmuştur. Örnek ile açıklamak gerekirse 1 gram TNT, patlama sırasında 4100 ila 4602 Joule’lük enerji açığa çıkarır. TNT tonunu tanımlamak için bu değer, tam olarak olarak 1 gram TNT = 4184 J eşitliğiyle standart hale getirilmiştir [126].

Cong ve diğerleri [127], yaptıkları çalışmada 6 kg’lık TNT patlayıcıyı 100 mm toprağın altına gömerek zırlı bir aracın patlama simülasyon analizlerini ve deneysel çalışmasını rapor etmişlerdir (Şekil 9.10).



Şekil 9.8. Zırhlı bir araca uygulanan simülasyon ve deneysel görüntüler [127]

Tibia kemiğine gelen kuvvetin tepe noktasını 6,261 kN olarak ölçerken simülasyonda %0,72 hata payıyla bu değeri 6,216 kN olarak ölçmüşlerdir. Bulunan bu değer AEP-55 standardının alt bacak için geçerli olan yaralanma kriteri 5,4 kN sınır değerini aşmıştır. Ancak ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) yöntemine göre deneysel ve simülasyon sonuçlarının kabul edilebilir aralıkta olduğu sonucuna varmışlardır. Bu durumda vaka çalışmasında auxetic yapı ile tasarlanan ayak pedinin böyle bir senaryoya göre yeterli koruma sağlayabileceği öngörülmüştür.



10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında İslami motif ve desenlerden esinlenilerek 3 adet özgün kafes yapı tasarlanmıştır. Tasarlanan kafes yapıların poisson oranı sonlu elemanlar analizi kullanılarak incelenmiştir. Auxetic kafes yapılara altı yıldız mozaik auxetic yapı, yaprak auxetic yapı, makili auxetic yapı isimleri verilmiştir. Değişken parametre olarak matris türleri ile geometrilerin iç kalınlıkları kullanılmış, matris ile kalınlığın poisson oranı ile olan ilişkisine bakılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- İncelenen bütün kafes yapıların negatif poisson oranına sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Altı yıldız mozaik auxetic yapıda geometrik iç kalınlık azaldıkça poisson oranı değeri -1'e yaklaşmıştır
- 6x3 matrisli 0,40 mm geometrik iç kalınlığa sahip yapının poisson oranı -0,665464 bulunurken, 6x4 matrisli 0,40 mm geometrik iç kalınlığa sahip yapının poisson oranı -0,592753 olarak ölçülmüştür. Ancak yapının genişliğinin azalmasından dolayı deneysel çalışmalarda ani kırılmalara sebebiyet vereceğinden çalışmalar 6x4 matrisli yapı üzerinden yapılmıştır.
- Yaprak auxetic yapıda geometrik iç kalınlık arttıkça poisson oranı 0'a yaklaşma eğilimi göstermiştir. 0,80 mm geometrik iç kalınlıkta poisson oranı -0,9515 bulunurken, en yüksek geometrik iç kalınlık olan 3,00 mm'de poisson oranı -0,7769 olarak hesaplanmıştır.
- Makili auxetic yapıda 4x4 matrisli kafes yapısının geometrik iç kalınlığı arttıkça poisson oranının -0,5'e yaklaştığı gözlemlenmiştir. 0,80 mm geometrik iç kalınlıkta -0,2378 poisson oranı bulunurken, 3,00 mm kalınlıkta -0,2567 poisson oranı bulunmuştur. Bu yapıda kalınlık arttıkça poisson oranı -1'e yaklaşmıştır.
- 3 farklı auxetic yapı tasarımından altı yıldız mozaik auxetic yapı ile yaprak auxetic yapıda geometrik iç kalınlık arttıkça poisson oranı 0'a yaklaşım eğilimi gösterirken, makili auxetic yapı tasarımında ise geometrik iç kalınlık arttıkça poisson oranı da -1 değerine yaklaşmıştır. Buda farklı geometrik yapıların değişken poisson oranına sahip olduğunu kanıtlamıştır.
- Altı yıldız mozaik auxetic yapı için toplam deformasyon en fazla 6x3 matrisli 0,40 mm geometrik iç kalınlıkta 0,1164 mm olarak bulunmuştur. 6x4 matraste 0,40 mm

geometrik iç kalınlıkta toplam deformasyon miktarı ise 0,095 mm olarak ölçülmüştür. Analizleri gerçekleştirilen iki matrisli yapıda da geometrik iç kalınlık arttıkça toplam deformasyon miktarı azalmıştır. Poisson oranı ile toplam deformasyon sonuçlarının doğru orantılı olarak azaldığı bulunmuştur

- Yaprak ve makili auxetic yapı için toplam deformasyon miktarı, geometrik iç kalınlık arttıkça azalmıştır. Tasarlanan 3 farklı yapıda da geometrik iç kalınlığın artması toplam deformasyon miktarını azaltmıştır. Bununda nedeni süneklilik özelliğinin kalın yapılarda az olmasından kaynaklanmaktadır.
- Tasarlanan yapıların hepsinde geometrik iç kalınlık arttıkça von Mises gerilimi azalmıştır. Bu da toplam deformasyonda olduğu gibi yapının süneklilik özelliğini kaybetmesinden kaynaklanmaktadır.
- Tasarlanan numunelerin ekspilisit analizleri incelendiğinde en iyi enerji sönümleme özelliğinin altı yıldız mozaik auxetic yapıda olduğu bulunmuştur.
- Altı yıldız mozaik auxetic yapı en iyi enerji sönümleme özelliği sergilediği için örnek vaka çalışmasında bu yapı kullanılmıştır. Ayrıca altı yıldız mozaik auxetic yapının sonlu elemanlar analizi ile deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan işlemler sonucunda deneysel ile analiz sonuçları arasında %9 farklılık tespit edilmiştir.
- Örnek vaka çalışmasında altı yıldız mozaik auxetic yapı ile tasarlanan ayak pedinin 20 ms'de 25 mm deplasman kullanarak maksimum 4,4 kN değerine ulaştığı bulunmuştur. Tibia için yaralanma üst limit değeri 5,4 kN olarak AEP-55 prosedüründe belirtilmiştir. Tasarımın analiz sonucuna göre ulaştığı kuvvet limit değerinin altında kalmış ve altı yıldız mozaik auxetic yapı ile tasarlanan ayak pedinin enerji sönümleme kabiliyeti başarılı bulunmuştur.

Bu tür kafes yapılar, geometrik yapıları gereği oldukça hafiftirler. Özellikle savunma, havacılık ve uzay sanayinde hafifliğin kritik öneminden kaynaklı olarak tercih sebebi olmaktadır. İleride yapılacak çalışmalarda, özgün olarak tasarlanacak auxetic yapılar farklı uygulama alanlarına entegre edilebilir. Bu yapılar yüksek enerji sönümleme kabiliyeti ve yüksek hafiflik avantajından dolayı geleneksel olarak tasarlanmış sistemlere göre üstünlük gösterebilirler.

KAYNAKLAR

1. Alderson, K.L., Evans, K.E. (2000). Auxetic materials: the positive side of being negative. *Engineering Science & Education Journal*, 9(4), 148–154.
2. Najmon, J.C., Raeisi, S., Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, Elsevier, 7–31.
3. Yuan, B., Zhou, S., Chen, X. (2017). Rapid prototyping technology and its application in bone tissue engineering. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, 18(4), 303–315.
4. İnternet: Eklemeli imalat nedir? URL: https://www.sfmyazilim.com/eklemeli_imalat_nedir.html, Son Erişim Tarihi: 30.12.2023.
5. Bikas, H., Stavropoulos, P., Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1–4), 389–405.
6. İnternet: SLA tekniği, URL: <https://bursa.meb.gov.tr/fatihprojesi/Kodbursa/Sayfa/13-sla-stereolithografi-teknolojisi>, Son Erişim Tarihi: 30.12.2023.
7. Aktitiz, İ., Aydın, K., Topcu, A. (2020). Stereolitografi (SLA) tekniği ile basılan 3 boyutlu polimer yapılarda ikincil kürleme süresinin mekanik özelliklere etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 949–958.
8. Dey, A., Yodo, N. (2019). A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 64.
9. İnternet: FDM teknolojisi, URL: <https://3dbaskial.com/fdm-nedir/>, Son Erişim Tarihi: 30.12.2023.
10. Jee, H., Sachs, E. (2000). A visual simulation technique for 3D printing. *Advances in Engineering Software*, 31(2), 97–106.
11. Razavykia, A., Brusa, E., Delprete, C., Yavari, R. (2020). An overview of additive manufacturing technologies—A review to technical synthesis in numerical study of selective laser melting. *Materials*, 13(17), 3895.
12. Selema, A., Ibrahim, M.N., Sergeant, P. (2022). Metal additive manufacturing for electrical machines: Technology review and latest advancements. *Energies*, 15(3), 1076.
13. Qu, H.P., Wang, H.M. (2007). Microstructure and mechanical properties of laser melting deposited γ -TiAl intermetallic alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 466(1–2), 187–194.

14. İnternet: 3B baskı teknolojisi, URL:https://tr.wikipedia.org/wiki/SLM_3_Boyutlu_Bask%C4%B1_Teknolojisi, Son Erişim Tarihi: 30.12.2023.
15. Faidallah, R.F., Szakál, Z., Oldal, I. (2021). Introduction to 3D printing: techniques, materials and agricultural applications. *Hungarian Agricultural Engineering*, (40), 47–58.
16. Liu, Y., Wang, W., Zhang, L. (2017). Additive manufacturing techniques and their biomedical applications. *Family Medicine and Community Health*, 5(4), 286–298.
17. Murr, L.E., Gaytan, S.M., Ramirez, D.A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K.N., et al. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1–14.
18. Sürmen, H.K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(2), 373–392.
19. Murr, L.E., Gaytan, S.M. (2014). Electron beam melting. *Comprehensive Materials Processing*, 10, 135–161.
20. Bhatia, A., Sehgal, A.K. (2023). Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 81, 1060–1067.
21. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196.
22. Wojtyła, S., Klama, P., Baran, T. (2017). Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(6), D80–D85.
23. Ren, J., Huo, S., Huang, G., Wang, T., Feng, J., Chen, W., et al. (2023). A novel P/Ni-doped g-C₃N₄ nanosheets for improving mechanical, thermal and flame-retardant properties of acrylonitrile–butadienestyrene resin. *Chemical Engineering Journal*, 452, 139196.
24. Kumar, P., Singh, J., Kumari, N., Jurail, S.S., Verma, D., Maurya, A.K. (2022). Study of mechanical and thermal behavior of alkali modified groundnut shell powder reinforced ABS composites. *Polymer Composites*, 43(7), 4569–4587.
25. Ding, C., Yu, S., Tang, X., Liu, Z., Luo, H., Zhang, Y., et al. (2022). The design and preparation of high-performance ABS-based dielectric composites via introducing core-shell polar polymers@BaTiO₃ nanoparticles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 163, 107214.
26. Upadhyay, M., Sivarupan, T., El Mansori, M. (2017). 3D printing for rapid sand casting - A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 211–220.
27. A. Lifton, V., Lifton, G., Simon, S. (2014). Options for additive rapid prototyping methods (3D printing) in MEMS technology. *Rapid Prototyping Journal*, 20(5), 403–412.

28. Duda, T., Raghavan, L.V. (2016). 3D metal printing technology. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29), 103–110.
29. Murr, L.E., Martinez, E., Amato, K.N., Gaytan, S.M., Hernandez, J., Ramirez, D.A., et al. (2012). Fabrication of metal and alloy components by additive Manufacturing: examples of 3D materials science. *Journal of Materials Research and Technology*, 1(1), 42–54.
30. Dedeakayoğulları, H., Kaçal, A. (2020). Eklemeli imalat teknolojileri ve kullanılan talaşlı imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(1), 1–12.
31. Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., et al. (2018). A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications. *Engineering*, 4(5), 729–742.
32. Nadagouda, M.N., Rastogi, V., Ginn, M. (2020). A review on 3D printing techniques for medical applications. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28, 152–157.
33. Singh, S., Ramakrishna, S., Berto, F. (2020). 3D Printing of polymer composites: A short review. *Material Design & Processing Communications*, 2(2).
34. Carrico, J.D., Traeden, N.W., Aureli, M., Leang, K.K. (2015). Fused filament 3D printing of ionic polymer-metal composites (IPMCs). *Smart Materials and Structures*, 24(12), 125021.
35. Guo, H., Lv, R., Bai, S. (2019). Recent advances on 3D printing graphene-based composites. *Nano Materials Science*, 1(2), 101–115.
36. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Third Edition). Switzerland: Springer International Publishing, Cham.
37. Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., et al. (2019). 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(4), 661–687.
38. Tay, Y.W.D., Panda, B., Paul, S.C., Noor Mohamed, N.A., Tan, M.J., Leong, K.F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261–276.
39. Camacho, D.D., Clayton, P., O'Brien, W.J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review. *Automation in Construction*, 89, 110–119.
40. Shakor, P., Nejadi, S., Paul, G., Malek, S. (2019). Review of emerging additive manufacturing technologies in 3D printing of cementitious materials in the construction industry. *Frontiers in Built Environment*, 4.
41. Lim, S., Buswell, R.A., Valentine, P.J., Piker, D., Austin, S.A., De Kestelier, X. (2016). Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components. *Additive Manufacturing*, 12, 216–230.

42. Akgümüş G.D., Kılıçtek, S., Gök, S., Yakut, N. (2023). Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*,.
43. Falahati, M., Ahmadvand, P., Safaee, S., Chang, Y.-C., Lyu, Z., Chen, R., et al. (2020). Smart polymers and nanocomposites for 3D and 4D printing. *Materials Today*, 40, 215–245.
44. Vyavahare, S., Teraiya, S., Kumar, S. (2023). FDM manufactured auxetic structures: An investigation of mechanical properties using machine learning techniques. *International Journal of Solids and Structures*, 265–266, 112126.
45. Zheludev, N.I. (2010). The road ahead for metamaterials. *Science*, 328(5978), 582–583.
46. Seçgin, A., Baygün, T. (2019). İç boşluklu akustik metamalzemelerin homojenizasyonu ve iletim kayıplarının transfer matris metodu ile belirlenmesi. *Deü Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik*, 21(62), 449–459.
47. Veselago, V.G. (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), 509–514.
48. Pendry, J.B., Schurig, D., Smith, D.R. (2006). Controlling electromagnetic fields. *Science*, 312(5781), 1780–1782.
49. Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J., Stewart, W.J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2075–2084.
50. Park, G., Kang, S., Lee, H., Choi, W. (2017). Tunable multifunctional thermal metamaterials: Manipulation of local heat flux via assembly of unit-cell thermal shifters. *Scientific Reports*, 7(1), 41000.
51. Fan, C.Z., Gao, Y., Huang, J.P. (2008). Shaped graded materials with an apparent negative thermal conductivity. *Applied Physics Letters*, 92(25).
52. Guenneau, S., Amra, C., Veynante, D. (2012). Transformation thermodynamics: cloaking and concentrating heat flux. *Optics Express*, 20(7), 8207.
53. Yu, G., Lin, Y., Zhang, G., Yu, Z., Yu, L., Su, J. (2011). Design of square-shaped heat flux cloaks and concentrators using method of coordinate transformation. *Frontiers of Physics*, 6(1), 70–73.
54. Yang, T., Vemuri, K.P., Bandaru, P.R. (2014). Experimental evidence for the bending of heat flux in a thermal metamaterial. *Applied Physics Letters*, 105(8).
55. Canbazoglu, F.M., Vemuri, K.P., Bandaru, P.R. (2015). Estimating interfacial thermal conductivity in metamaterials through heat flux mapping. *Applied Physics Letters*, 106(14).

56. Han, T., Bai, X., Liu, D., Gao, D., Li, B., Thong, J.T.L., et al. (2015). Manipulating steady heat conduction by sensu-shaped thermal metamaterials. *Scientific Reports*, 5(1), 10242.
57. Ergin, T., Stenger, N., Brenner, P., Pendry, J.B., Wegener, M. (2010). Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths. *Science*, 328(5976), 337–339.
58. Ni, X., Wong, Z.J., Mrejen, M., Wang, Y., Zhang, X. (2015). An ultrathin invisibility skin cloak for visible light. *Science*, 349(6254), 1310–1314.
59. Cong, P.H., Long, P.T., Van Nhat, N., Duc, N.D. (2019). Geometrically nonlinear dynamic response of eccentrically stiffened circular cylindrical shells with negative poisson's ratio in auxetic honeycombs core layer. *International Journal of Mechanical Sciences*, 152, 443–453.
60. Kelkar, P.U., Kim, H.S., Cho, K.H., Kwak, J.Y., Kang, C.Y., Song, H.C. (2020). Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review. *Sensors*, 20(11), 3132.
61. Lakes, R. (1987). Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 235(4792), 1038–1040.
62. Saxena, K.K., Das, R., Calius, E.P. (2016). Three decades of auxetics research – materials with negative Poisson's ratio: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 18(11), 1847–1870.
63. Milton, G.W. (1992). Composite materials with's ratios close to — 1. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 40(5), 1105–1137.
64. Grima, J.N., Evans, K.E. (2000). Auxetic behavior from rotating squares. *Journal of Materials Science Letters*, 19(17), 1563–1565.
65. Caddock, B.D., Evans, K.E. (1989). Microporous materials with negative Poisson's ratios. I. Microstructure and mechanical properties. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 22(12), 1877–1882.
66. Evans, K.E., Caddock, B.D. (1989). Microporous materials with negative Poisson's ratios. II. Mechanisms and interpretation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 22(12), 1883–1887.
67. Alderson, K., Evans, K.. (1992). The fabrication of microporous polyethylene having a negative Poisson's ratio. *Polymer*, 33(20), 4435–4438.
68. Clarke, J.F., Duckett, R.A., Hine, P.J., Hutchinson, I.J., Ward, I.M. (1994). Negative Poisson's ratios in angle-ply laminates: theory and experiment. *Composites*, 25(9), 863–868.
69. Michelis, P., Spitas, V. (2010). Numerical and experimental analysis of a triangular auxetic core made of CFR-PEEK using the directionally reinforced integrated single-yarn (DIRIS) architecture. *Composites Science and Technology*, 70(7), 1064–1071.

70. Joseph, A., Mahesh, V., Harursampath, D. (2021). On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review. *Advances in Manufacturing*, 9(3), 342–368.
71. Quan, C., Han, B., Hou, Z., Zhang, Q., Tian, X., Lu, T.J. (2020). 3d printed continuous fiber reinforced composite auxetic honeycomb structures. *Composites Part B: Engineering*, 187, 107858.
72. Spadoni, A. (2011). An isotropic auxetic structural network with limited shear stiffness. in: Vol. 8 Mech. Solids, Struct. Fluids; Vib. Acoust. Wave Propag., ASMEDC, 179–187.
73. Alderson, A., Alderson, K.L., Attard, D., Evans, K.E., Gatt, R., Grima, J.N., et al. (2010). Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading. *Composites Science and Technology*, 70(7), 1042–1048.
74. Han, D., Zhang, Y., Zhang, X.Y., Xie, Y.M., Ren, X. (2023). Lightweight auxetic tubular metamaterials: Design and mechanical characteristics. *Composite Structures*, 311, 116849.
75. Meena, K., Singamneni, S. (2019). A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects. *Materials & Design*, 173, 107779.
76. Pothier, S., Roufail, R., Malton, M. (2022). Unit cell modelling of auxetic structure. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10(04), 360–369.
77. Zhou, Y., Pan, Y., Chen, L., Gao, Q., Sun, B. (2022). Mechanical behaviors of a novel auxetic honeycomb characterized by re-entrant combined-wall hierarchical substructures. *Materials Research Express*, 9(11), 115802.
78. Zhang, X., Tian, R., Zhang, Z., Li, G., Feng, W. (2021). In-plane elasticity of a novel vertical strut combined re-entrant honeycomb structure with negative Poisson's ratio. *Thin-Walled Structures*, 163, 107634.
79. Khan, S.Z., Mustahsan, F., Mahmoud, E.R.I., Masood, S.H. (2021). A novel modified re-entrant honeycomb structure to enhance the auxetic behavior: Analytical and numerical study by FEA. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1041–1045.
80. Erdoğan, İ., Toktas, İ. (2023). Investigation of the effect of geometry inner thickness on new designed auxetic structure. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 901–912.
81. Novak, N., Biasetto, L., Rebesan, P., Zanini, F., Carmignato, S., Krstulović-Opara, L., et al. (2021). Experimental and computational evaluation of tensile properties of additively manufactured hexa- and tetrachiral auxetic cellular structures. *Additive Manufacturing*, 45, 102022.
82. Li, X., Wang, Q., Yang, Z., Lu, Z. (2019). Novel auxetic structures with enhanced mechanical properties. *Extreme Mechanics Letters*, 27, 59–65.

83. Gao, Q., Liao, W.H. (2021). Energy absorption of thin walled tube filled with gradient auxetic structures-theory and simulation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 201, 106475.
84. Li, D., Yin, J., Dong, L., Lakes, R.S. (2018). Strong re-entrant cellular structures with negative Poisson's ratio. *Journal of Materials Science*, 53(5), 3493–3499.
85. Ingrole, A., Hao, A., Liang, R. (2017). Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. *Materials & Design*, 117, 72–83.
86. Jiang, Y., Li, Y. (2018). 3D printed auxetic mechanical metamaterial with chiral cells and re-entrant cores. *Scientific Reports*, 8(1), 2397.
87. Meena, K., Singamneni, S. (2020). Investigation of a novel chiral S-shaped auxetic structure under large tensile deformation. *Physica Status Solidi (B)*, 257 (12).
88. Wang, C., Li, Y., Zhao, W., Zou, S., Zhou, G., Wang, Y. (2018). Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure. *International Journal of Mechanical Sciences*, 138–139, 489–501.
89. Aktaş, C., Acar, E., Güler, M., Altın, M. (2021). Tetra kiral ve içe girintili çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi. *European Journal of Science and Technology*,.
90. Feng, Y., Huang, X., Liu, S., Guo, W., Li, Y., Wu, H. (2019). A self-powered smart safety belt enabled by triboelectric nanogenerators for driving status monitoring. *Nano Energy*, 62, 197–204.
91. Dubois, D., Zellmer, H., Markiewicz, E. (2009). Experimental and numerical analysis of seat belt bunching phenomenon. *International Journal of Impact Engineering*, 36(6), 763–774.
92. Chen, J., Wen, X., Shao, Y., Li, T., Du, Z. (2020). Highly stretchable, stability, flexible yarn-fabric-based multi-scale negative Poisson's ratio composites. *Composite Structures*, 250, 112579.
93. Sayed, U., Samarth, A. (2019). Auxetic polymers in textiles - Review. *International Journal of Advanced Science and Engineering*, 5(3), 1056–1063.
94. Alderson, K., Alderson, A., Anand, S., Simkins, V., Nazare, S., Ravirala, N. (2012). Auxetic warp knit textile structures. *Physica Status Solidi (B)*, 249(7), 1322–1329.
95. Chen, Y.-L., Wang, D.-W., Ma, L. (2021). Vibration and damping performance of carbon fiber-reinforced polymer 3D double-arrow-head auxetic metamaterials. *Journal of Materials Science*, 56(2), 1443–1460.
96. Wang, Z., Luan, C., Liao, G., Liu, J., Yao, X., Fu, J. (2020). Progress in auxetic mechanical metamaterials: structures, characteristics, manufacturing methods, and applications. *Advanced Engineering Materials*, 2 (10).

97. Zhang, X.W., Yang, D.Q. (2016). Numerical and experimental studies of a light-weight auxetic cellular vibration isolation base. *Shock and Vibration*, 2016 1–16.
98. Scarpa, F. (2010). Damping in auxetic materials and structures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(3_Supplement), 1888–1888.
99. Fortier, A., Gullapalli, V., Mirshams, R.A. (2014). Review of biomechanical studies of arteries and their effect on stent performance. *IJC Heart & Vessels*, 4, 12–18.
100. Sharzehee, M., Khalafvand, S.S., Han, H.C. (2018). Fluid-structure interaction modeling of aneurysmal arteries under steady-state and pulsatile blood flow: a stability analysis. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 21(3), 219–231.
101. Jopek, H. (2017). Finite element analysis of tunable composite tubes reinforced with auxetic structures. *Materials*, 10(12), 1359.
102. Mir, M., Ansari, U., Ali, M.N., Iftikhar, M.H.U., Qayyum, F. (2017). Electromechanically actuated multifunctional wireless auxetic device for wound management. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, 5 1–10.
103. Wang, Z., Hu, H. (2015). A finite element analysis of an auxetic warp-knitted spacer fabric structure. *Textile Research Journal*, 85(4), 404–415.
104. Heo, H., Ju, J., Kim, D.M. (2013). Compliant cellular structures: Application to a passive morphing airfoil. *Composite Structures*, 106, 560–569.
105. Heo, H., Ju, J., Kim, D.-M., Jeon, C.S. (2011). Passive morphing airfoil with honeycombs. in: Vol. 1 Adv. Aerosp. Technol. Energy Water Nexus; Glob. Eng. Posters, ASMEDC, 263–271.
106. Mousanezhad, D., Haghpanah, B., Ghosh, R., Hamouda, A.M., Nayeb-Hashemi, H., Vaziri, A. (2016). Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 6(2), 81–96.
107. Bettini, P., Airolidi, A., Sala, G., Landro, L. Di, Ruzzene, M., Spadoni, A. (2010). Composite chiral structures for morphing airfoils: Numerical analyses and development of a manufacturing process. *Composites Part B: Engineering*, 41(2), 133–147.
108. Balan P, M., Mertens A, J., Bahubalendruni, M.V.A.R. (2023). Auxetic mechanical metamaterials and their futuristic developments: A state-of-art review. *Materials Today Communications*, 34, 105285.
109. Bonner, J. (1999). *Islamic geometric patterns*. New York, USA.
110. Jacobs, M.J.N., Van Dingenen, J.L.J. (2001). Ballistic protection mechanisms in personal armour. *Journal of Materials Science*, 36(13), 3137–3142.

111. Imbalzano, G., Tran, P., Ngo, T.D., Lee, P.V. (2017). Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 19(3), 291–316.
112. Radonić, V., Giunio, L., Biočić, M., Tripković, A., Lukšić, B., Primorac, D. (2004). Injuries from antitank mines in southern Croatia. *Military Medicine*, 169(4), 320–324.
113. İnternet: The first modern anti-tank mines, URL: https://tanks-encyclopedia.com/ww1/gb/tank_MkI.php, Son Erişim Tarihi: 30.12.2023.
114. Özdemir, E. (2020). *Zırhlı askeri araçlarda mayın patlaması sonucunda oluşacak bacak kuvvetlerinin ölçülmesi için yerli insan maketi geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
115. Aksoy, İ. (2022). *Design and structural analysis of unique lattice structure with negative Poisson's ratio*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
116. Zhang, J., Lu, G., Wang, Z., Ruan, D., Alomarah, A., Durandet, Y. (2018). Large deformation of an auxetic structure in tension: Experiments and finite element analysis. *Composite Structures*, 184, 92–101.
117. Yao, Y., Wang, L., Li, J., Tian, S., Zhang, M., Fan, Y. (2020). A novel auxetic structure based bone screw design: Tensile mechanical characterization and pullout fixation strength evaluation. *Materials & Design*, 188, 108424.
118. Safikhani Nasim, M., Yaghootian, A., Mosalmani, R. (2023). Energy absorption of the additively manufactured novel re-entrant auxetic structure in comparison with honeycomb structure: experimental and numerical analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(5), 275.
119. İnternet: AlSi10Mg alüminyum alaşımının mekanik özellikleri, URL: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=9c8a7903a137449b88e11ed9743edd10&ckck=1>, Son Erişim Tarihi: 02.01.2024
120. Spear, D.G., Palazotto, A.N., Kemnitz, R.A. (2021). Modeling and simulation techniques used in high strain rate projectile impact. *Mathematics*, 9 (3), 274.
121. Canbazoglu, F.M., Vemuri, K.P., Bandaru, P.R. (2015). Estimating interfacial thermal conductivity in metamaterials through heat flux mapping. *Applied Physics Letters*, 106 (14),.
122. Logakannan, K.P., Ramachandran, V., Rengaswamy, J., Gao, Z., Ruan, D. (2020). Quasi-static and dynamic compression behaviors of a novel auxetic structure. *Composite Structures*, 254 112853.
123. Guo, M.F., Yang, H., Ma, L. (2020). Design and analysis of 2D double-U auxetic honeycombs. *Thin-Walled Structures*, 155 106915.
124. North Atlantic Treaty Organization. (2007). Test Methodology for Protection of Vehicle Occupants Against Anti-Vehicular Landmine Effects.; RTO-TR-HFM- 090.

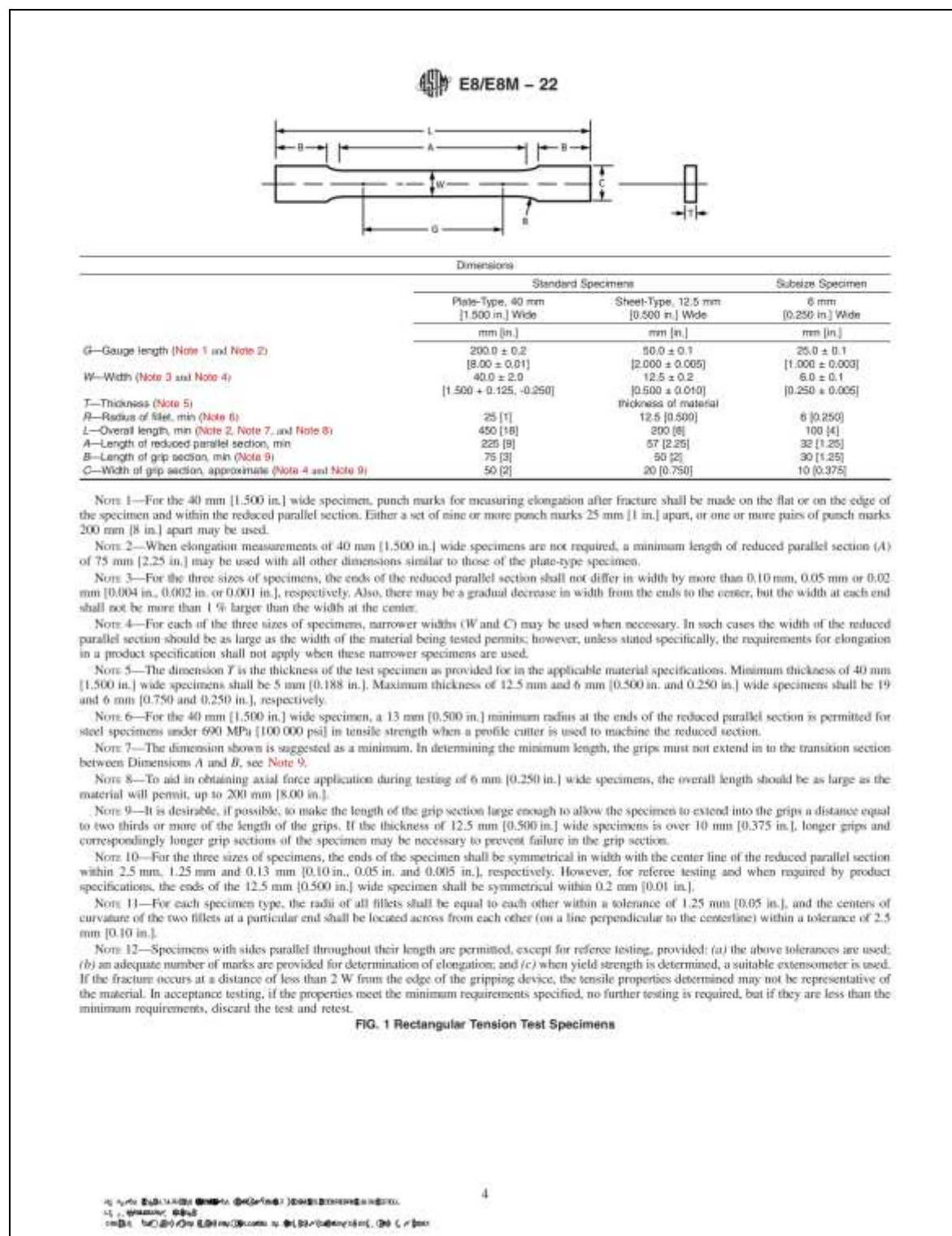
125. North Atlantic Treaty Organization. (2010). Procedures for Evaluating the Protection Level of Armoured Vehicles: AEP-55 Volume 2 Edition 2.
126. İnternet: TNT patlamalarında oluşan enerji miktarı, URL: https://tr.wikipedia.org/wiki/TNT_e%C5%9Fde%C4%9Feri#cite_note-2, Son Erişim Tarihi: 27.01.2024
127. Cong, M., Zhou, Y., Zhang, M., Sun, X., Chen, C., Ji, C. (2021). Design and optimization of multi-V hulls of light armoured vehicles under blast loads. *Thin-Walled Structures*, 168, 108311.





EKLER

EK-1. ASTM E8 Standard



EK-2. ASTM C364 Standard

ASTM C364/C364M - 16



FIG. 1 Edge-wise Compression Test Setup

indicate the force with an accuracy over the force range(s) of interest of within $\pm 1\%$ of the indicated value.

7.3.4 *Strain Gage*—Capable of measuring strain to at least 0.0001 mm/mm (0.0001 in./in.) and having a gage length not greater than two thirds of the unsupported length of the specimens to be tested, nor less than three unit cells if the facesheet is a composite fabric material form.

7.4 *Conditioning Chamber*—When conditioning materials at non-laboratory environments, a temperature/vapor-level controlled environmental conditioning chamber is required that shall be capable of maintaining the required temperature to within $\pm 3^{\circ}\text{C}$ [$\pm 5^{\circ}\text{F}$] and the required relative humidity level to within $\pm 3\%$. Chamber conditions shall be monitored either on an automated continuous basis or on a manual basis at regular intervals.

7.5 *Environmental Test Chamber*—An environmental test chamber is required for test environments other than ambient testing laboratory conditions. This chamber shall be capable of maintaining the entire test specimen at the required test environment during the mechanical test.

8. Sampling and Test Specimens

8.1 *Sampling*—Test at least five specimens per test condition unless valid results can be gained through the use of fewer specimens, as in the case of a designed experiment. For statistically significant data, consult the procedures outlined in Practice E122. Report the method of sampling.

8.2 *Geometry*—The test specimens shall be as shown in Fig. 2 (inch-pound units) and Fig. 3 [SI units].

8.3 *Specimen Preparation and Machining*—Guide D5687/D5687M provides recommended specimen preparation practices and should be followed where practical. Of particular note in this end-loaded compression test is the machining quality and dimensional accuracy of the loaded ends, and the overall flatness and parallelism of the sandwich panel, as denoted in Fig. 2 and Fig. 3.

8.3.1 *Labeling*—Label the test specimens so that they will be distinct from each other and traceable back to the panel of origin, and will neither influence the test nor be affected by it.

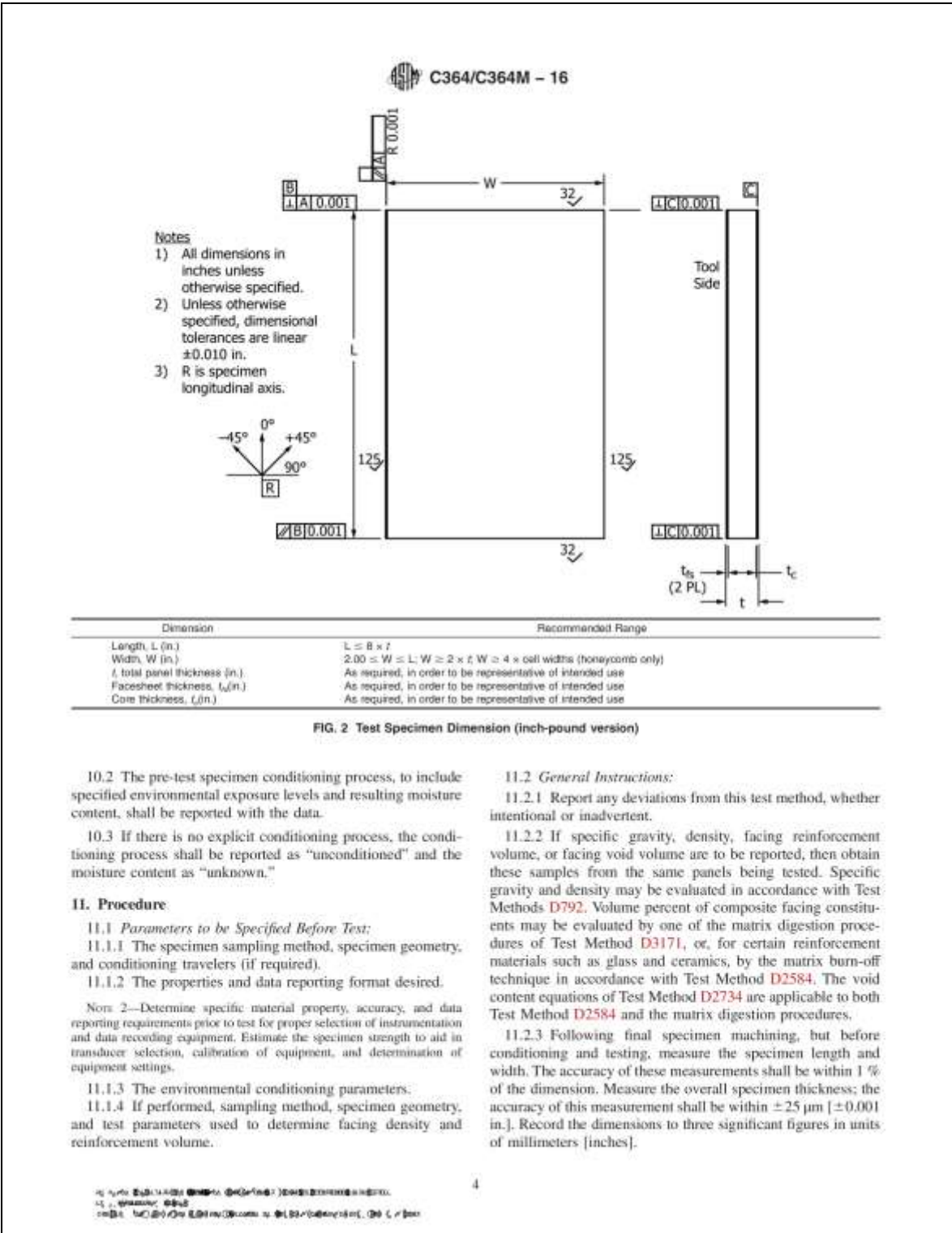
9. Calibration

9.1 The accuracy of all measuring equipment shall have certified calibrations that are current at the time of use of the equipment.

10. Conditioning

10.1 The recommended pre-test specimen condition is effective moisture equilibrium at a specific relative humidity as established by Test Method D5229/D5229M; however, if the test requester does not specify a pre-test conditioning environment, conditioning is not required and the test specimens may be tested as prepared.

Note 1—The term *moisture*, as used in Test Method D5229/D5229M, includes not only the vapor of a liquid and its condensate, but the liquid itself in large quantities, as for immersion.





Gazili olmak ayrıcalıktır