

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN MİKRO KAFES
YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Makina Yük. Müh. Recep GÜMRÜK

ARALIK 2012

TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN MİKRO KAFES
YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Makina Yük. Müh. Recep GÜMRÜK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01.10.2012
Tezin Savunma Tarihi : 07.12.2012

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sami KARADENİZ

Trabzon 2012

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalında

Recep GÜMRÜK Tarafından Hazırlanan

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN MİKRO KAFES
YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

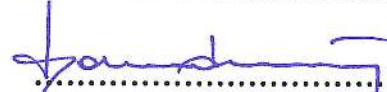
**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 23 / 10 / 2012 gün ve 1479 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL



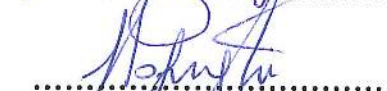
Üye : Prof. Dr. Sami KARADENİZ



Üye : Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ



Üye : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU



Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Hücresel malzemeler mekaniği üzerine yaptığı pek çok araştırma ile ünlenen M. F. Ashby, hücresel malzemelerin kullanımının önemini belirtmek için şöyle söylemiştir: “Modern insan büyük yük taşıyan yapıları inşa edeceği zaman çelik, beton ve cam gibi ağır ve yoğun malzemeleri kullanmasına karşın, doğa aynısını inşa ederken odun, kemik ve mercan gibi hücresel malzemeleri kullanıyor. Bunun için çok geçerli sebepler olmalı...” Bu fikri destekler şekilde günden güne yapısal uygulamalarda hücresel malzemelerin kullanımı çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Hücresel malzemeler mükemmel mekanik, termal ve akustik özellikleri sebebiyle paketlemeden enerji sönümlemeye kadar çok geniş kullanım alanına sahip olmaktadır. Artan kullanım alanına ve ihtiyaca bağlı olarak, daha fonksiyonel özelliklere sahip hücresel malzemelerin üretilme gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı pek çok araştırmacı tarafından hücresel malzemelerin üretimine yönelik alternatif teknolojiler geliştirmek için çok ciddi çabalar sarf edilmektedir.

Bu tez çalışması da optimum hücresel malzeme üretme çabalarının bir sonucu olan seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen mikro kafes malzemelerin mekanik davranışlarının incelenmesine ve modellenmesine odaklanmaktadır. Yapılan çalışmalar, seçici lazer ergitme yönteminin arzu edilen özelliklerde hücresel malzeme üretmek için iyi bir alternatif yöntem olacağını göstermektedir.

Bu tez çalışmasının, seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen mikro kafes yapıların mekanik davranışlarının anlaşılması ve modellenmesi ile ilgili oluşmakta olan literatüre elde edilen bulgular ile önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Çalışmam süresince desteğini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Sami KARADENİZ’e ve manevi desteğinden dolayı aileme teşekkürü bir borç bilirim. Böyle bir çalışmada, Liverpool Üniversitesi’nin imkânlarını açmasından dolayı Dr. Bob MINES ve Dr. Christ SUTCLIFFE ile deneylerin gerçekleştirilmesinde yardımlarından dolayı Liverpool üniversitesi teknisyenlerinden Steve PENNIGTON’a teşekkür ederim. Ayrıca, doktora eğitimin boyunca verdiği maddi destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) şükranlarımı sunarım.

Recep GÜMRÜK

Trabzon 2012

TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Üretilen Mikro Kafes Yapıların Mekanik Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Sami KARADENİZ’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

07 / 12 / 2012.

Recep GÜMRÜK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ	XVIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Metal Hücresel Malzemelerin Üretimi ve Sınıflandırılması	3
1.3. Periyodik Kafes Yapıların Geometrik Sınıflandırılması	7
1.4. Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ve Mikro Kafes Üretimi	9
1.5. Hücresel Malzemelerin Genel Mekanik Davranışları	12
1.6. Hopkinson Çubuk Testi ve Teorisi	14
1.7. Literatür Araştırması.....	18
1.7.1. Hücresel Malzemelerin Statik ve Dinamik Deneysel Davranışları	18
1.7.2. Modelleme Çalışmaları.....	21
1.7.3. Hücresel Malzemelerin Mekanik Davranışlarına Düzensizlik ve Yapısal Kusurların Etkisi	26
1.7.4. Numune Boyutu ve Sınır Tabaka Etkileri	29
1.7.5. Şekil Değiştirme Hızının Etkisi	31
1.7.6. Lazer Ergitme Yöntemiyle Üretilen Mikro Kafes Yapılar Üzerine Yapılan Çalışmalar	32
1.8. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	33
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	35
2.1. Deneysel Çalışmalar	35
2.1.1. Numune Üretimi	35
2.1.2. Kafes Blokların Statik Mekanik Davranışlarının İncelenmesi	37
2.1.2.1. Serbest Yüzeyli Blokların Deneysel Testleri.....	37

2.1.2.2.	Sınırlandırılmış Blokların Deneysel Testleri	38
2.1.3.	Kafes Blokların Dinamik Mekanik Davranışlarının İncelenmesi	40
2.1.4.	Lazer Ergitme Yöntemiyle Üretilen Mikro Tellerin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Davranışlarının Belirlenmesi	41
2.1.4.1.	Statik Çekme Davranışının İncelenmesi	42
2.1.4.2.	Birim Şekil Değiştirme Hızına Bağlılığının İncelenmesi	42
2.2.	Teorik Çalışmalar	47
2.2.1.	BCC Kafes Yapısının Deneysel Çökme Davranışının Fiziksel Analizi	48
2.2.2.	İzafi Yoğunluğun Belirlenmesi	52
2.2.3.	Mikro Kafes Yapıların Başlangıç Elastisite Modülünün Hesabı	55
2.2.4.	Mikro Kafes Yapıların Başlangıç Çökme Gerilmesinin Hesabı	64
2.3.	“ β ” Katsayısının Hesabı	66
2.4.	Sayısal Çalışmalar	67
2.4.1.	Bir Boyutlu Elemanlarla Bloğun Statik Modellenmesi	68
2.4.2.	Üç Boyutlu Elemanlarla Mikro Telin Modellemesi	72
2.4.3.	Bir Boyutlu Elemanlarla Dinamik Modelleme	73
2.4.4.	Yapısal Kusurların Modellenmesi	74
3.	BULGULAR VE İRDELEME	76
3.1.	Serbest Yüzeyli Numunelerin Basma Testi Sonuçları	76
3.2.	Farklı Kafes Konfigürasyonlarının Davranışlarının Karşılaştırılması	87
3.3.	Sınırlandırılmış Blokların Basma ve Kesme Davranışlarının İncelenmesi	88
3.4.	Kesme Yüğü Açısının BCC Yapıların Davranışına Etkisi	96
3.5.	BBCZ Yapılarda Dikey Mikro Tellerin Mekanik Davranışa Katkısının İncelenmesi	98
3.6.	Lazer Ergitme Yöntemiyle Üretilen Mikro Tellerin Statik ve Dinamik Çekme Test Sonuçları	100
3.6.1.	Mikro Tellerin Statik Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Eğrileri	100
3.6.2.	Mikro Tellerin Dinamik Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Eğrileri	105
3.7.	Sonlu Elemanlar Modellerinin Geçerliliğinin Araştırılması	109
3.7.1.	Serbest Yüzeyli Basma Testleri	109
3.7.2.	Sınırlandırılmış Numune Testleri	115
3.8.	BCC Kafes Yapılarda Bileşik Mukavemet Davranışının İncelenmesi ve Çökme Yüzeyleri	118

3.9.	Bileşik Yükleme Durumunda Yatay Reaksiyon Kuvvetinin Öneminin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi	121
3.10.	Kafes Yapılar İçin Sayısal, Teorik ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	123
3.10.1.	BCC Kafes Yapılar	123
3.10.2.	BCCZ Kafes Yapılar	126
3.11.	Mikro Kafes Yapıların Dinamik Basma Test Sonuçları	130
3.12.	Sayısal Parametrik Çalışmalar	132
3.12.1.	Yapısal Kusurlu Modellerin Basma ve Kesme Davranışları	133
3.12.2.	Sınır Tabaka Etkileri	136
3.12.3.	Kafes Yapıların Yüksek Hızlı Darbe Davranışı	137
3.13.	Mikro Kafes Yapıların Mevcut Hücresel Malzemelerle Karşılaştırılması ve Geleceği	149
4.	SONUÇLAR	151
5.	ÖNERİLER	154
6.	KAYNAKLAR	155
7.	EKLER	167
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN MİKRO KAFES YAPILARIN
MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Recep GÜMRÜK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Sami KARADENİZ
2012, 166 Sayfa, 3 Ek Sayfa

Bu tez çalışmasında, lazer ergitme yöntemi ile üretilen 316L paslanmaz çelik mikro kafes malzemelerin deneysel, teorik ve sayısal olarak mekanik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar statik ve dinamik test çalışmalarından oluşmaktadır. Bu testler vasıtasıyla mikro tellerin ve kafes blokların statik ve dinamik yükler altındaki mekanik özellikleri ve çökme davranışları araştırılmıştır. Mikro kafes yapıların mekanik davranışlarını belirleyen en önemli parametrelerin, izafi yoğunluk ve hücre topolojisi olduğu deneysel sonuçlardan ortaya çıkmıştır. Ayrıca hem mikro teller hem de kafes blokların şekil değiştirme hızına bağımlılığı dinamik testler vasıtasıyla belirlenmiştir. Teorik çalışmalarda, mikro kafes topolojileri için başlangıç elastisite modülü ve başlangıç çökme gerilmesini tahmin eden ampirik ifadeler klasik mekanik formüller kullanılarak elde edilmiştir. Teorik ve sayısal modellerde mikro tellerin kesişim bölgesi etkilerinin dikkate alınmasının daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi adına oldukça önemli olduğu görülmüştür. Sayısal çalışmalarda ise sonlu elemanlar yöntemi vasıtasıyla deneysel sonuçlarla uyumlu sayısal modeller geliştirilmiştir. Ayrıca, geçerliliği sağlanan modellerle, mikro kafes yapılarda dalga yayılımının incelenmesine, sınır tabaka etkilerinin ve yapısal kusurların kafes yapıların mekanik davranışına etkilerinin belirlenmesine yönelik bir dizi parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Darbe hızı arttıkça mikro kafes yapılarda dalga yayılımının mekanik davranışı belirlediği ve buna bağlı olarak mikro atalet etkilerinin etkin olmaya başladığı gerçekleştirilen sayısal çalışmalarla belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Mikro kafes yapılar, Seçici lazer ergitme yöntemi, Hücresel malzemeler, Sonlu elemanlar yöntemi, Mekanik özellikler*

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOURS OF MICRO LATTICE STRUCTURES MANUFACTURED VIA SELECTIVE LASER MELTING METHOD

Recep GÜMRÜK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Sami KARADENİZ
2012, 166 Pages, 3 Appendix Pages

In this study, the mechanical behaviours of 316L stainless steel micro lattice materials manufactured via selective laser melting method are aimed to investigate as experimental, numerical and theoretical. The experimental studies compose static and dynamic tests. By means of these tests, the mechanical responses and collapse behaviours of individual micro struts and lattice blocks under static and dynamic loads are investigated. It is disclosed from the experimental results that relative density and cell topology are the most significant parameter over mechanical behaviours. Also, it is found that the strain rate dependency for both individual micro struts and lattice blocks exists. In the theoretical studies, the empirical statements predicting the initial elasticity modulus and collapse stresses for micro lattice topologies are obtained using classic mechanic formulas. It is found that to take into account the geometrical effects around the micro strut junctions in the theoretical and numerical modelling gives more compatible results with experiments. In the numerical studies, the numerical models using finite element method are developed to be compatible with experimental data. Also, a series of parametric studies are fulfilled to examine the wave propagation in micro lattice structures and to determine the influence of structural disorders and boundary layers to mechanical behaviours thanks to the verified numerical model. It is determined by means of numerical studies that the wave propagation governs the mechanical behaviour of lattice structures and, in parallel to this, the micro inertia effects start to be dominant, as the impact velocity increases.

Key Words: *Micro lattice Structures, Selective Laser Melting Method, Cellular Materials, Finite element method, Mechanical Properties*

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Hücrel malzemelere örnekler; a) insan kemiğinin hücrel yapısı, b) kapalı hücreli alüminyum köpük, Alporas (Miyoshi vd., 2000), c) açık hücreli alüminyum köpük, Duocel (Andrews vd., 1999).....	3
Şekil 1.2.	Metalik hücrel malzemelerin üretim yöntemlerinin bir sınıflandırılması ve elde edilen ürünlerin ticari adları (Wadley, 2002).	5
Şekil 1.3.	Hücrel malzemelerin geometrik karakteristiklerine göre Sınıflandırılması (Wadley, 2002).....	7
Şekil 1.4	Geometrik hücrel yapılara örnekler; a) Stokastik, b) Periyodik.....	7
Şekil 1.5.	Düzenli ve yarı düzenli kafes yapılara örnekler; a) Kare, b) Üçgen, c) Pal petek (Düzenli yapılar), d) Kagome, e) Üçgen-kare yapılar (Yarı düzenli yapılar) (Elsayed, 2010).....	8
Şekil 1.6.	Üç boyutlu temel çok yüzlü hücreler (Deshpande vd., 2001a); a) Tetrahedron (dört yüzlü), b) Üçgen prizma, c) Dikdörtgen prizma, d) Altıgen prizma, e) Sekizyüzlü, f) Rombik dodekahedron, g) Beşyüzlü dodekahedron, h) Tetrakaidekahedron, i) İcosahedro.....	9
Şekil 1.7.	Seçici lazer ergitme yönteminin şematik gösterimi (Tsopanos vd., 2010)	11
Şekil 1.8.	Seçici lazer yöntemi ile üretilebilen kafes yapılar için temel kübik hücre tiplerinin tanımları (Rehme ve Emmelmann, 2006)	12
Şekil 1.9.	Hücrel malzemelerin tipik basma davranışlarının şematik gösterimi; a) Eğilme baskın, b) Çeki-bası baskın	13
Şekil 1.10.	Hopkinson çubuk testinin çalışma prensibi	16
Şekil 2.1.	SLM250 Seçici Lazer Ergitme Cihazına ait bir fotoğraf	36
Şekil 2.2.	Mikro metal tozların büyüklüklerine göre yüzde dağılımları	36
Şekil 2.3.	Lazer ergitme yöntemi ile üretilen mikro kafes blokların bir seti	37
Şekil 2.4.	Uygulanan testlere örnekler; a) Serbest yüzeyli numune, b) Sınırlandırılmış yüzeyli numuneler	38
Şekil 2.5.	Sınırlandırılmış numunenin şematik gösterimi	39

Şekil 2.6.	Arcan test aparatları; a) Şematik gösterim ve etkiyen kuvvetler, b) Test cihazının görünümü	40
Şekil 2.7.	Düşme testi cihazı ve aparatları	41
Şekil 2.8.	Mikro tellerin çekme davranışının belirlenmesi için hazırlanan numune ve test cihazının resimleri	43
Şekil 2.9.	Yüksek hızlı çekme test cihazı; a) Hopkinson çekme deney düzeneğinin şematik gösterimi, b) Deney düzeneği	44
Şekil 2.10.	Hopkinson çubuk testi numuneleri; a) Üretilen numunelerin resmi, b) Numunelerin ölçüleri (mm)	45
Şekil 2.11.	Hopkinson çekme testinde giren, yansıyan ve iletilen birim şekil değiştirme sinyallerini gösteren bir test sonucu	46
Şekil 2.12.	Örnek test için gerilme, birim şekil değiştirme ve birim şekil değiştirme hızının zamana göre değişimi	46
Şekil 2.13.	Mikro yapıların geometrik tanımları; a) BCC birim hücre, b) BCCZ birim hücre ve c) mikro kafes bloğun tanımları (n, kenar boyunca hücre sayısıdır)	47-48
Şekil 2.14.	Mikro yapıların detaylı fotoğrafları; a) Tam şekilde sıkıştırılmış mikro kafes yapı, b) Bireysel mikro tel	49
Şekil 2.15.	BCC yapıda rijit düğüm noktaları ve mikro tellerin temsili gösterimi (Mines, 2008)	50
Şekil 2.16.	Geometrik tanımlar ve sınır şartları, a) Üç boyutlu birim hücre ve kesit görünüşü, b) İdeal bir mikro telin yükleme, sınır koşulları ve geometrik ölçüleri	50-51
Şekil 2.17.	BCC kafes yapısı için izafi yoğunluk tahminlerin karşılaştırılması	54
Şekil 2.18.	Bir mikro telin yükleme ve sınır şartlarını gösteren basitleştirilmiş modeli	56
Şekil 2.19.	Telin ucuna etkiyen kuvvet bileşenleri	57
Şekil 2.20.	BCCZ birim hücrenin şematik gösterimleri; a) Deformasyon mekanizması, b) Dikey yönde yük dengesi	61
Şekil 2.21.	Bir boyutlu elemanlarla modelleme; a) Düğüm noktası elementlerin modellemesi, b) simetri düzlemleri	69
Şekil 2.22.	Kuasi statik testler için yükleme eğrisi	71
Şekil 2.23.	Sayısal modellerde kullanılan kusur modlarının şematik gösterimleri	72
Şekil 2.24.	3D sonlu elemanlar modellerine ait yükleme, sınır şartları ve mesh yapısı	73

Şekil 2.25.	Dinamik sonlu elemanlar modeli ve birim hücre şekil değiştirme ifadesinin hesaplanma metodunun gösterimi.....	74
Şekil 2.26.	Yapısal, a) Kusursuz, b) Kusurlu yapıların geometrik karşılaştırması	75
Şekil 3.1.	BCC yapıların basma testlerinden elde edilen, hücre boyutları a) 2.5, b) 2, c) 1.6, d) 1.379, d) 1.25 mm olan mikro kafes bloklara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini gösteren grafikler	78
Şekil 3.2.	Farklı hücre boyutuna sahip BCC kafes blokların belirli birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri.....	79
Şekil 3.3.	BCCZ yapıların basma testlerinden elde edilen, hücre boyutları a) 2.5, b) 2, c) 1.5, d) 1.25 mm olan mikro kafes bloklara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini gösteren grafikler	81
Şekil 3.4.	Farklı hücre boyutlu BCCZ kafes yapıların basma deformasyonunun gelişim aşamalarını gösteren resimler (1-2.5 mm, 2-2 mm, 3-1.5 mm, 4-1.379 mm, 5-1.25 mm)	82
Şekil 3.5.	f_2 BCCZ yapıların basma testlerinden elde edilen, hücre boyutları a) 2.5, b) 2, c) 1.5, d) 1.25 mm olan mikro kafes bloklara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini gösteren grafikler	84
Şekil 3.6.	Farklı hücre boyutlu f_2 BCC kafes yapıların basma deformasyonunun gelişim aşamalarını gösteren resimler (1-2.5 mm, 2-2 mm, 3-1.5 mm).....	85
Şekil 3.7.	Yoğunlaşma birim şekil değiştirmelerin hesaplanma şeklini gösteren BCC kafes yapısına ait örnek grafikler; a) 2.5 mm b) 1.25 mm hücre boyutu için	86
Şekil 3.8.	BCC, BCCZ ve f_2 BCC mikro kafes yapıların a) Özgül başlangıç elastisite modülü, b) Özgül başlangıç çökme gerilmesi, c) Yoğunlaşma birim şekil değiştirmeler gibi mekanik özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı olarak karşılaştırılması	88
Şekil 3.9.	Sınırlandırılmış BCC kafes bloklara ait deformasyonun gelişimini içeren basma testleri sonuçları (L=2.5 mm)	90
Şekil 3.10.	BCC mikro kafes yapısına ait sınırlandırılmış ve serbest yüzeyli basma testlerinin 1.25 mm hücre boyutu açısından karşılaştırılması	91
Şekil 3.11.	Sınırlandırılmış BCCZ kafes bloklara ait deformasyonun gelişimini içeren basma testleri sonuçları (L=2.5 mm)	92
Şekil 3.12.	Kesme testi sonuçları; a) Hücre boyutu 2.5 mm ($\rho^*/\rho_s=0.0359$), b) Hücre boyutu 1.25 mm ($\rho^*/\rho_s=0.133$)	94
Şekil 3.13.	Kesme testlerinden elde edilen deformasyon mekanizmalarından bazıları.....	94

Şekil 3.14.	Çekme test sonuçlarının karşılaştırılması ve deformasyon mekanizmasının gelişimi	96
Şekil 3.15.	Faklı yükleme açılarında gerçekleştirilen kesme testlerinin sonuçları; a) Kesme gerilmesi, b) Sönümlenen şekil değiştirme enerjisi değerlerinin açısal birim şekil değiştirmeye göre değişimleri (L=2.5 mm).....	97
Şekil 3.16.	Dikey mikro telleri farklı lazer gücüyle üretilen BCCZ kafes yapılarının basma davranışlarının karşılaştırılması (L=2.5 mm).....	99
Şekil 3.17.	Dikey mikro telleri farklı lazer gücü ile üretilen BCCZ kafes yapıların özgül elastisite, özgül başlangıç çökme gerilmesi ve özgül şekil değiştirme enerji değerlerinin karşılaştırılması	100
Şekil 3.18.	Farklı lazer parametreleriyle üretilen mikro tellerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) 90 W lazer gücü ve 1000 µs lazer nüfus süresi, b) 140 W lazer gücü ve 500 µs lazer nüfus süresi.....	102
Şekil 3.19.	Gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ve elastik lineer plastik davranış yaklaşımı	103
Şekil 3.20.	Farklı lazer gücü ile üretilen mikro tellerin çekme test sonuçlarının karşılaştırılması; a) Çekme kuvveti-uzama eğrileri, b) Gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	104
Şekil 3.21.	Düşük birim şekil değiştirme hızlarında mikro tellerin gerilme-birim şekil değiştirme davranışı	105
Şekil 3.22.	Hopkinson testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin hidrolik test cihazında gerçekleştirilen test sonuçlarıyla karşılaştırılması	106
Şekil 3.23.	Cowper-Symonds katsayılarının deneysel verilerden elde edilebilmesi için deneysel verilere doğrusal eğri uydurulması; a) Akma gerilmelerine, b) Maksimum çekme gerilmelerine	107
Şekil 3.24.	Elde edilen Cowper-Symonds sabitleriyle elde edilen akma gerilmesinin birim şekil değiştirme hızına göre değişimini gösteren eğrilerin deneysel verilerle karşılaştırılması	108
Şekil 3.25.	Sonlu elemanlar modelleriyle deneysel testlerden elde edilen sonuçların BCC mikro kafes yapılar için karşılaştırılması; a) L=2.5 mm, b) L=1.25 mm	110
Şekil 3.26.	% 30 oranında sıkıştırılmış 1.25 mm hücre boyutlu mikro kafes yapının detaylı görünüşü.....	111
Şekil 3.27.	Sonlu elemanlar modelinde elde edilen deformasyon modlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (L=2.5 mm)	111

Şekil 3.28.	Sonlu elemanlar modelinde elde edilen deformasyon modlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması ($L=1.25$ mm).....	112
Şekil 3.29.	Sonlu elemanlar modelleriyle deneysel sonuçların BCCZ mikro kafes yapı için karşılaştırılması ($L=2.5$ mm).....	113
Şekil 3.30.	2.5 mm hücre boyutuna sahip BCCZ mikro kafeslerin sonlu elemanlar modelleriyle elde edilen deformasyon modlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (1-Deneysel; 2-Model 1; 3-Model 2).....	114
Şekil 3.31.	Hücre boyutu 1.25 mm olan BCCZ mikro kafes bloğun sonlu elemanlar ve deneysel gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.....	115
Şekil 3.32.	f_2 BCC mikro kafesi için sonlu elemanlar ve deneysel gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.....	115
Şekil 3.33.	BCC mikro kafes yapı için sonlu elemanlar ve deneysel sonuçların sınırlandırılmış numune testleri için birim şekil değiştirmelere bağlı olarak karşılaştırılması; a) Basma yüklemesi, b) Kesme yüklemesi.....	117
Şekil 3.34.	Basma ve kesme yüklemesi için deneysel ve sonlu elemanlar modellerine ait deformasyon modlarının karşılaştırılması.....	118
Şekil 3.35.	BCC mikro kafes yapıların çökme yüzeyleri ($L=2.5$ mm).....	119
Şekil 3.36.	Bileşik yükleme durumlarında elde edilen sayısal ve deneysel çökme mekanizmalarının karşılaştırılması.....	120
Şekil 3.37.	BCC mikro kafes yapıların çökme yüzeyleri ($L=1.25$ mm).....	121
Şekil 3.38.	Arcan testi esnasında oluşan yatay reaksiyon kuvvetinin etkisini göstere eğriler (kuvvet açısı $\phi =45^\circ$).....	122
Şekil 3.39.	BCC mikro kafes yapılar için deneysel, teorik ve sayısal başlangıç elastisite modülü değerlerinin d/L oranına göre değişimi.....	123
Şekil 3.40.	BCC mikro kafes yapılar için teorik ifadelerde dikkate alınan kesme teriminin etkisini gösteren eğriler.....	124
Şekil 3.41.	Farklı hücre boyutuna sahip BCC kafes yapıların deneysel basma sonuçlarının karşılaştırılması ve birim çökme şekil değiştirme değerinin belirlenmesi (ϵ_a).....	126
Şekil 3.42.	BCC mikro kafes yapısı için deneysel, teorik ve sayısal başlangıç çökme gerilmelerinin d/L oranına göre değişimi.....	126
Şekil 3.43.	BCCZ mikro kafes yapıların deneysel, sayısal ve teorik başlangıç elastisite modüllerinin d/L oranına göre değişimleri.....	127

Şekil 3.44.	BCCZ mikro kafes yapılarda dikey mikro tellerin çaplarının eğik mikro tellerinkine göre farklı olması durumlarında başlangıç elastisite modülünün değişimi.....	128
Şekil 3.45.	BBCZ mikro yapıların deneysel testlerinden elde edilen başlangıç çökme gerilmesi değerlerinin d/L oranına göre değişimi	129
Şekil 3.46.	BCCZ mikro yapılar için deneysel, sayısal ve teorik başlangıç çökme gerilmesi değerlerinin d/L oranına göre değişimleri.....	130
Şekil 3.47.	BCC mikro kafes yapılar için düşme testlerinden elde edilen farklı şekil değiştirme hızlarına ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (L=2.5 mm)	131
Şekil 3.48.	BCC mikro kafes yapıların düşme test sonuçları için deneysel ve sayısal başlangıç çökme gerilmesi değerlerinin şekil değiştirme hızına göre değişimi (L=2.5 mm)	132
Şekil 3.49.	BCCZ mikro kafes yapıların düşme test sonuçları için deneysel ve sayısal başlangıç çökme gerilmesi değerlerinin şekil değiştirme hızına göre değişimi (L=2.5 mm)	133
Şekil 3.50.	Farklı kusur tiplerinin (desenlerinin) basma davranışlarının karşılaştırılması	134
Şekil 3.51.	Aynı desene sahip farklı şiddetteki kusurların BCC kafes yapıların davranışlarına etkisinin karşılaştırılması; a) Basma, b) Kesme	135
Şekil 3.52.	Farklı şiddette kusurlara sahip BCC kafes yapıların deforme olmuş ve olmamış hallerinin karşılaştırılması	135
Şekil 3.53.	BCC kafes bloklar için sınır tabaka etkilerinin incelenmesi; a) Başlangıç çökme gerilmesi, b) Elastisite modülü açısından	137
Şekil 3.54.	2.5 mm hücre boyutuna sahip BCC kafes yapıların darbe yüklemesi esnasında uzunluk boyunca oluşan birim hücre şekil değiştirme profillerinin, a) 10, b) 20, c) 30, d) 50 m/s darbe hızları için çeşitli zaman adımlarında görünüşleri	140
Şekil 3.55.	Çeşitli darbe yüklemeleri altında 2.5 mm hücre boyutuna sahip kafes yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	141
Şekil 3.56.	Darbe ve sabit uçlardan elde edilen gerilme-zaman eğrilerinin, a) 30 m/s ve b) 50 m/s hızları için karşılaştırılması	142
Şekil 3.57.	Farklı darbe hızlarında numunenin sönümlendiği şekil değiştirme enerjisi değerlerinin karşılaştırılması (L=2.5 mm)	143
Şekil 3.58.	Farklı darbe hızlarında elde edilen deformasyon mekanizmalarının belirli birim şekil değiştirme değerlerindeki görünüşleri (L=2.5 mm)	144

Şekil 3.59.	1.25 mm hücre boyutuna sahip BCC kafes yapıların darbe yüklemesi esnasında uzunluk boyunca oluşan birim hücre şekil değiştirme profillerinin, a) 20, b) 30, c) 50, d) 70 m/s darbe hızları için çeşitli zaman adımlarında görünüşleri	145
Şekil 3.60.	Çeşitli darbe yüklemeleri altında 1.25 mm hücre boyutuna sahip kafes yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	146
Şekil 3.61.	Darbe ve sabit uçlardan elde edilen gerilme-zaman eğrilerinin, a) 50 m/s ve b) 70 m/s darbe hızları için karşılaştırılması	147
Şekil 3.62.	Farklı darbe hızlarında numunelerin sönümlendiği şekil değişim enerjilerinin karşılaştırılması (L=1.25 mm).....	147
Şekil 3.63.	Farklı darbe hızlarında elde edilen deformasyon mekanizmalarının belirli birim şekil değiştirme değerlerindeki görünüşleri (L=1.25 mm).....	148
Şekil 3.64.	Mikro kafes yapılar ve yaygın hücre malzemelerin mekanik performanslarının karşılaştırılması; a) İzafi elastisite modülü, b) İzafi çökme gerilmesi (Ashby vd., 2006; güncellendi)	150
Ek Şekil 1.	Elastik lineer plastik malzemenin idealleştirilmiş hali; a) Gerilme-birim şekil değiştirme davranışı, b) kesit boyunca elastik ve plastik gerilme dağılımları.....	167
Ek Şekil 2.	İntegrasyon için dairesel kesitten birim alanın hesabı	169

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Hücresel malzemelerin bazı uygulama alanları	2
Tablo 1.2. Literatürde karşılaşılan hücre topolojilerinin bir özeti (Elsayed, 2010-güncellenmiş)	10
Tablo 1.3. Araştırma alanlarına göre literatürde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların genel bir özeti.....	20-21
Tablo 1.4. Yapısal kusurların hücresel malzemelerin mekanik davranışları üzerine etkilerini inceleyen çalışmalar	27
Tablo 2.1. 316L paslanmaz çeliğini oluşturan elementlerin yüzde oranları	35
Tablo 3.1. BCC kafes yapılar için deneysel sonuçların özeti.....	80
Tablo 3.2. BCCZ kafes yapılar için deneysel sonuçların özeti.....	83
Tablo 3.3. f ₂ BCC kafes yapılar için deneysel sonuçların özeti.....	86
Tablo 3.4. Dikey mikro telleri açısından farklı tip BCCZ kafes numunelerinin üretim parametreleri ve basma test sonuçlarının özeti.....	98
Tablo 3.5. Farklı lazer gücü ile üretilen mikro tellerin teorik çapları (Lazer nüfus süresi sabit ve 1000 µs)	104
Tablo 3.6. Mikro teller için deneysel olarak elde edilen Cowper-Symonds sabitlerinin literatürde var olanlarla karşılaştırılması	108
Tablo 3.7. Kusurlu modellerin basma ve kesme simülasyonlarından elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması (MPa)	136

SEMBOLLER DİZİNİ

a	: Mikro tellerin kesişim bölgesinde geometrik ilişki
A	: Kesit alanı
A^*	: Birim hücrenin yüzey alanı
b	: Mikro tellerin kesişim bölgesinde geometrik ilişki
c	: Akmaya başlayan liflerin tarafsız eksenden uzaklığı
C	: Elastik dalga hızı
C_0	: Hopkinson çubuk testinde çubukların elastik dalga hızı
d	: Mikro tellerin çapı
d_z	: Dikey mikro tellerin çapı
D	: Cowper-Symond sabiti
E	: Elastisite modülü
F	: Uygulanan kesme kuvveti
F_1	: Eğik mikro tellere etkiyen dikey kuvvet
F_2	: Dikey mikro tellere etkiyen aksenal kuvvet
F_z	: Birim hücreye etkiyen kuvvet
G	: Çeliğin kayma modülü
h	: Bir mikro telin çökme miktarı veya deplasmanı
I	: Atalet momenti
l	: Efektif tel uzunluğu
l_z	: Dikey tellerin efektif uzunluğu
l'_z	: Yapıştırıcı bölgesinin yüksekliği
L	: Hücre boyutu veya numune boyutu
L_x, L_y, L_z	: Numune kesit ölçüleri
M	: Uygulanan moment
M_0	: Tam plastik moment
M_1	: Reaksiyon momenti
n	: Bir kenar boyunca kafesteki hücre sayısı
N	: Uygulanan normal veya aksenal kuvvet
N_1	: Normal reaksiyon kuvveti

q	: Cowper-Symond sabiti
R	: Arcan test cihazında yatay reaksiyon kuvveti
U_p	: Partikül hızı
V	: Kafes bloğun hacmi
V_0	: Darbe hızı
V_1, V_2	: Hopkinson çubuk testinde numune ara yüzlerinin hızları
x	: Mikro tellerin kesişim bölgesi yarıçapı ve bağımsız değişken
x'	: İzafi yoğunluğun belirlenmesinde kesişim bölgesi yarıçapı

Yunan sembolleri

β	: Plastik moment çarpanı
γ	: Açısal şekil değiştirme
Δl_z	: Dikey tellerde aksel kısılma miktarı
Δ	: Kusurlu yapılarda kesişim noktalarının yer değiştirme miktarı
ε	: Normal birim şekil değiştirme
ε_a	: Dairesel kesitte oluşan en büyük birim şekil değiştirme
ε_g	: Gelen dalganın birim şekil değiştirme genliği
ε_i	: İletilen dalganın birim şekil değiştirme genliği
ε_r	: Yansıyan dalganın birim şekil değiştirme genliği
$\dot{\varepsilon}$	: Birim şekil değiştirme hızı
θ	: Hacim merkezli kafeslerde tel açısı
Φ	: Kuvvet açısı
μ	: Tanjant modülünün elastisite modülüne oranı
$\eta(\varepsilon)$	: Enerji sönümleme parametresi
ρ	: Malzeme yoğunluğu
ρ_s	: Ana malzemenin yoğunluğu
ρ^* / ρ_s	: İzafi yoğunluk
σ	: Normal gerilme
σ_0	: Statik akma gerilmesi
σ_f	: Dikey tellerin plastik çökmeye başladığı gerilme değeri

τ	: Kayma gerilmesi
ψ	: Tel kesitinin dönme açısı
ω	: Kirişin ucundaki deplasman miktarı

Alt indisler

T	: Toplam
BCC	: Hacim merkezli kübik
BCCZ	: Dikey tel içeren hacim merkezli kübik
f_2 BCC	: Yüzey merkezli ve hacim merkezli kübik yapı
*	: kafes bloğa ait veya makro büyüklükler
d	: Dinamik
p	: Plastik
s	: 316L paslanmaz çeliğine ait büyüklükler
y	: Akma

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Taşımacılık ve paketleme gibi endüstrilerin yeni teknolojik ilerlemelerinde enerji yönetimi ve güvenlik endişeleri iki temel parametredir. Enerji yönetimi daha hafif malzemeleri talep ederken, güvenlik endişeleri ise yüksek mukavemetli malzemeleri talep etmektedir. Bu iki parametrenin tatmin edici bir şekilde optimum durumunun sağlanmasına yönelik en elverişli malzemelerin başında, düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet özellikleri sebebiyle hücresel malzemeler gelmektedir. Hücresel malzemeler doğada ahşap, mantar, sünger, bal petekleri, kemikler ve mercan gibi pek çok şekilde yaygın halde bulunmaktadır (Gibson ve Ashby, 1997; Ashby, 2011). İnsanoğlu, yüzyıllardan beri bu tip doğal hücreli malzemelerden faydalanmışlardır. Örneğin Mısır piramitlerinde en az 5000 yıllık ahşap eserlere rastlanılmaktadır. Romalılar döneminde (M.Ö.27) şarap şişelerinde mantarların tıpa olarak kullanıldığı bilinmektedir (Gibson ve Ashby, 1997). Yakın geçmişte insanoğlu yapay hücresel malzemeler yapabilmıştır. En basit düzeyde, hafif ağırlıklı yapısal elemanlarda kullanılan bal peteği şeklinde malzemeler birbirine paralel prizmatik hücrelerden yapılırlar. Çok daha geniş kullanım alanları olan polimerik köpükler tek kullanımlık kahve bardaklarından uçak kokpitlerindeki darbe emicilerine kadar yaygın olarak kullanılmaktadır. Köpük malzemeleri elde etme yöntemleri sadece polimer malzemelerle sınırlı kalmamış metal, seramik ve cam malzemelerden de köpük üretme teknikleri geliştirilmiştir. Bu yeni köpük malzemeler giderek artan yapısal uygulamalarda titreşim yalıtımı ve darbelerden enerji sönmüleme veya soğurma aracı olarak kullanılmaktadır. Bu tip malzemelerin hücreli yapılarından dolayı sahip oldukları özellikler kullanıldıkları uygulamalarda üstünlük sağlamaktadır. Genelleştirilirse, hücresel malzemelerin mükemmel mekanik, termal ve akustik özellikleri birçok mühendislik uygulamasına ilham kaynağı olmaktadır. Paketleme, termal yalıtım, enerji sönmüleme, akustik ve sandviç yapıların dolgu malzemesi olarak, Tablo 1.1’de de özetlendiği gibi pek çok uygulama alanları bulunmaktadır. İnsan yapımı hücresel malzemeler polimerik, seramik ve metalik köpük malzemeler, bal küpü yapılar ve kafes malzemeler olarak imal edilmektedir.

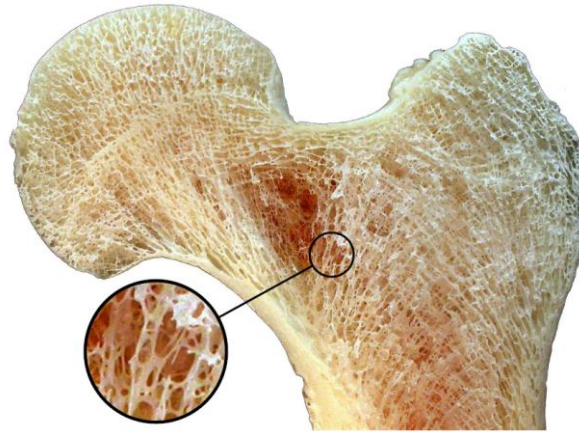
Tablo 1.1. Hücresel malzemelerin bazı uygulama alanları

Uygulama alanı	Açıklama
Yalıtım	Kahve ve çay bardakları, uzay mekiği ateşleyicileri, modern binalar (ısı ve ses yalıtımı), transport sistemleri (özellikle soğutuculu araçlar), radar sistemlerde (elektro manyetik dalga korunması)
Filtreleme	Klimalar, Metal döküm sanayi (döküm içindeki yabancı maddelerin açık hücreli seramik köpükten geçirilerek temizlenmesi)
Paketleme	Taşımacılık sektörü (ürünlerin korunması amacıyla kaplanması)
Enerji sönümleme	Transport sistemleri (darbeyi sönümlemek için), ulaşım araçları, taşımacılık, nükleer santral vb.
Yapısal uygulama alanları	Sandviç yapılar, ince cidarlı tüpler (bu yapılarda hücreli malzemeler dolgu malzemesi olarak kullanılır)

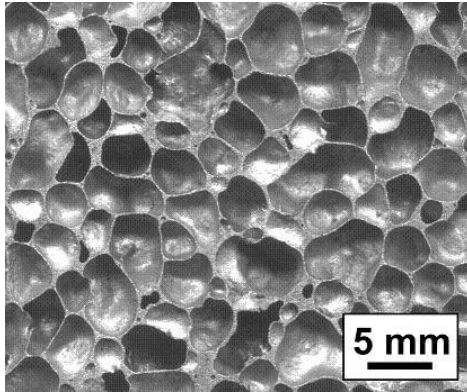
Hücresel malzemenin tanımı şu şekilde yapılabilir. Bir malzemenin içindeki boşluk, o malzemeyi oluşturan katı malzemenin hacminden izafi olarak büyük ise bu malzeme hücresel malzeme olarak adlandırılabilir. Ayrıca, bir malzemenin hücresel malzeme olabilmesi için, malzemeyi oluşturan birim hücrelerin düzenli veya düzensiz şekilde çok sayıda tekrarlanması gerekmektedir. Şekil 1.1’de doğal hücresel malzemelere tipik bir kemik örneği yanında insan yapımı hücresel malzemelere örnekler sunulmaktadır.

Hücresel malzemelerin en önemli belirleyici özelliği, hücresel malzemenin yoğunluğunun hücresel malzemeyi oluşturan ana malzemenin yoğunluğuna oranı olan izafi yoğunluklarıdır. Ultra hafif köpükler 0.001 izafi yoğunlukla üretilebilirken, polimerik (Polymeric) köpükler 0.05 ve 0.2 civarında izafi yoğunluğa sahip olmaktadır. Bununla birlikte çoğu yumuşak dokulu ağaç 0.15 ile 0.40 arasında izafi yoğunluğa sahiptir (Gibson ve Ashby, 1997). İzafi yoğunluk 0.3 değerinin üzerine çıkması durumunda bir hücresel yapıdan gözenekli yapıya geçiş olmaktadır. Bu durumda yapının, izole edilmiş boşluklar içeren bir katı malzeme olarak düşünölmeye başlanması daha doğru olmaktadır (Gibson ve Ashby, 1997). İzafi yoğunluğun yanında hücresel malzemelerin mekanik özellikleri, yapıyı oluşturan hücrelerin mikro seviyede mimari yapısına, yani hücre topolojisine ve hücre duvarının yapıldığı malzemenin mekanik özelliklerine de çok güçlü bağıllık göstermektedir (Gibson ve Ashby, 1997). Bununla birlikte çoğu hücresel malzeme, hücre

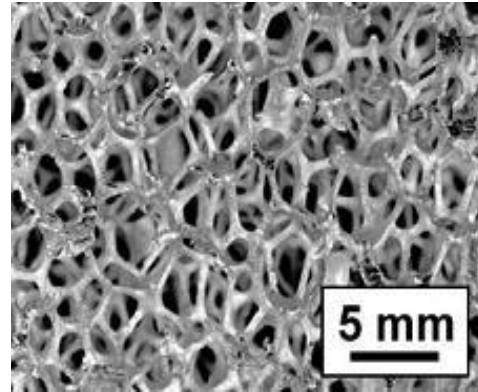
topolojisinden ve üretim yönteminin bir sonucu olarak anizotropik malzeme davranışına sahiptir. Örneğin bal küpü petek yapılar düzlem dışı yükleme durumunda düzlem içi yüklemeye göre çok daha fazla enerji sönümleme ve yapısal yük taşıma kapasitesine sahiptir.



(a)



(b)



(c)

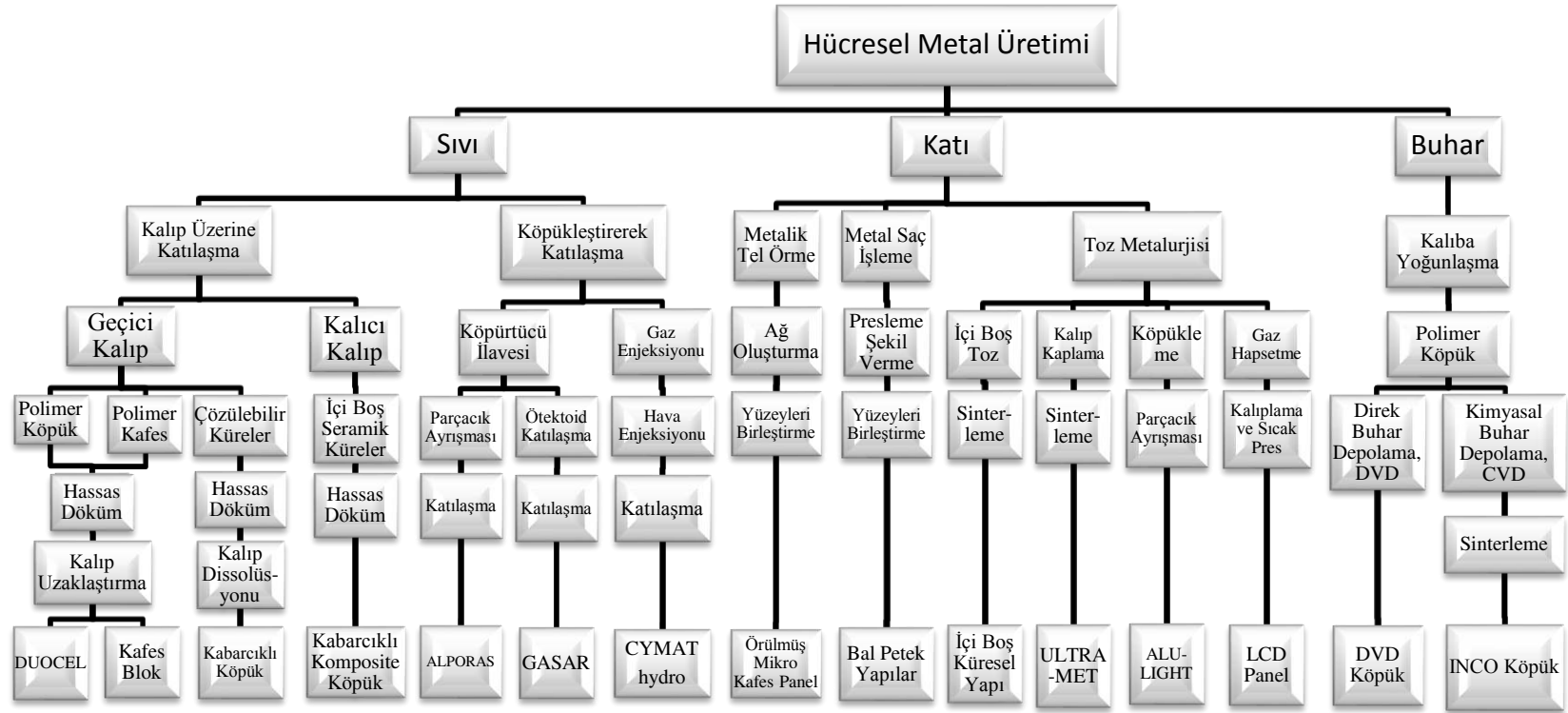
Şekil 1.1. Hücresel malzemelere örnekler; a) insan kemiğinin hücresel yapısı, b) kapalı hücreli alüminyum köpük, Alporas (Miyoshi vd., 2000), c) açık hücreli alüminyum köpük, Duocel (Andrews vd., 1999).

1.2. Metalik Hücresel Malzemelerin Üretimi ve Sınıflandırılması

Hücresel malzemelerin uygulama alanları günden güne büyüdüğü için onlarla ilgili üretim yöntemleri de gelişim ve çeşitlilik göstermektedir (Wadley, 2002). Şekil 1.2’de Wadley (2002) tarafından metalik hücresel malzemelerin üretim yöntemlerinin bir sınıflandırılması gösterilmekte ve bu yöntemlerle elde edilen ürünlerin ticari adları

verilmektedir. Bu sınıflandırmaya göre metalik hücresel malzemeler, hücre duvarlarını oluşturan ana malzemenin sıvı, katı veya buhar fazlarına uygulanan çeşitli yöntemlerle elde edilmektedir. Sıvı faz durumunda, iki yöntemle katılaşma sağlanmaktadır. Bunlardan birincisinde ergime veya buharlaşma sıcaklığı nispeten düşük hücresel polimer kalıplar kullanılır. Polimer kalıp içindeki boşluklar ısıya dayanıklı bir dolgu malzemesi ile doldurulur ve sonra kalıbın ısıtılması suretiyle polimer malzeme uzaklaştırılır. Ergimiş sıvı metal oluşan boşluklara dökülür ve soğutularak katılaşır. En son adımda dolgu malzemesinin uzaklaştırılması suretiyle hücresel malzeme elde edilir. Duocel malzeme (Şekil 1.1c) bu yöntemle üretilen malzemelere en iyi örnektir. İkinci yöntemde ise hücresel boşlukları sağlamak için sıvı metalin içine direk gaz enjeksiyonu yapılır veya gaz oluşturan maddelerden katılır. Oluşan boşluklu sıvı metal soğutularak hücresel malzeme elde edilmiş olur. Bu yöntemle üretilen ticari köpük malzemelere Alporas, Gasar ve Cymat örnek verilebilir. Katı durumda ise çeşitli metalik tel veya saçların değişik makine işlemlerinden geçirilerek birbirlerine birleştirilmesi ile hücresel malzeme elde edilir (Wadley, 2006). Bunun yanında çeşitli tip metalik tozların sinterlenmesi ile de hücresel malzemeler elde edilmektedir. Son olarak buhar durumunda, yüksek basınç altında buhar fazdaki metal, hücresel geometriye sahip polimer kalıbın üzerine püskürtülerek biriktirilir. İşlem sonunda polimer ısıtılarak veya kimyasal bir yöntemle uzaklaştırıldıktan sonra geriye metalik hücresel malzeme kalır.

Yukarıdaki sınıflandırmanın dışında ilave olarak elektroliz teknik, lazer sinterleme ve lazer ergitme teknolojileri kullanılarak metalik hücresel malzeme üretim yöntemleri de mevcuttur. Bunlardan elektroliz teknikte metal parça, önceden iletken bir yüzeyle kaplanmış hücresel polimer kalıp üzerine iyonize edilmek suretiyle biriktirilir (Banhart, 2001). Polimer kalıbın ısıtma işlemleriyle ortamdan uzaklaştırılması ile hücresel malzeme elde edilmiş olur. Lazer sinterleme ve lazer ergitme yöntemleri temelde birbirlerine benzemekle birlikte kullanılan metal tozları ve lazer gücü açısından farklılık gösterirler. Lazer sinterleme yönteminde daha büyük boyutlu metal tozları kullanılır. Bu yöntemde tozların üzerine belirli koordinatlara göre lazer gönderilerek metal tozların yüzeylerinin birbirlerine yapışması sağlanır. Bu işlemler çoklu defa tekrarlanarak hücresel malzeme elde edilebilir. Lazer ergitme yönteminde ise nispeten küçük metal tozları kullanılmakla birlikte lazer sinterleme yönteminden farklı olarak tozların tamamen ergimesi sağlanmaktadır. Lazer ergitme yöntemi ile ilgili detaylı bilgiler ileriki bölümlerde verilecektir.



Şekil 1.2. Metalik hücresel malzemelerin üretim yöntemlerinin bir sınıflandırılması ve elde edilen ürünlerin ticari adları (Wadley, 2002).

Köpük malzemeler, açık hücreli ve kapalı hücreli köpük malzemeler şeklinde sınıflandırılabilir. Eğer köpüğün yapıldığı ana malzeme sadece hücre köşelerinde toplanmışsa, yani hücreler birbirine açık yüzeylerle bağlıysa bu tip köpüklere açık hücreli köpükler denir. Eğer katı hücre köşelerine ek olarak hücre yüzeylerinde de katı malzeme varsa yani hücreler arasındaki bağlantı kapalıysa bu tip köpüklere de kapalı hücreli köpükler denir. Açık hücreli malzemelere Duocel ve kapalı hücreli malzemelere Alporas köpük malzemeleri örnek olarak verilebilir (Şekil 1.1). Bazı köpükler aynı anda hem açık hücrelere hem de kapalı hücrelere sahip olabilmektedir (Gibson ve Ashby, 1997).

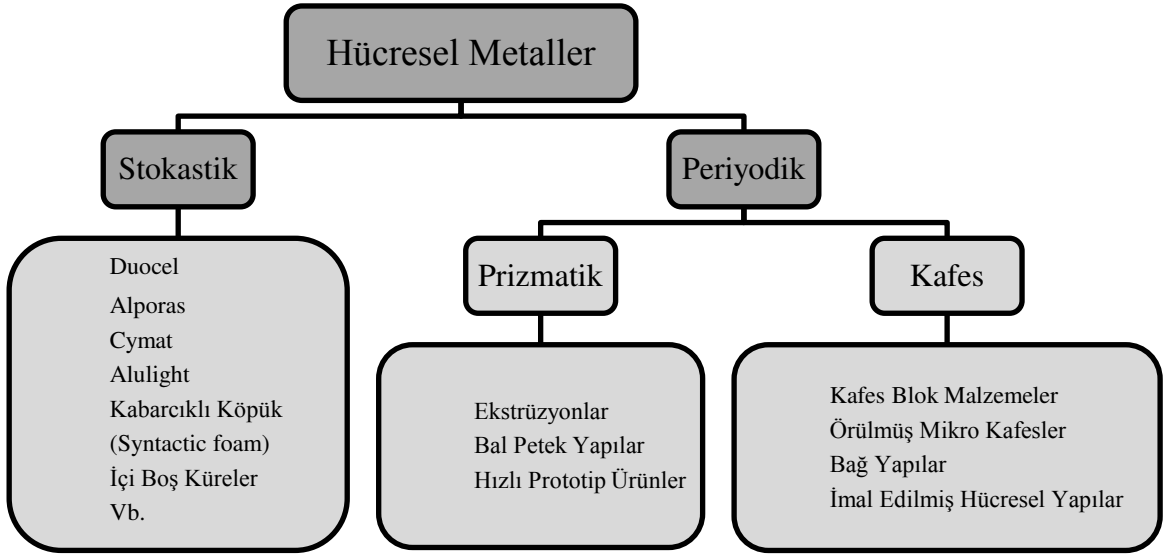
Daha genel olarak hücreli malzemeler geometrik karakteristikleri, fonksiyonluklarına ve üretim prosesleri (süreçleri) gibi çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Hücreli malzemelerin geometrileri stokastik (rastgele), periyodik ve hatta bunların bir karışımı şeklinde olabilir. Wadley (2002), Şekil 1.3’de gösterildiği gibi hücreli malzemeleri, geometrik karakteristiklerine göre stokastik ve periyodik olmak üzere iki ana kategoride topladı. Şekilden de görüldüğü üzere hemen hemen tüm köpüksü malzemeler stokastik özelliğe sahiptir. Hem stokastik hem de periyodik hücreli malzemelere örnekler Şekil 1.4’te verilmektedir. Periyodik hücreli malzemeler, bal küpü (Honeycomb) yapılar gibi iki yönde veya kafes (Lattice materials) yapılar gibi üç yönde tekrarlayan bir birim hücre tarafından karakterize edilir.

Hücreli malzemeler potansiyel olarak çok fonksiyonlu malzemelerdir. Köpükler gibi stokastik malzemeler mükemmel termal ve akustik özellikler sahipken, bal küpü yapılar ve kafes yapılar gibi periyodik hücreli malzemeler, enerji sönümleme, mukavemet ve rijitlik gibi süper mekanik özellikler sahiptir (Gibson ve Ashby, 1997).

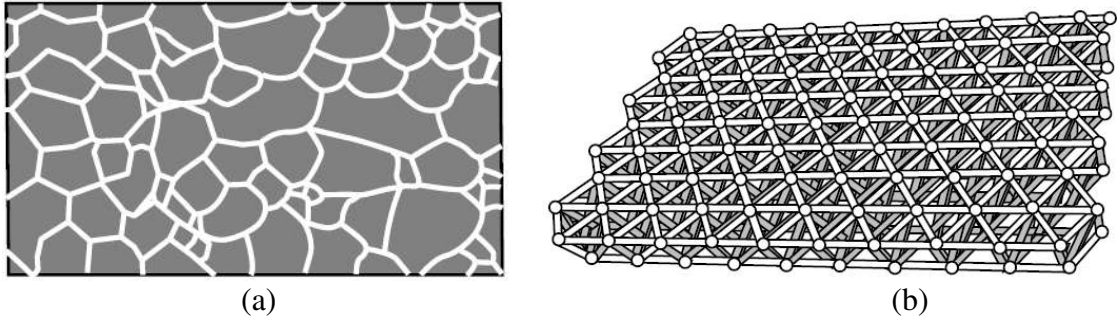
Üretim yöntemlerine veya elde edilmiş şekline göre hücreli malzemeler doğal ve yapay malzemeler olarak da sınıflandırılmaktadır. Doğal malzemelerin neredeyse tümü stokastik özelliğe sahip veya kısmi periyodiktir. Ayrıca, yukarıdaki sınıflandırmalara ilave olarak hücreli malzemeler üretildikleri malzemenin cinsine göre de seramik, polimer ve metalik hücreli malzemeler olmak üzere üç sınıfa ayrılabilirler (Gibson ve Ashby, 1997; Gibson, 2003).

Bir kafes malzeme, bir birim hücre geometrisinin yan yana veya üst üste döşemesiyle elde edilirse, periyodik hücreli malzeme olarak tanımlanabilir (Fleck vd., 2010). Başka bir deyişle bir kafes malzeme, onun mikroskobik parçacıklarından çok daha büyük makroskobik hacme sahip bir kafes yapısıdır. Hücre sayısı birkaç tane olabileceği gibi çok büyük sayılarda da olabilmektedir. Kafes yapıların köpük malzemelere göre ana avantajı

üretim esnasında hücre topolojisinin kontrol edilebilmesi ve bunun sonucunda çalışma şartlarına daha uyumlu malzemelerin elde edilebilmesidir. Hücre topolojisinin kontrol edilebilmesi onları biyomedikal, uçak ve otomotiv sektörleri gibi pek çok uygulama alanında en güçlü aday yapmaktadır (Hongqing, 2005).



Şekil 1.3. Hücresel malzemelerin geometrik karakteristiklerine göre sınıflandırılması (Wadley, 2002).

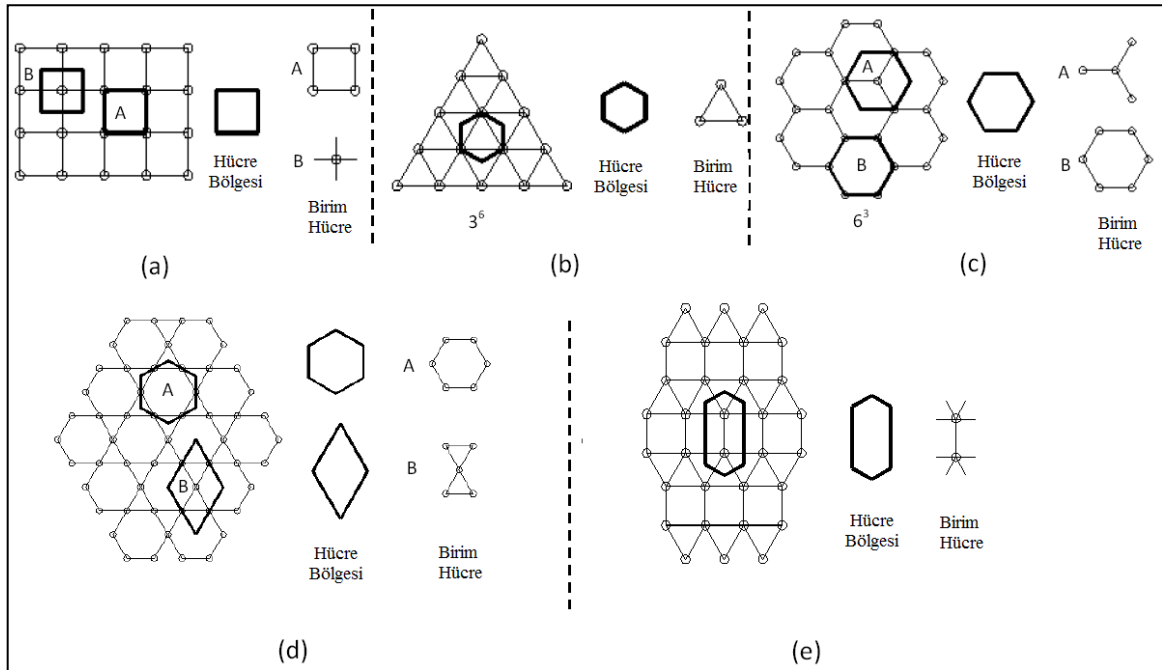


Şekil 1.4. Geometrik hücresel yapılara örnekler; a) Stokastik, b) Periyodik

1.3. Periyodik Kafes Yapıların Geometrik Sınıflandırılması

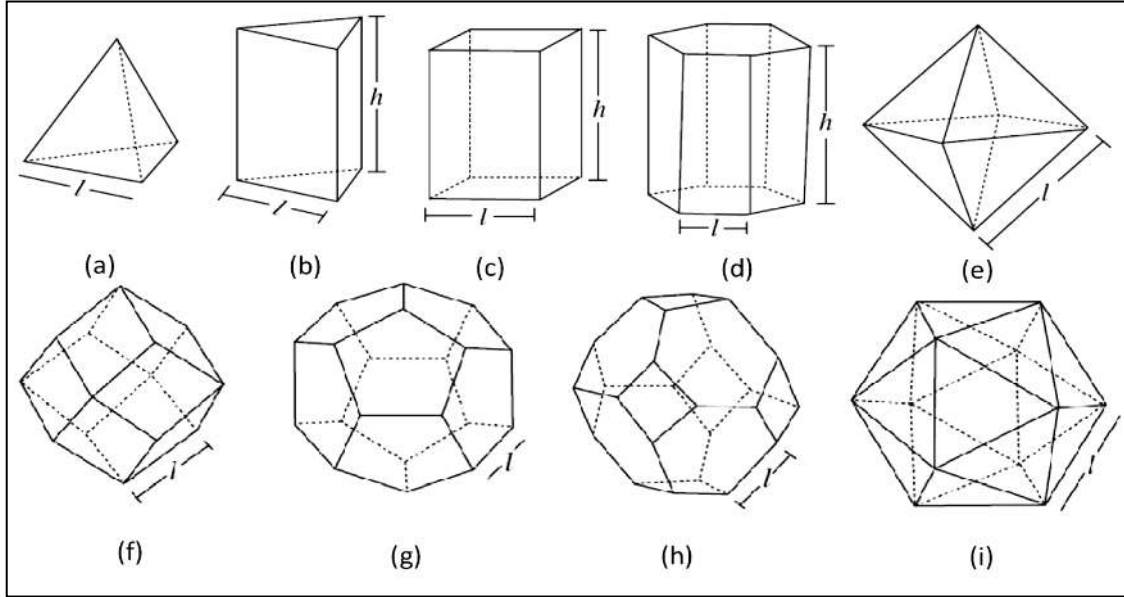
Periyodik kafes yapılar iki boyutlu ve üç boyutlu kafes yapılar şeklinde iki grupta toplanabilir. Başka bir deyişle periyodik kafes yapılar düzlemsel ve uzaysal kafes yapılar olarak ikiye ayrılabilir.

Düzlemsel kafes yapılar da genel olarak düzenli, yarı düzenli ve düzensiz olarak üçe ayrılabilir (Elsayed, 2010). Bir düzenli kafes yapı yalnızca üçgen, kare veya altıgen şeklinde (bal petek yapılar gibi) olabilen poligonlardan oluşur. Yarı düzenli kafes yapılarda ise iki veya daha fazla tip poligonların düzlemde döşenmesinden oluşmaktadır. Yarı düzenli kafes yapıya bir örnek olarak, Kagome kafes olarak bilinen üçgen-altıgen kafes yapı örnek verilebilir. Hem düzenli hem de düzensiz kafes yapılarda, kafesteki tüm düğüm noktaları aynı sayıda bağlantı elemanı içermektedir. Düzenli ve yarı düzenli kafes yapılara bir kaç örnek Şekil 1.5’de verilmektedir.



Şekil 1.5. Düzenli ve yarı düzenli kafes yapılarına örnekler; a) Kare, b) Üçgen, c) Bal petek (Düzenli yapılar), d) Kagome, e) Üçgen-kare yapılar (Yarı düzenli yapılar) (Elsayed, 2010).

Uzaysal kafes yapılar çok yüzlü cisimlerin (Polyhedra) döşenmesi ile elde edilir. Şekil 1.6’da dokuz temel çok yüzlü cisim gösterilmektedir. Bu temel cisimler uzayda döşeme yapılarak üç boyutlu kafes yapılar elde edilir. Ayrıca bu cisimlerin farklı kombinasyonları kullanılarak da kafes yapı oluşturulabilir. Örneğin, dört yüzlü (tetrahedron) ve sekizyüzlü (octahedron) kullanılarak octet-truss (Deshpande vd., 2001a) kafes konfigürasyonu elde edilir. Tablo 1.2’de kafes malzemelerinin literatüründe düşünülen genel hücre topolojilerinin bir özeti sunulmaktadır.



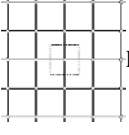
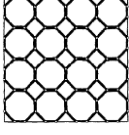
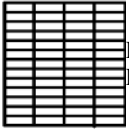
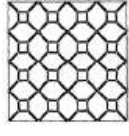
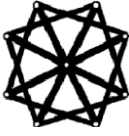
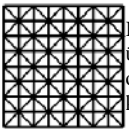
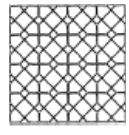
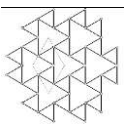
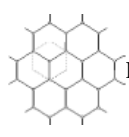
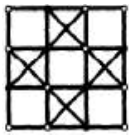
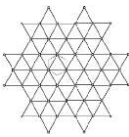
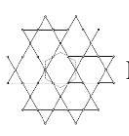
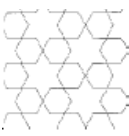
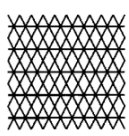
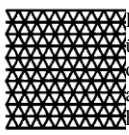
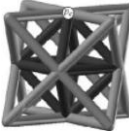
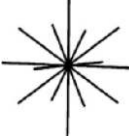
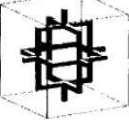
Şekil 1.6. Üç boyutlu temel çok yüzlü hücreler (Deshpande vd., 2001a); a) Tetrahedron (dört yüzlü), b) Üçgen prizma, c) Dikdörtgen prizma, d) Altıgen prizma, e) Sekizyüzlü, f) Rombik dodekahedron, g) Beşyüzlü dodekahedron, h) Tetrakaidekahedron, i) İcosahedron

1.4. Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ve Mikro Kafes Üretimi

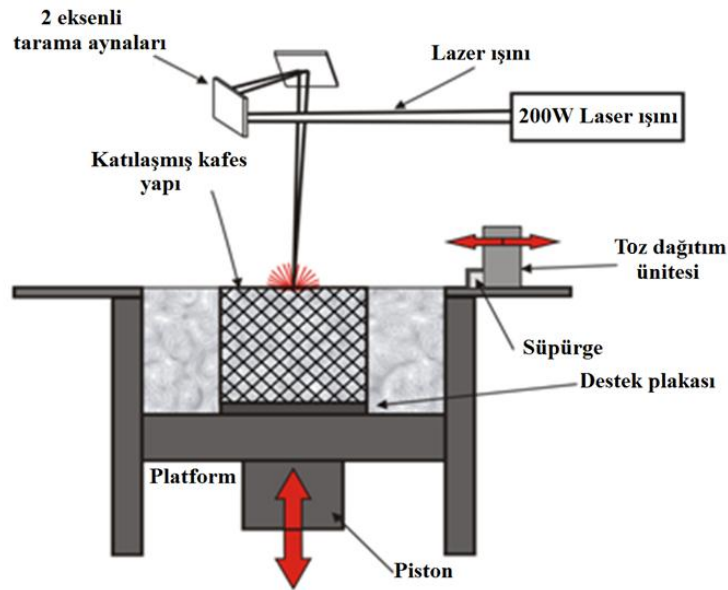
Çoğu hücresel malzeme için en önemli problem, yukarıda da belirtildiği gibi hücre yapısının düzensizliği ve hücrelerin heterojen dağılımıdır. Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda, seçici lazer ergitme yöntemi ile geleneksel köpük malzemelerden daha yüksek mukavemetli ve daha yüksek rijitlik özelliğine sahip hücresel malzemelerin üretiminin olası olduğu belirlenmiştir (URL-1, 2010; Abe vd., 1998; Abe vd., 2001).

Seçici lazer ergitme yöntemi daha yüksek enerjili lazer ışını kullanmasına rağmen, kullanılan ekipman açısından lazer sinterleme yöntemine benzer bir üretim prosesidir. Bu ileri teknoloji basit bir geometriden çok kompleks geometrilere kadar bir çok parçanın tabaka tabaka üretilmesine olanak verir. Üretilen parçalar herhangi bir ekstra işleme ihtiyaç duymadan katı veya neredeyse tam katı yoğunluğa (gözeneksiz) sahip olabilmektedir (URL-1, 2010).

Tablo 1.2. Literatürde karşılaşılan hücre topolojilerinin bir özeti (Elsayed, 2010-güncellenmiş).

İki Boyutlu Kafes Topolojileri								
Hücre Geometrisi	Hücre Adı	Referans	Hücre Geometrisi	Hücre Adı	Referans	Hücre Geometrisi	Hücre Adı	Referans
	Kare hücre	Hayes vd., 2004			Sigmund, 1994			Sigmund, 1994
	Dikdörtgen Hücre	Hayes vd., 2004			Sigmund, 1994			Sigmund, 1994
	Kare ve üçgenlerden oluşan süper kare hücreler	Hayes vd., 2004			Sigmund, 1994		Üçgen-üçgen hücreler	Hutchinson ve Fleck, 2006
	Bal petek	Christensen, 2000			Sigmund, 1994		Üçgensel Hücreler	Hutchinson ve Fleck, 2006
	Kagome	Christensen, 2000		Yıldız Hücreler	Christensen, 2000		Elmas Hücre	Fan vd., 2009
	Eşit üçgenlerden oluşan altıgen süper hücreler	Hayes vd., 2004						
Üç Boyutlu Kafes Topolojileri								
	Octet-truss	Deshpande vd., 2001a		Çevresel kübik Hücre	Fischer, 2007		Radyal Kübik	Hongqing, 2005; Fischer, 2007
	Weaire-Phelan Hücreleri	Weaire ve Phelan, 1994		En basit köpük hücresi modeli	Gibson ve Ashby, 1997		Kelvin Hücreleri	Gabbrielli, 2009

Şekil 1.7 seçici lazer ertitme yönteminin şematik şeklini göstermektedir. Bu yöntemde önce destek plakasının üzerine mikron kalınlıkta bir metal toz tabakası toz dağıtım ünitesi vasıtasıyla serpilir. Yüksek güçlü lazer ışını mikro saniye zaman dilimlerinde spesifik olarak bilgisayar tanımlı geometrik desene göre tozun üzerine gönderilir. Ergiyen toz parçacıkları bir önceki tabakada bulunan katılaştırmış yüzeylere yapışır. Sonra platform, bir tabaka kalınlığı miktarı kadar mesafe piston yardımıyla aşağı yönde hareket eder ve yeni bir toz tabakası toz dağıtım ünitesi vasıtasıyla oluşturulur. Bu süreç tüm parça tamamlanıncaya kadar tekrarlanır. Son adım olarak artan tozlar parçadan temizlenerek üç boyutlu parça elde edilmiş olur. Bu yöntemde tozların tam ertitmesi meydana geldiği için oksitlenmeye karşı üretim esnasında ortam Argon gazı ile doldurulmaktadır. Metal tozu olarak 20-50 μm büyüklüğünde küresel parçacıklardan oluşan titanyum, nikel temelli süper alaşımlar, çelikler ve alüminyum gibi birçok metal tozu kullanılabilir (Kruth vd., 2004; Tsopanos, 2009; Tsopanos vd., 2010).

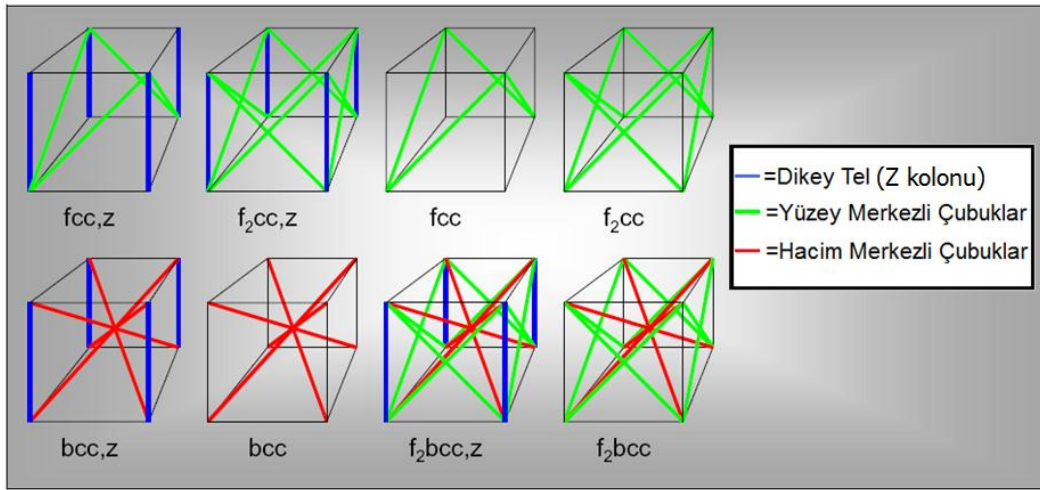


Şekil 1.7. Seçici lazer ertitme yönteminin şematik gösterimi (Tsopanos vd., 2010).

Seçici lazer ertitme yöntemi ile 0.01 ile 1 arasında izafi yoğunluğunda ve buna bağlı olarak farklı hücre büyüklüğünde kafes yapılar üretmek mümkün olmaktadır. Mikro tellerin çapı 100 ile 250 μm arasında değişebilmektedir (Shen, 2009). Bu yöntemle üretilen mikro kafesler lazer gücü ve lazer etki süresi (laser exposure time) açısından karakterize

edilmektedir (Shen, 2009; Kruth vd., 2004; Tsopanos vd., 2010). Ayrıca yüksek yoğunluk ve yüksek mukavemet gibi optimum malzeme özellikleri elde etmek için bu parametreler dikkatli şekilde seçilmelidir (Tsopanos vd., 2010).

Rehme ve Emmelmann (2006) tarafından yapılan çalışma ile seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilmesi uygun olan kafes yapıların temel kübik hücre tipleri ile ilgili tanımları Şekil 1.8’de gösterilmektedir. Şekilde dikey tellerin varlığı “z” ile adlandırılır. Yüzey diyagonalleri (“f veya fcc” ile gösterilen) 45° açı ile köşegen boyunca yerleşmişken, hacim merkezine doğru olan 35.3° açı ile hacim merkezli teller (“bcc veya BCC” ile ifade edilen) yerleşmektedir.



Şekil 1.8. Seçici lazer yöntemi ile üretilebilen kafes yapılar için temel kübik hücre tiplerinin tanımları (Rehme ve Emmelmann, 2006).

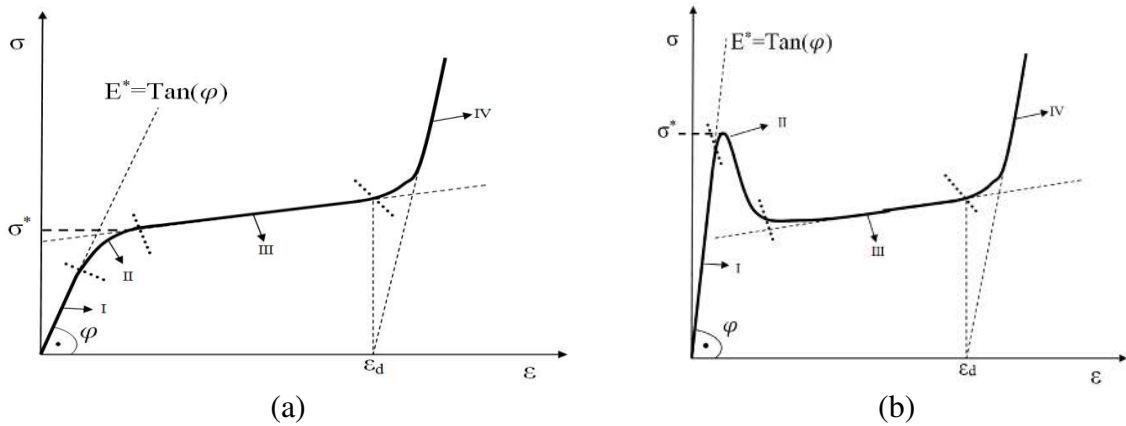
1.5. Hücresel Malzemelerin Genel Mekanik Davranışları

Bir hücresel malzemenin karakteristik mekanik davranışı hücre duvarlarını oluşturan malzemenin yanında hücresel yapının topolojisine güçlü şekilde bağlılık gösterir (Gibson ve Ashby, 1997). Farklı hücresel malzemelerdeki mikro yapı, üretim tekniklerinin farklılığına bağlı olarak ta çok farklı özelliklere sahip olabilmektedir. Bu sebeple birçok mikro yapısal özellikler ve geometriler pek çok karakteristik farklı mekanik cevaplar göstermesine rağmen, yinede tipik bir eğilime sahiptirler.

Şekil 1.9’da hücresel malzemelere ait tipik basma gerilme-birim şekil değiştirme davranışlarının şematik eğrileri gösterilmektedir. Genel olarak iki tip gerilme davranışı ortaya çıkmaktadır (Ashby, 2006). Bunlar eğilme baskın (Bending dominated) ve çeki-bası

baskın (Stretching dominated) gerilme davranışlarıdır. Eğilme baskın yapıda hücresel malzeme içinde deformasyonlar hücre duvarlarının eğilmesi ile gerçekleşmektedir. Buna karşılık çeki-bası baskın davranışta, en azından yüklemenin başlangıcında hücre duvarları çeki veya bası yüklemelerine maruz kalır ve bunun sonucunda çökme, duvarların burkulması ile gerçekleşir. Eğilme mekanizması baskın yapının gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi dört tip deformasyon bölgesine ayrılmaktadır (Şekil 1.9a). Yüklemenin başında kısa bir elastik davranıştan (I) sonra elastik plastik yükleme bölgesi (II) başlamaktadır. Bu bölgede hücre duvarlarında akma meydana gelmesi sebebiyle eğri lineer olmayan bir artış göstermektedir. Elastik plastik çökme bölgesinden sonra hücresel malzeme, hücrelerin ardı ardına çökmesi ile sıkışmaya başlar. Bu bölge kararlı çökme bölgesi (III) olarak adlandırılır ve tüm hücre duvarları birbirine temas edene kadar devam eder. Birçok köpük malzeme için bu bölgede gerilme sabit veya çok az bir artış eğilimi göstermektedir. Son bölümde tüm hücre duvarlarının birbirine temasının tamamlanmasıyla yoğunlaşma (densification) başlar ve gerilme hızla artış gösterir. Bu bölgeye (ϵ_d değerinden sonraki) yoğunlaşma bölgesi (IV) adı verilmektedir.

Eğilme baskın davranışta ayrıştırılan bölgelere benzer ayrıştırma da çeki-bası baskın gerilme davranışı içinde gerçekleştirilebilir (Şekil 1.9b). Çeki-bası baskın davranışta gerilme başlangıçta bir pik değerine çok düşük birim şekil değiştirme değerinde ulaşır. Bu noktada hücre duvarlarında meydana gelen burkulmaların etkisiyle gerilme değeri ani düşüş gerçekleştirir. Bu bölge içinde plastik çökmeler meydana gelir (II). Kararlı çökme bölgesinde (III), çeki-bası baskın yapılarda yapının çökme mekanizmasına bağlı olarak gerilme düz bir değişim göstermekten ziyade birçok pik değer yapabilir.



Şekil 1.9. Hücresel malzemelerin tipik basma davranışlarının şematik gösterimi; a) Eğilme baskın, b) Çeki-bası baskın

Teorik çalışmalarda, hücresel malzemelerin mekanik özellikleri ile ilgili genellikle iki parametreye odaklanılır. Bunlar başlangıç çökme gerilmesi (σ^*) ve elastisite (E^*) modülüdür (Şekil 1.9). Bu parametreler tipik bir basma gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde şu şekilde belirlenebilir. Başlangıç çökme gerilmesi, plastik çökme bölgesine (III) çizilen eğim çizgisinin elastik plastik yükleme bölgesi (II) ile teğet noktaya karşılık gelen gerilme değeri ile belirlenebilir. Elastisite modülü ise başlangıç yükleme eğrisinin lineer kısmının eğimi olarak alınabilir.

Ayrıca yoğunlaşma bölgesinin başladığı birim şekil değiştirme değeri hücresel malzemelerin mekanik özelliklerini karakterize eden önemli bir parametredir. Örneğin, bir hücresel malzemenin enerji sönümlene kapasitesi tasarım gereksinimlerine bağlı olarak yoğunlaşma birim şekil değiştirme değeri ile tanımlanır veya hesaplanır (Ashby vd., 2000). Yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerini belirlemek için literatürde kesin bir metot olmamakla birlikte uygulanan başlıca şu yöntemlerden bahsedilebilir. Birinci metotta, plastik çökme bölgesi (III) ve yoğunlaşma bölgelerinin (IV) teğet eğrilerinin kesişim noktası alınmaktadır. İkinci metotta ise elastik yükleme bölgesinin eğimine eşit bir eğri Şekil 1.9'dakine benzer şekilde yoğunlaşma bölgesinden çizilir ve yatay eksenle kesişen nokta yoğunlaşma birim şekil değiştirme değeri olarak belirlenir (Ashby, 2006). Son yöntem olarak, Li vd. (2006), yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerini bulmak için aşağıdaki eşitlikte tanımlanan enerji sönümlene parametresi formülünü önermişlerdir. Bu parametre köpük malzemelerin optimum enerji sönümlemesi için gerekli koşulu tanımlar.

$$\eta(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma(\varepsilon)} \int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1.1)$$

Burada, ε_y akma birim şekil değiştirmeyi göstermektedir. Eşitlik (1.1)'de verilen eğrinin eğiminin sıfır olduğu ($d\eta(\varepsilon)/d\varepsilon = 0$), yani sönümlenen enerjinin pik yaptığı noktaya karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri yoğunlaşma birim şekil değiştirme değeri olarak alınmaktadır.

1.6. Hopkinson Çubuk Testi ve Teorisi

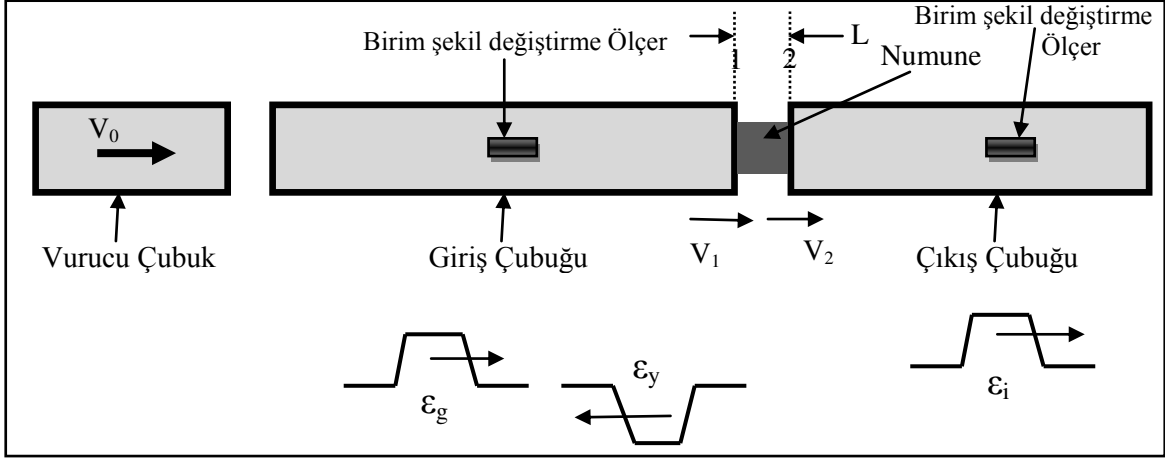
Hopkinson çubuk testi homojen deformasyon şartları altında yüksek birim şekil değiştirme hızlarında yoğun şekilde kullanılan temel test metodudur. 1949 yılında Kolsky

(1949) tarafından icat edilmesinden dolayı Kolsky çubuk testi metodu olarak da bilinir. Bu test için ilk fikirler John Hopkinson'un 1908'de demir tellerinde gerilme dalga deneylerine dayanır (Gama vd., 2004). Ardından oğlu Bentram Hopkinson, 1914 yılında patlama ile üretilen basıncı deneysel olarak belirleyen ünlü basınç çubuğu tekniğini geliştirdi (Gama vd., 2004). Bundan 34 yıl sonra Davies (1948) bir Ossilloskop ile basınç çubuğundaki dalga yayılımını ilk kez kaydetmeyi başarmıştır. Aynı yıl Kolsky (1949) farklı malzemelerin dinamik basma gerilme-birim şekil değiştirme davranışlarını belirlemek için basınç çubuğu tekniğini kullanmayı başarmıştır.

Hopkinson çubuk test cihazı, Şekil 1.10'da görüldüğü üzere gerilme dalgasının oluşmasını sağlayan vurucu çubuk, oluşan dalganın numuneye iletilmesini sağlayan giriş çubuğu ve numuneden geçen dalgayı ileten çıkış çubuğu olmak üzere üç elastik çubuktan oluşur. Numune giriş çubuğu ile iletim çubuğunun arasına yerleştirilmektedir. Vurucu çubuğun yüksek hızla eksenel olarak giriş çubuğuna çarpması sonucu ortaya çıkan bası dalgası, giriş çubuğu boyunca yayılarak numune ara yüzüne gelir. Numune ve elastik çubuk arasındaki empedans farkından dolayı gelen dalganın bir kısmı çubuk eksenine boyunca geriye, çeki dalgası olarak yansırken diğer kısmı ise numune tarafından çıkış çubuğuna bası dalgası olarak iletilir. Bu yöntemde dalganın numuneden geçmesi oldukça karışıktır. Numune ara yüzlerinde kuvvet dengesi, başlangıçta numuneye gelen dalganın, numune ara yüzleri arasında pek çok defa yansıma yapmasından sonra sağlanır. Bu sebeple başlangıçta numunede homojen bir deformasyon sağlanamadığından dolayı Hopkinson tekniği dinamik elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılması uygun değildir. Hopkinson çubuk testinde, hem giriş çubuğunda hem de çıkış çubuğunda oluşan zamana bağlı şekil değişimleri, genellikle her iki çubuğun ortasına yerleştirilen birim şekil değişimi ölçerler vasıtasıyla ölçülür. Bu teknik vasıtasıyla elde edilen birim şekil değiştirme hızları 10^2 - 10^4 s⁻¹ aralığında değişmektedir.

Bu aşamada bir numunede oluşan gerilme, birim şekil değiştirme ve birim şekil değiştirme hızını hesaplayan temel bağıntılar çıkarılacaktır (Meyers, 1994). Numunenin empedansı çubukların empedansından düşük olduğu kabul edilmektedir ki bu Hopkinson çubuk testi için temel şartlardan birisidir ($\rho_0 A_0 C_0 > \rho A C$). Burada, ρ, A, C , sırasıyla yoğunluk, kesit alanı ve elastik dalga hızını göstermektedir. Alt indis "0" özelliklerin çubuğa ait olduğunu gösterirken, alt indissiz terimler numuneyle ilgilidir. V_1 ve V_2 hızları, Şekil 1.9'da görüldüğü üzere 1 ve 2 ara yüzlerinin hızlarıdır. Numunede oluşan birim şekil değiştirme hızı ara yüzü hızları ile şu şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{L} \quad (1.2)$$



Şekil 1.10. Hopkinson çubuk testinin çalışma prensibi

Uzun bir çubukta bir boyutlu dalga yayılımı durumunda gerilme ve partikül hızları arasında şu bağıntılar mevcuttur (Meyers, 1994).

$$\sigma = \rho U_p C \quad (1.3)$$

Burada $\varepsilon = \sigma/E$ olduğundan partikül hızı şu şekilde ifade edilebilir.

$$U_p = C\varepsilon \quad (1.4)$$

Böylece eşitlik (1.4)'ten yararlanılarak 1 ve 2 ara yüzlerindeki hızlar belirlenebilir.

$$1 \rightarrow V_1 = C_0 \varepsilon_g \quad (t = 0 \text{ anında}) \quad (1.5)$$

$$2 \rightarrow V_2 = C_0 \varepsilon_i$$

Zamanın sıfırdan farklı olduğu anlarda ise V_1 hızı yansıyan dalganın etkisiyle azalmaktadır ve böylece 1 nolu yani giriş çubuğu ve numune ara yüzündeki hız;

$$V_1 = C_0(\varepsilon_g - \varepsilon_y) \quad (1.6)$$

şeklini alır. (1.3) ve (1.4) denklemleri (1.1) denkleminde yerlerine yazılırsa;

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{C_0(\varepsilon_g - \varepsilon_y) - C_0\varepsilon_i}{L} \quad (1.7)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_0}{L} (\varepsilon_g - \varepsilon_y - \varepsilon_i) \quad (1.8)$$

eşitlikleri elde edilir. Son eşitliğin sıfırdan t zamanına kadar integrali alınarak numunedeki birim şekil değiştirme elde edilebilir.

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{L} \int_0^t [\varepsilon_g(t) - \varepsilon_y(t) - \varepsilon_i(t)] dt \quad (1.9)$$

Numunedeki gerilmeyi elde etmek için kuvvet dengesi düşünülürse;

$$\sigma = \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2A} \quad (1.10)$$

eşitliği bulunur. Burada $P_1(t)$ ve $P_2(t)$ kuvvetleri 1 ve 2 ara yüzlerinde etkiyen kuvvetlerdir. Bu kuvvetler ve eşitlik (1.10) şu şekilde ifade edilebilir.

$$P_1(t) = A_0 E_0 (\varepsilon_g + \varepsilon_y)$$

$$P_2(t) = A_0 E_0 \varepsilon_i \quad (1.11)$$

$$\sigma = \frac{A_0 E_0}{2A} (\varepsilon_g(t) + \varepsilon_y(t) + \varepsilon_i(t))$$

Hopkinson çubuk testlerinin en önemli kabullerinden birisi numunenin her iki ara yüzden eşit kuvvetlere maruz kaldığı kabulüdür. Fakat bu çoğu zaman, gerçekleşmez. Gelen dalga numune ara yüzüne geldiği zaman bir kısmı yansırken diğer kısmı numune boyunca iletilir ve iletim çubuğu ara yüzünde tekrar yine bir kısmı iletilirken diğer kısmı geri döner. Bu süreç numune üzerinde gerilme üniform hale gelene kadar çok kısa sürede birkaç defa gerçekleşir. Bu sebeple numunenin dinamik yüklemesi başlangıcında çok büyük birim şekil değiştirme hızı değişimleri meydana gelir. Bu sebeple Hopkinson çubuk testleri dinamik elastik modülünün belirlenmesinde sağlıklı sonuçlar verme ihtimali düşüktür. $P_1(t)=P_2(t)$ kuvvet dengesi için, “ $\varepsilon_g + \varepsilon_y = \varepsilon_i$ ” ifadesi elde edilir. Bu ifade kullanılarak gerilme, birim şekil değiştirme ve birim şekil değiştirme hızı denklemleri yeniden yazılabilir.

$$\sigma = \frac{A_0 E_0}{A} \varepsilon_i(t) \quad (1.12)$$

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_y \quad (1.13)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_y dt \quad (1.14)$$

1.7. Literatür Araştırması

Hücresele malzemeler, çeşitlilikleri ve geniş kullanım alanlarına sahip olmalarının yanında ilginç ve kompleks mekanik davranışları nedeniyle pek çok bilim adamının çalışmalarına esin kaynağı olmuştur. Bu sebeple bu malzemelerin mekanik davranışlarını incelemeye yönelik literatürde, deneysel, sayısal ve teorik çalışmalardan oluşan oldukça geniş bir rezerv bulunmaktadır. Hücresele malzemelerin deneysel özellikleri ve sınıflandırılmalarıyla ilgili temel çalışmaları ve teorik olarak yapılan mikro mekanik modelleme çalışmalarını bir araya toplayan önemli bir kaynak kitap Gibson ve Ashby (1997) tarafından oluşturulmuştur. Bu bölümde gerçekleştirilen literatür çalışması, Gibson ve Ashby (1997) tarafından özetlenen çalışmalara ilave olarak son yıllarda gerçekleştirilen çalışmaları kapsamaktadır. Ayrıca, hücresele malzemelerle ilgili literatürün genişliği sebebiyle burada genel olarak metalik hücresele malzemelere odaklanılmaktadır. İlgili çalışmalar, anlaşılabilirliği artırma adına incelenilen özelliklere veya konulara göre altı alt başlık altında toplanmıştır. Buna ilave, bazı durumlarda belli bir özelliği veya konuyu inceleyen benzer çalışmalar tablolar halinde verilmiş olup, bu çalışmaların bazıları açık formda sunulmuştur.

1.7.1. Hücresele Malzemelerin Statik ve Dinamik Deneysel Davranışları

Yapılan birçok deneysel test metalik hücresele malzemelerin deformasyon davranışlarının yanında izafi yoğunluğa bağlı olarak mekanik özelliklerinin değişimini incelemeyi amaçlamıştır. Bu çalışmalardan bazıları, incelenen malzeme ve konuya göre genel olarak Tablo 1.3’de özetlenmektedir.

Tabloda, köpük malzemeleri ele alan çalışmalar, genel olarak bu malzemelerin basma davranışlarına odaklanmaktadır. Bu testler vasıtasıyla köpük malzemelerin çökme

davranışı ve mekanizmaları, izafi yoğunluğun etkisi, hücre boyutu ve topolojileri gibi parametreler hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir. Ayrıca bu parametrelerin yanında dinamik çökme mekanizmaları ve şekil değiştirme hızı bağımlılığı da araştırma konusu yapılmıştır. Örneğin, Tan vd. (2002), bir kapalı hücreli alüminyum alaşımı köpük malzemenin dinamik karakteristiğini deneysel olarak çalışmışlardır. Başlangıç çökme gerilmelerinde dinamik olarak önemli artışlar belirlerken plato (kararlı çökme bölgesi) gerilmelerde 100 m/s darbe hızlarına kadar değişim görmemişlerdir. 100 m/s hızından sonra bir şok dalgasının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Yine aynı ekip bir başka çalışmada, kapalı hücreli Hydro/Cymat köpük malzemesinin dinamik testlerini direk darbe testi ile gerçekleştirmiştir (Tan vd., 2005). Plastik çökme gerilmelerinde önemli artışların olduğunu gözlemlemişlerdir. Lopatnikov vd. (2003), Taylor darbe testi vasıtasıyla kapalı hücre köpük malzemelerin yüksek hızlı dinamik testlerini gerçekleştirmişlerdir. Şok dalgasının darbenin hemen başında ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir.

Bal petek yapılar için ise, Goldsmith ve Sackman (1992), bu malzemelerin düzlem dışı dinamik testlerini gerçekleştirmiştir. Dinamik sonuçların statik sonuçlarla karşılaştırılmasında % 50 civarında gerilme artışını belirlemişlerdir. Ayrıca Wu ve Jiang (1997) ile Zhao ve Gary (1998) tarafından yapılan çalışmalarda da alüminyum bal petek yapıların düzlem dışı dinamik testlerinde statik testlere göre önemli gerilme artışları bulunmuştur. Radford vd. (2007), kare hücreli bal petek yapıların düzlem dışı davranışını bir direk Kolsky çubuk testi vasıtasıyla 300 m/s hızına kadar darbe hızlarında incelediler. Yüksek hızlarda darbe ucunda plastik dalga etkisiyle gerilmelerde artış olduğunu sabit uçta ise gerilmelerde değişim olmadığını belirlemişlerdir.

Düzlem içi yükleme durumunda altıgen bal petek yapıların başlangıç çökme ve burkulma davranışlarını Papka ve Kyriakides (1998) hem deneysel hem de sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişlerdir.

Cote vd. (2006), bir sandviç yapının dolgu malzemesi olarak saç plakalardan oluşturulmuş elmas ve oluklu kafes yapının kesme ve basma davranışlarını, sayısal ve teorik yaklaşıkları da katarak incelemişlerdir. Benzer bir çalışma, Kooistra vd. (2004) ve Kooistra vd. (2008) tarafından dörtyüzlü birim hücre geometrisine sahip metalik kafes yapılar için gerçekleştirilmiştir. Aynı numune için farklı sıcaklıklardaki dinamik testler Split Hopkinson çubuk testi kullanılarak Tang vd. (2007) tarafından gerçekleştirilmiştir. Piramit hücre geometrisine sahip sandviç malzeme için statik ve dinamik testlerde Lee vd.,

(2006b), mikro atalet etkilerinin yapıdaki gerilme artışlarında önemli bir oynadığını belirlemişlerdir.

Zupon vd. (2004), paslanmaz çelik tellerden metalik örgü yöntemiyle oluşturulan kafes yapının statik basma davranışını incelemişlerdir.

Tablo 1.3. Araştırma alanlarına göre literatürde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların genel bir özeti

Hücre Malz. Tipi	Çalışmalar	Test tipi	Araştırma alanı
Bal petek Yapılar (İki boyutlu veya düzlem içi)	Shim ve Stonge, 1986; Papka ve Kyriakides, 1998	Statik	Deformasyon mekanizması
	Klintworth ve Stronge, 1988; Papka ve Kyriakides, 1994	Statik	Deformasyon mekanizması ve akma yüzeyleri
	Papka ve Kyriakides, 1999	Statik	İki eksenli yükleme davranışı
Bal petek Yapılar (Düzlem dışı)	Tilbrook vd., 2007; Zhou ve Mayer, 2002	Statik/ Dinamik	Mekanik davranış
	Baker vd., 1998	Statik/ Dinamik	Şekil değiştirme hızı etkisi ve mekanik davranış
	Goldsmith ve Sackman, 1992; Wu ve Jiang, 1997; Zhao ve Gary, 1998	Dinamik	Darbe hızına bağlı mekanik davranış
	Radford vd., 2007	Dinamik	Mekanik davranış ve dalga etkisi
Açık hücreli köpükler	Triantafillou vd., 1989	Statik	Elastik burkulma ve plastik çökme davranışı
	Bart-Smith vd., 1998; Zhou vd., 2004	Statik	Basma Deformasyonu
	Nieh vd., 2000	Statik	İzafi yoğunluk, hücre boyutu ve şeklinin etkileri
	Gioux vd., 2000	Statik	Çok eksenli yükleme davranışı ve modellenmesi
	Montanini, 2005	Statik/ Dinamik	Şekil değiştirme hızı bağımlılığı ve enerji sönmeme
	Lee vd., 2006b	Statik/ Dinamik	Şekil değiştirme ve mikro atalet etkileri
Kapalı hücreli köpükler	Thornton ve Magee, 1975	Statik	Bası davranışı ve mukavemeti
	Simone ve Gibson, 1998b; Sugimura vd., 1997	Statik	Hücre yapısı ve mekanik davranış

Tablo 1.3'ün devamı

Hücre Malz. Tipi	Çalışmalar	Test tipi	Araştırma alanı
Kapalı hücreli köpükler	McCullough vd., 1999	Statik	Çekme ve bası davranışı
	Gioux vd., 2000	Statik	Çok eksenli yükleme davranışı ve modellenmesi
	Montanini, 2005	Statik/ Dinamik	Şekil değiştirme hızı bağımlılığı ve enerji sönümleme
	Issen vd., 2005	Statik	Deformasyon lokalleşmesi
	Aly, 2007	Statik	Sıcaklığın mekanik davranışa etkisi
	Deshpande ve Fleck, 2000; Mukai vd., 1999; Dannemann ve Lankford, 2000	Dinamik	Şekil değiştirme hızı bağımlılığı
Üç boyutlu kafes yapılar	Tan vd., 2002; Tan vd., 2005; Lopatnikov vd., 2003	Dinamik	Dinamik basma karakteristiği
	Queheillalt ve Wadley, 2009; Cote vd., 2006; Kooistra vd., 2004; Kooistra vd., 2008	Statik	Bası ve kesme davranışı
	Zupon vd., 2004	Statik	Düzlem dışı basma cevabı, izafi yoğun. ve numune boyut etkisi
	Tang vd., 2007	Dinamik	Sıcaklığa bağlı dinamik mekanik davranış
	Lee vd., 2006a; Lee vd., 2006b	Statik/ Dinamik	Mikro atalet ve dalga etkisi

1.7.2. Modelleme Çalışmaları

Hücre malzemelerin mekanik davranışlarını daha iyi anlamak ve teorik bağıntılar geliştirebilmek için yapılan ilk çalışmalar, yapıyı en iyi temsil edecek bir birim hücre modelinin geliştirilmesine odaklanmıştır. Örneğin, Alporas gibi kapalı hücreli köpük malzeme için en iyi birim hücre modelinin 14 yüzlü Tetraikaidekahedron (Şekil 1.6) yapının olduğu belirlenmiştir. Bu tip birim hücre modellerinin oluşturulması, köpük malzemeler gibi karmaşık (Stokastik) hücre malzemelerin teorik ve sayısal modellemelerinde oldukça yararlı sonuçlara olanak vermiştir. Bundan dolayı, bu bölümde

hem düzenli hem de düzensiz hücrel malzemelerin deneysel davranışlarını, teorik ve sayısal ortama taşımaya yönelik çalışmalar özetlenmiştir.

Köpük malzemelerin davranışlarının modellenmesi, bilinmeyen mikro yapısal özellikler, karışık hücre geometrileri, büyük deformasyonlar ve çöktükten sonra hücre duvarlarının birbirleri ile teması gibi nedenlerden dolayı oldukça zordur. Teorik çalışmalarda, köpük malzemelerin cevabını belirlemeye yönelik iki yaklaşım mevcuttur. Birincisinde, açık hücreli yapı için hücreyi temsil eden bir bağ veya çubuk elemanı dikkate alınırken, kapalı hücreli yapılar için bir tek hücre duvarı (membrane) ele alınmıştır (Christensen, 1986; Zilauts ve Lagzdin, 1992). Bu çalışmalarda, hücrel malzemenin makro cevabı bağ veya membranın farklı oryantasyonlarındaki cevaplarının ortalaması alınarak tahmin edilmiştir. Bu yaklaşımda, yazarlar yalnızca eksenel deformasyonu dikkate almışlar ve hücre büyüklüğünü, hücre bağlanmasını ve şeklini ihmal etmişlerdir. İkinci yaklaşımda ise, periyodik hücrel yapılara benzer şekilde bir tekrarlanan birim hücre modeli kullanılmıştır. Örneğin, Tetrakaidekahedral birim hücreleri ilk kez Dement'ev ve Tarakanov (1970a) tarafından açık hücreli köpüklere uygulanmıştır. Ayrık bir birim hücrenin karşılıklı kare yüzeylerine uyguladıkları basma kuvveti ile etkin Young (elastisite) modülünün köpüğün izafi yoğunluğu ile doğrudan orantılı olduğunu belirlemişlerdir. Daha sonraki çalışmalarında (Dement'ev ve Tarakanov, 1970b) hücre kirişlerinin eğilmesi de dâhil edilerek Young modülünün gerçeğe daha yakın olarak elde edilmesi sağlanmıştır. Choi ve Lakes (1995) tarafından oluşturulan modelde düzenli Tetrakaidekahedral birim hücre modeli üzerinde enerji yöntemi uygulanarak sadece eğilme deformasyonlarını incelemiştir. Bu çalışmada elde edilen Young modülü tahminleri Dement'ev ve Tarakanov'un (1970b) elde ettiği sonuçlardan farklıdır. Zhu vd. (1997a), Tetrakaidekahedral açık hücreli köpük malzemenin elastisite modülü, kesme modülü ve Poisson oranını hücre duvarlarının eksenel deformasyonunu, eğilmesini ve burulmasını dikkate alarak araştırmışlardır. Aynı ekip aynı çalışmayı büyük şekil değiştirme etkilerini ilave ederek de tekrarlamışlardır (Zhu vd., 1997b). Benzer bir çalışmada da, Tetrakaidekahedral birim hücre modelini kullanarak Warren ve Kraynik (1997), eğilme, basma ve burulma mekanizmalarını dikkate alarak açık hücreli köpük malzemenin mikro mekanik analizini gerçekleştirmişlerdir. Bahsi geçen tüm çalışmalarda, Tetrakaidekahedral birim hücrelere dayanan analizlerin hiçbirinde 36 kirişin tamamının gerilme-şekil değiştirme bilgisinin elde edilmesine yönelik çalışılmamıştır. Ayrıca, sadece karşılıklı kare yüzeylerden basma kuvveti şeklinde yükleme senaryosu uygulanmıştır. Bu sebeple,

Tetrakaidekahedral birim hücre modeli için kapsamlı bir mikro mekanik model Li vd. (2003) tarafından gerçekleştirilmiştir. Onlar, Castigliano'nun ikinci teorisine dayanarak enerji yönteminden yararlanmışlar ve elastisite modülü ve Poisson oranı için iki adet kapalı formda formül elde etmişlerdir. Ayrıca, kesme, eksenel ve eğilme deformasyon etkileri dört tip kiriş kesiti için dikkate alınmıştır. Elde edilen formüller açık şekilde göstermiştir ki, köpük malzemenin elastik özellikleri, izafi yoğunluğa, kiriş kesitinin özelliklerine ve köpüğü oluşturan ana malzemenin mekanik özelliklerine güçlü şekilde bağlıdır. Kapalı hücreli alüminyum köpük malzemelerin çarpma davranışını modellemek için Santosa ve Wierzbicki (1998) tarafından köşeleri kesik küp birim hücre modeli geliştirilmiştir. Bu modelle elde edilen sonuçlar deneysel değerlerle oldukça uyumlu bulunmuştur.

Bir hücreli malzemenin karakteristik mekanik davranışı Bölüm 1.5'den hatırlanacağı üzere, ya eğilme baskın veya çeki-bası baskın olmaktadır (Gibson ve Ashby, 1997). Gibson ve Ashby (1997), eğilme baskın deformasyon mekanizmasının etkin olduğu metal ve polimer köpük malzemelerin başlangıç çökme gerilme değerlerinin izafi yoğunluğa bağlı olarak, $((\rho^*/\rho_s)^{1.5})$ ile orantılı olduğunu göstermişler. Burada, ρ^* hücreli malzemenin yoğunluğu iken ρ_s ise hücreli malzemenin yapıldığı malzemenin yoğunluğunu göstermektedir. Çeki-bası baskın davranışa sahip malzeme durumunda ise başlangıç çökme gerilmesi izafi yoğunluk ile doğru orantılı olarak değişeceği belirlenmiştir. Bunun sonucunda izafi yoğunluğun 0.1 olduğu durumda çeki-bası baskın yapı eğilme baskın yapıdan hemen hemen üç kat daha güçlü olmaktadır. Ayrıca eğilme baskın yapılarda, rijitliğin izafi yoğunluğun karesi ile orantılı olduğunu göstermişlerdir (Gibson ve Ashby, 1997; Ashby vd., 2000). Deshpande vd., (2001b) basit mafsallarla birbirine bağlı çubuk elemanlardan oluşan uzay kafes sistemlerin rijitliğini analiz ederek, hücreli malzemelerde ortaya çıkması muhtemel deformasyon mekanizmasını belirleyen bir topolojik kriter araştırmışlardır. Onlar, çeki-bası baskın deformasyon mekanizmasının ortaya çıkması için iki ve üç boyutlu köpük malzemelerde sırasıyla minimum 6 ve 12 adet bağlantı elemanı gerektiğini belirlemişlerdir.

Demiray vd. (2007), üç boyutlu açık hücreli köpük malzemenin akma davranışını sayısal homojenleştirme ve mikro yapısal modelleme yöntemleriyle incelemişlerdir. Onlar Tetrakaidekahedral birim hücrelerini kullanarak makroskopik akma yüzeylerini gerilme ve birim şekil değiştirme uzaylarında elde ettiler.

Mequid vd., (2002), kapalı hücreli Hydro alüminyum köpük malzemenin rastgele yoğunluk dağılımını hesaba katan çok hücreli sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir.

Model, deneysel deformasyon lokalleşmesi ve mekanik davranışı oldukça yakın tahmin etmiştir.

İki boyutlu kafes yapılar için, akma ve rijitlik yüzeyleri ile çökme mekanizmalarını içeren mekanik özellikler Zhang vd. (2008) tarafından analitik ve sayısal olarak incelenmiştir. Onlar, kagome ve statik şekilde tanımsız kare kafes yapılara odaklanmışlardır. Elmas, kare, eşit üçgenlerden oluşan altıgen süper hücre, bal petek hücre, kare süper hücre, dikdörtgen ve Kagome birim hücrelerden oluşan altı tip bal petek yapının düzlem içi akma ve elastiklik özellikleri teorik olarak Wang ve McDowell (2004) tarafından araştırılmıştır. Karşılaştırmalar, elmas hücre, eşit üçgenlerden oluşan altıgen süper hücre ve Kagome hücresinin düzlem içi mekanik özellikler açısından diğerlerinden daha üstün olduğunu göstermiştir. Konik mikro tellerden oluşan bal petek yapıların analitik modelleri Kim ve Al-Hassani (2001) tarafından çıkarılmıştır. Onlar bal petek yapılar için plastik çökmenin izafi yoğunluğun yanında tel geometrisine bağlı olduğunu belirlemişlerdir. İki boyutlu bal petek ve üçgen kafes yapıların iki eksenli yükleme halinde başlangıç akma yüzeyleri sonlu elemanlar ve analitik yöntemlerle Alkhader ve Vural (2009) tarafından belirlenmiştir. Ayrıca onlar hücre düzensizliğinin akma yüzeylerine etkisini de araştırmışlardır.

Üç boyutlu kafes yapılar için Wallach ve Gibson (2001a) ve Deshpande vd. (2001a) octet-truss ve truss-like yapıların mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Onların analizlerinde eğilme etkileri ihmal edilebilir kabul edilmiştir. Standart homojenleştirme yöntemi kullanılarak, octet-truss yapıların akma yüzeyleri ve mekanik davranışları Mohr (2005) tarafından araştırılmıştır. Doyoyo ve Hu (2006), octet-truss ve kübik kafeslerin birleşmesiyle oluşan Warren tipi kafes malzemenin çok eksenli yükleme ve çökme davranışını teorik olarak araştırmışlardır. Ayrıca bu kafes yapı için çökme yüzeylerini elde ettiler. Kafes blok malzemelerin ve Kagome ile piramit kafeslerin elastisite ve mukavemet özellikleri yanında akma yüzeylerini sırasıyla Fan vd. (2008) ve Fan vd. (2009) teorik olarak elde etmişlerdir. Çeşitli üç boyutlu düzenli kafes yapıların mekanik davranışları Luxner vd. (2004, 2005 ve 2007) tarafından çalışılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı bu çalışmalarda, kafes yapıların elastik anizotropisi ve deformasyon lokalleşmesi gibi pek çok konu ele alınmıştır. Hacim merkezli kübik olmayan kafes yapıların kesme davranışı Ptochos ve Labeas (2012) tarafından analitik olarak araştırılmıştır. Klasik kiriş teorisinin kullanıldığı analizlerde kesme rijitliği için ampirik formüller geliştirilmiş olup, sonuçlar sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmıştır.

Harrigan vd., (2010), hücresel malzemelerin darbe ve patlama yükü altındaki davranışını analitik olarak araştırdılar ve var olan modelleri karşılaştırdılar. Kütle yay modellerinin hücresel malzemelerde oluşan bası dalgasındaki süreksizliği modellemede yetersiz olduğu sonucuna varmışlar. Liu ve Zhang (2009), bal petek yapıların düzlem içi dinamik çarpma davranışına hücre topolojilerinin etkisini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişler. Farklı hücre topolojilerinde farklı deformasyon mekanizmalarının ortaya çıktığını belirlemişlerdir. Benzer bir çalışmada Ruan vd. (2003), bal petek yapıların düzlem içi dinamik davranışını sayısal olarak incelediler. Ortaya çıkan deformasyon mekanizmalarının hücre duvarı kalınlığı ve darbe hızı ile önemli şekilde değiştiğini görmüşlerdir. Höning ve Stronge (2002a), sayısal olarak bal petek yapıların dinamik analizinde elastik dalga yayılımının çökme gelişimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca artan darbe hızıyla gerilme artışının eksenel mikro atalet etkilerden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Bir başka çalışmada da kritik darbe hızından sonra (dalga'nın başladığı) toplam şekil değiştirme enerjisinde güçlü bir artış olduğunu belirlemişlerdir (Höning ve Stronge, 2002b). Qui vd. (2009), bal petek, kare, üçgen ve Kagome gibi iki boyutu periyodik kafes malzemelerin dinamik davranışını sayısal olarak incelemiştir. Onlar, çeki-bası baskın yapılarda plato gerilmelerinin darbe hızıyla değişmemesi sebebiyle ortalama gerilme tanımını geliştirmişlerdir. Böylece ortalama gerilmelerin darbe hızı arttıkça artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Evans vd., (2010), içi boş metalik tüplerden yapılmış mikro kafes yapının sayısal ve deneysel dinamik davranışı araştırdılar. Bu yapıların birim kütle başına sıra dışı şekilde çok ciddi bir enerji sönümledikleri belirlemişlerdir.

Literatürde bazı çalışmalarda köpük malzemelerin gerçeğe en uygun sayısal modellerini elde etmek için X-ışını tomografisi kullanılmıştır. Örneğin, Montminy vd. (2004), hücre uzunluğu, iç açılar ve hücre yüzey alanları gibi gerçek köpük yapısının tanımlamak için bu yöntemi kullanmışlardır. Youssef ve Maire (2005), aynı tekniği üç boyutlu katı modeller elde etmek de kullanarak ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen modelin efektif mekanik özelliklerini hesaplamışlardır.

1.7.3. Hücresel Malzemelerin Mekanik Davranışlarına Düzensizlik ve Yapısal Kusurların Etkisi

Birim hücre modelleri, izafi yoğunluğa ve bireysel hücrenin çökme mekanizmasına bağlı olarak, efektif rijitlik ve mukavemet gibi hücresel malzemelerin hayati mekanik özelliklerinin anlaşılmasında genellikle yararlı bir araçtır. Çoğu idealize edilmiş birim hücre modellerinin tersine, gerçek hücresel malzemeler, farklı duvar kalınlığı, eksik hücre duvarı, dolu hücreler ve geometrik düzensizlikler gibi pek çok kalıtsal kusur içermektedir. Bu mikro yapısal değişimler, köpük malzemelerdeki gibi üretim yöntemine bağlı olarak ortaya çıkmakta veya doğal hücresel malzemelerdeki gibi kendiliğinden var olmaktadır. Bu kusurlar sebebiyle birim hücre modelleri gerçek yapıyı tam olarak temsil etmemektedir. Bundan dolayı bu kusurların etkilerini belirlemeye yönelik pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan bazıları odaklandıkları kusur tipine göre Tablo 1.4’de özetlenmiştir. Genellikle Voronoi yöntemi kullanılarak periyodik olmayan hücre dağılımı hem iki hem de üç boyutlu hücresel topolojiler için elde edilmektedir. Ters parantez içinde ifade edilmedikçe yapılan çalışmalarda kullanılan hücre tipi Voronoi hücreleridir. Silva ve Gibson (1997), iki boyutlu hücresel malzemenin elastisite modülü, plastik çökme mukavemeti ve deformasyon lokalleşmesi üzerine periyodik olmayan hücre dağılımının ve eksik hücre durumlarının etkisini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Voronoi bal petek yapıların mukavemetinin, aynı izafi yoğunluğa sahip periyodik bal petek yapılardan % 30 daha düşük olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Ayrıca rastgele hücre duvarı eksiltmenin, hem Voronoi hem de düzenli bal petek kafes yapıların mekanik özelliklerinde keskin düşüşlere sebep olduğu görülmüştür.

Chen vd. (1999), altı tip kusurun her birinin etkisini iki boyutlu bal petek yapı üzerinde incelemiştir. Onlar, hücre duvarı dalgalılığı, üniform olmayan duvar kalınlığı, hücre boyutu farklılıkları, kırılmış hücre duvarı, eksik hücre duvarı ve periyodik olmayan hücre yayılımının etkilerine odaklanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlardan, iki boyutlu bal petek yapılar için yukarıda sayılan kusurların akma gerilmesine etki sırası şu şekilde olmuştur; kırılmış hücre duvarı, eksik hücre duvarı, hücre duvarı dalgalılığı, periyodik olmayan hücre yayılımı, hücre boyutu farklılıkları ve üniform olmayan duvar kalınlığı.

Eksik veya zarar görmüş hücre duvarlarının üçgen ve kare birim hücreye sahip bal petek yapıların düzlem içi elastiklik özelliklerine etkisi Wang ve McDowell (2003) tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Her iki yapı içinde rastgele yok edilen hücre duvarı

sayısındaki artışla mekanik özelliklerde keskin düşüşler olmaktadır. Ayrıca üçgen hücrelerin kare hücrelerden kusurlara karşı daha az hassasiyete sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1.4. Yapısal kusurların hücresel malzemelerin mekanik davranışları üzerine etkilerini inceleyen çalışmalar

Araştırmacılar	İncelenen kusur tipi
Silva ve Gibson, 1997; Shulmeister vd., 1998; Li vd., 2005; Zhu vd., 2006; Chen vd., 1999; Li vd., 2007; Ajdari vd., 2008; Ajdari vd., 2011	Düzensiz hücre dağılımı (iki boyutlu)
Roberts ve Garboczi, 2002; Zhu vd., 2000; Zhu ve Windle, 2002; Gan vd., 2005; Chen vd., 1999; Li vd., 2006a; Hyun vd., 2009 (Örgü tipi Kagome kafes)	Düzensiz hücre dağılımı (üç boyutlu)
Silva ve Gibson, 1997; Guo ve Gibson, 1999 (Altıgen Bal petek); Chen vd., 1999; Wang ve McDowell, 2003 (kare ve üçgen hücreler); Ajdari vd., 2008; Alkhader ve Vural, (2008); Zhang vd., 2010; Ajdari vd., 2011	Eksik hücre duvarı veya hücre
Li vd., 2005; Warren ve Kraynik, 1987 (Bal petek); Simone ve Gibson, 1998a (Bal petek ve Tetraikadekahedral); Grenestedt ve Tanaka, 1998 (Kelvin Hücresi); Grenestedt ve Bassinet, 2000 (Kelvin Hücresi); Chen vd., 1999; Li vd., 2006a, Li vd., 2007	Üniform olmayan hücre duvarı kalınlıkları
Simone ve Gibson, 1998c (Bal petek ve Tetraikadekahedral); Chen vd., 1999; Queheillalt vd., 2007 (örgü metalik kafes yapılar)	Hücre duvarı dalgalılığı

Li vd. (2005), benzer şekilde Voronoi bal petek yapılarını kullanarak periyodik olmayan hücre dağılımı ve üniform olmayan hücre duvarı kalınlıklarının mekanik özelliklere etkilerini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişler. Efektif elastik özelliklerin ortalama değerlerini ve standart sapmalarını belirlemek için her tip modelden yirmi adet hazırlamışlar. Simülasyonlar, elastisite modülünün hücreler daha düzenli oldukça arttığını, fakat hücre duvarı kalınlığı daha az üniform oldukça azaldığını göstermiştir. Ayrıca her iki kusurun birlikte var olması durumunun elastiklik özellikleri üzerine etkileşimin etkisinin

zayıf olduğunu belirlenmiştir. Zhu vd. (2006), iki boyutlu düşük yoğunluklu Voronoi bal petek yapıların çok büyük şekil değişimleri altındaki mekanik performanslarını incelemiştir. Aynı şiddette izafi yoğunluğa sahip bal petek yapılar için daha fazla düzensizliğin, düşük şekil değişimi değerlerinde daha yüksek tanjant modülü değerine fakat yüksek şekil değişimi değerlerinde ise daha düşük gerilmelere yol açtığı belirlenmiştir.

Üç boyutlu Voronoi hücresel malzemeler üzerinde periyodik olmayan hücre dağılımının etkileri Roberts ve Garboczi (2002) tarafından incelenmiştir. Düşük yoğunluklu açık hücreli köpük malzemeler için periyodik olmayan hücre dağılımının elastik özelliklere etkisi Zhu vd. (2000) tarafından incelenmiştir. Voronoi tipi hücreleri, Tetrakaidekahedral tipi hücrelerin rastgele dağıtılmasıyla elde etmişlerdir. Sonuçlar, daha fazla düzensizliğe sahip köpükler daha büyük Young ve kesme modüllerine sahip olduğunu göstermiştir. Benzer sonuçlar Li vd. (2006) tarafından üç boyutlu hücresel köpükler için gerçekleştirilen analizlerden de bulunmuştur. Düşük yoğunluklu köpükler için, hücre şekillerindeki düzensizlik arttıkça elastisite modülünün arttığını ve buna karşılık, hücre duvarının kalınlığındaki düzensizlikler arttıkça elastisite modülünün azaldığını belirlemişlerdir.

Kapalı Kelvin hücre modeli kullanarak, üniform olmayan hücre kalınlığının kesme ve bulk modülleri üzerine etkisi Grenestedt ve Tanaka (1998) ile Grenestedt ve Bassinet (2000) tarafından incelenmiştir. Her iki modülün de kalınlık değişimlerine karşı hassas olmadığı sonucuna ulaşmışlardır.

Simone and Gibson (1998a), altıgen bal petek ve ideal kapalı hücreli Tetrakaidekahedral hücre modeline sahip köpük malzemelerin mekanik özellikleri üzerine üniform olmayan hücre duvarlarının etkisini sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Onların sonlu elemanlar sonuçları, hücre duvarlarındaki malzeme dağılımının Young modülü üzerine çok düşük etkiye sahip olduğunu buna karşılık, tek eksenli akma mukavemetini ise belli bir derecede etkilediğini göstermektedir. Ayrıca maksimum eğilme momentinin hücre duvarlarının kesişim noktalarında meydana geldiği belirlenmiştir. Aynı araştırmacılar aynı malzemeler üzerinde hücre duvarı dalgalılığının etkisini de incelemişlerdir (Simone and Gibson (1998b)). Bu çalışmada, hücre duvarlarında meydana gelebilecek dalgalılığın hem akma gerilmesini hem de Young modülünü önemli şekilde azalttığını göstermişlerdir.

Grenestedt (2005), sonlu elemanlar yöntemi ile kusurlar arasındaki etkileşimi incelemiştir. Grenestedt'in odaklandığı kusur tipleri, hücre duvarı dalgalanması, üniform olmayan duvar kalınlıkları ve hücre şeklindeki düzensizliklerdir. Taylor açılımı ve istatistiksel argümanlardan yararlanarak, küçük dereceli kusurlar için kusurlar arasındaki etkileşimin oldukça zayıf olduğunu göstermiştir.

Yukarıdaki çalışmalardan farklı olarak gerçek hücre topolojisini elde etmek için Jang vd., (2008) mikro işlemcili X-ray tomografi yöntemini kullanmıştır. Bu amaçla, Polyester ve Duocel alüminyum köpüklerin üç boyutlu resimlerini elde etmişlerdir. Elde edilen resimlerden hücre boyutu, hücre duvarı uzunlukları, malzeme dağılımı ve hücre anizotropisini istatistik olarak belirlemiş ve elde edilen veriler sonlu elemanlar modeli oluşturmada kullanılmıştır.

Li vd. (2007) düzensiz hücre dağılımına ve üniform olmayan hücre duvarı kalınlıklarına sahip iki boyutlu bal petek yapıların dinamik davranışlarını sayısal olarak irdelemişlerdir. Onlar, yukarıdaki çalışmalarda bulunan genel sonuçlara ilave olarak, gerilme dalgasının, kusursuz bal petek yapıya göre düzensiz hücre şekline sahip bal petek yapıda daha hızlı yayıldığını, üniform olmayan hücre duvarı kalınlığına sahip bal petek yapılarda ise daha yavaş yayıldığını belirlemişlerdir. Hücre düzensizliği ve darbe hızı etkisi (iki boyutlu bal petek yapılarda) Zheng vd., (2005) tarafından çalışılmıştır. Düşük hızlarda birden fazla rastgele kesme bandı oluşurken yüksek hızlarda geçici bir deformasyon mekanizması olduğu belirlenmiştir. Düzenli ve düzensiz bal petek yapılar üzerine dinamik sayısal bir çalışmada Ajdari vd. (2011) tarafından gerçekleştirilmiştir. Hem düzenli hem de düzensiz yapılar için, statik, geçiş ve dinamik olmak üzere üç farklı çökme mekanizması tespit etmişlerdir. Ayrıca enerji sönmülemde düzenli ve düzensiz yapılar arasında benzer ilişkiler olduğu ortaya çıkmıştır.

1.7.4. Numune Boyutu ve Sınır Tabaka Etkileri

Gibson ve Ashby (1997), hücre malzeme testlerinde kullanılacak numunelerde numune boyut etkilerinden sakınabilmek için bir köşe boyunca en az sekiz hücrenin mevcut olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu sebeple literatürde numune boyutu ve sınır tabaka etkilerini inceleyen çalışmalar mevcuttur. Örneğin, kapalı hücreli köpük malzemelerin mekanik özelliklerinin tek eksenli yükleme altında numune boyutuna bağlılığı Bastawros vd. (1999) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Onlar numune

kalınlığı arttıkça elastik modülün arttığını belirlemişlerdir. Andrews vd. (2001), hem kapalı hücreli Alporas hem de açık hücreli Duocel köpük malzemelerin mekanik cevaplarının numune boyutuna olan bağılıklarını kare prizmatik numuneler kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Numune boyutunun hücre boyutuna oranı üzerinden yapılan değerlendirmede, hem Alporas hem de Duocel malzemeler için Young modülü ve plastik çökme gerilmesi değerlerinin, numune boyutunun hücre boyutuna oranındaki artışa paralel olarak arttığı belirlenmiştir. Ayrıca her iki malzeme için, numune boyutunun hücre boyutuna oranı değeri altı veya üzeri olunca Young modülü artık değişim göstermemektedir. Çökme gerilmesi için ise, kapalı hücreli ve açık hücreli köpük malzemeler için sırasıyla bu oran beş ve sekiz değerlerini olmaktadır.

Kesme deneyleri açısından Andrews vd. (2001) ve Chen ve Fleck (2002) köpük malzemeler üzerine bazı testler gerçekleştirmişlerdir. Bu testlerde kesme yükü metal köpük malzemenin yüzeyine yapıştırılan metal plakalara uygulanmıştır. Bu durum sınır tabaka etkilerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu çalışmalar, azalan numune kalınlığı ile kesme mukavemetinde bir atışın meydana geldiğini göstermişlerdir.

Kesme testlerine benzer şekilde metal plakalar arasına yapıştırılarak hazırlanan sınırlandırılmış (constrained) köpük malzemelerin tek eksenli bası yüklemesi altındaki numune boyutuna bağılılık Chen ve Fleck (2002) tarafından incelenmiştir. Bu numunelerle yapılan testlerde Andrews vd. (2001) tarafından yapılan serbest yüzeyli numune testlerinden elde edilen davranışın tersi bir davranış elde edilmiştir. Sınırlandırılmış köpük numunelerde, numune kalınlığı azaldıkça çökme mukavemetinde artış olduğu belirlenmiştir. Bu durumun, yapışkan yüzeylere yakın hücre duvarlarının dönmeye karşı lokal direncinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

İki boyutlu Voronoi hücreli malzemeleri için numune boyutu ve sınır tabaka etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle Tekoğlu vd. (2011) tarafından incelenmiştir. Onlar, genel sonuç olarak numune boyutunda azalma ile efektif makroskopik rijitlik ve mukavemetin, bası yüklemesi altında azaldığını kesme yüklemesinde ise arttığını belirlemişlerdir.

Sınır tabaka etkileri ve numune boyutu etkisinin teorik ve nümerik modelleme çalışmaları Onck vd. (2001) ve Diebels ve Steeb (2002) gibi araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, sınır tabaka etkilerinin güçlü şekilde lokal olduğu görülmüştür. Ayrıca Onck vd. (2001), düzenli bal petek yapılar için, serbest yüzeyli köpük malzemelerdeki numune boyutuna bağılılığı benzer bir davranışı teorik olarak belirlemişlerdir.

1.7.5. Şekil Değiştirme Hızının Etkisi

Kapalı hücreli alüminyum alaşımı köpük malzemelerin (Alporas) şekil değişimi hızına mekanik cevapların bağıllığı Mukai vd. (1999) ve Mukai vd. (2006) tarafından gerçekleştirilmiştir. Onlar plato gerilmelerinde 2500 s^{-1} gibi dinamik şekil değiştirme hızlarında artışlar belirlemişlerdir. Alporas ile ilgili benzer şekil değiştirme hassasiyeti çalışması $400\text{-}2500 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızları için Danneman ve Lankford (2000) tarafından yapılmıştır. Yüksek izafi yoğunluklu köpük malzemelerde şekil değiştirme hızı hassasiyetinin düşük izafi yoğunluklu köpük malzemelere göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Yazarlar şekil değiştirme hızı bağımlılığının hücreler arasındaki gaz hareketlerinden kaynaklandığını düşünmüşlerdir.

Alüminyum alaşımı köpük malzemelerin şekil değiştirme hızı Yi vd. (2001) tarafından 3000 s^{-1} şekil değiştirme hızına kadar hızlarda incelenmiştir. Onlar çökme gerilmesinin, artan şekil değiştirme hızı ile arttığını fakat bu etkinin köpük malzemenin yoğunluğu azaldıkça azaldığını rapor etmişlerdir.

Kanahashi vd. (2000), çok düşük yoğunluklu alüminyum köpük malzemelerin, 1400s^{-1} şekil değiştirme hızlarına kadar gerçekleştirdiği dinamik basma deneylerinde plato gerilmesinin ve sönümlenen enerjinin, statik basma değerlerine göre hızlı şekilde arttığını belirlemiştir. 5000 s^{-1} şekil değişimi hızları gibi daha yüksek hızlarda Deshpande ve Fleck (2000), Alulight ve Duocel gibi iki alüminyum köpük malzemenin şekil değişimi hızı bağımlılığını araştırdılar. Onlar şekil değişimi hızının plato gerilmeler üzerine önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır. Benzer davranış, açık hücreli alüminyum alaşımı köpük malzemeler için 1900 s^{-1} şekil değişimi hızlarına kadar Zhihua vd. (2006) tarafından incelenmiştir.

Lee vd. (2006a,b), alüminyum köpük (Duocel) malzemesi, dolgusu piramit birim hücreli metalik panel ve paslanmaz çelik örgü kafes blokların dinamik testlerini 10000 s^{-1} şekil değiştirme hızlarına kadar Kolsky çubuk ve gaz tabancası test cihazlarını kullanarak gerçekleştirdiler. Köpük malzeme için şekil değişimi hızının etkisini, önceki araştırmacıların da belirlediği gibi, düşük seviyede buldular. Örgü kafes bloklar için şekil değiştirme hızı etkisi köpük malzemelerden daha yüksek çıkmıştır.

Bal petek yapılar için düzlem dışı yükleme durumunda dinamik gerilmelerde statik gerilmelere göre % 50 artışın meydana geldiği Goldsmith ve Sackman (1992) tarafından gerçekleştirilen Hopkinson çubuk testleriyle belirlenmiştir.

1.7.6. Lazer Ergitme Yöntemiyle Üretilen Mikro Kafes Yapılar Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde, Liverpool üniversitesi araştırmacıları tarafından seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen metalik mikro kafes yapıların mekanik davranışlarını inceleyen mevcut literatürdeki çalışmalar ve elde edilen bulgular özetlenmeye çalışılmıştır.

Shen vd. (2009), BCC ve BCCZ mikro kafes yapılar ve bunların türevleri olan sandviç yapıların basma testlerini gerçekleştirmişlerdir. Onlar, bu yapıların mekanik özellikler açısından yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu belirlemişlerdir. Daha genel bir çalışmada, Tsopanos vd. (2010) tarafından paslanmaz çelik mikro kafes yapıların optimum üretim parametrelerini belirlemeye çalışılmıştır. Ayrıca mikro kafes blokların tek eksenli basma testlerini de gerçekleştirmişlerdir. Üretim parametreleri olarak lazer gücü ve lazer etki veya nüfus süresi dikkate alınmışlardır. Bu çalışmalarla 20 mm köşe uzunluklu kübik BCC kafes bloklar için, ölçülen izafi yoğunluk ile plato gerilmesi ve elastisite modülü arasında lineer bir ilişkinin olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca gerçekleştirilen çekme testleriyle paslanmaz çelik (316L) mikro tellerin elastisite modülünün 140 GPa olduğunu belirlemişlerdir.

Mckown vd. (2008) ve Smith vd. (2011) birbirine benzer çalışmalarda BCC ve BCCZ kafes yapıların statik ve patlama yükleri altındaki davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Onlar, patlama yükleri altındaki çökme mekanizmalarıyla statik çökme mekanizmalarının benzer olduğunu ve ayrıca kafes yapıların, akma gerilmesi açısından şekil değiştirme hızına belli bir derecede bağlılığının olduğunu belirlemişlerdir.

Teorik olarak mikro kafes yapıların elastisite modülü ve çökme gerilmelerini elde etmek için bir girişim Labeas ve Sunaric (2008) tarafından yapılmıştır. Onlar, kusursuz kolon ve kirişlerin burkulmasından yola çıkarak tahminler geliştirmeye çalışmışlardır. Ushijima vd. (2011) ise daha kapsamlı olarak BCC kafes yapıların teorik ve sayısal modellemeleriyle ilgilenmişler. Elde ettikleri teorik ve sayısal modeller, büyük hücreli yani izafi yoğunluğu düşük kafes yapılar için deneysel sonuçlar açısından nispeten uyumlu iken yüksek izafi yoğunluklu yapılar için ciddi derecede farklar vermektedir. Bu farklar, mikro tellerin kusursuz modellenmesi ve mikro tellerin kesişim noktaları etkilerinin dikkate alınmamasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmalar, mikro kafeslerin teorik ve sayısal modellemelerinin daha gerçekçi sonuçlar vermeleri için üretim etkileri ve yapısal kusurların bir şekilde dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

1.8. Tezin Amacı ve Kapsamı

Konvansiyonel hücresel malzemelerin mekanik, termal ve akustik özellikleri gibi kullanım fonksiyonları, hücre duvarını oluşturan malzemenin mekanik özelliklerinin yanında izafi yoğunluğuna ve hücre topolojisine doğrudan bağlıdır. Bundan dolayı kullanım fonksiyonlarının iyileştirilmesi için hücre topolojisinin kontrol edilebilmesi önemlidir. Köpük malzemeler gibi pek çok hücresel malzeme üretim yönteminden dolayı stokastik hücre yapısına sahiptir ve bu malzemelerin kullanım fonksiyonlarının iyileştirilmesinde en büyük engel hücre topolojisi olmaktadır.

Hücresel malzemelerin kullanım fonksiyonlarının iyileştirilmesini amaçlayan ve buna bağlı olarak hücre topolojisini kontrol etmeye yönelik son yıllarda yeni yöntemler ve teknolojiler geliştirilmektedir. Bu bağlamda lazer teknolojisi iyi bir alternatif sunmaktadır. Literatürde son yıllarda gerçekleştirilen bazı çalışmalar, lazer ergitme yöntemiyle metalik mikro kafes malzemelerin yüksek kalitede üretilebileceğini ortaya koymaktadır. Son beş yıl içerisinde bu yöntemle üretilen mikro kafes malzemelerin mekanik davranışlarının anlaşılmasına ve davranışlarını etkileyen etkin parametrelerin belirlenmesine yönelik bazı deneysel ve sayısal testler yapılmasına rağmen, teorik ve sayısal modeller tatmin edici düzeyde yeterli olgunluğa henüz ulaşamamıştır. Mevcut literatürden yola çıkarak, bu malzemelerin mekanik davranışlarının anlaşılmasına yönelik daha fazla deneysel testlere ve modelleme çalışmalarına ihtiyaç duyulduğu söylenebilir. Bu sebeple, bu tez çalışmasında, lazer ergitme yöntemi ile üretilen çelik mikro kafes malzemelerin deneysel, teorik ve sayısal olarak mekanik davranışlarının kapsamlı bir şekilde incelenmesi yanında, mikro kafes yapılarda dalga yayılımının incelenmesi amaçlanmaktadır. Uygulanan çalışmalar temelde hacim merkezli kübik (Body Centered Cubic, BCC) hücre geometrisine odaklanmış olup BCCZ ve f_2 BCC hücre topolojileri de bazı bölümlerde dikkate alınmıştır.

Tezde yer alan deneysel incelemeler, statik ve dinamik çalışmalardan ibarettir. Statik testler, basma, kesme ve bileşik yükleme durumları için kübik bloklar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Statik davranışın hücre boyutuna ve topolojisine bağlılığının belirlenmesi için, testler farklı büyüklükte ve geometrideki bloklar üzerinde tekrarlanmıştır. Dinamik testler, kafes malzemenin dinamik davranışını incelemek için düşme test yöntemiyle çok yüksek olmayan darbe hızları için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneysel kısımda, kafes bloklarını oluşturan mikro tellerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi, mikro telin bireysel statik çekme testi vasıtasıyla elde edilmiştir. İlave olarak mikro tellerin

birim şekil değiştirme hızı bağıllığı, servo hidrolik çekme test cihazı ve Hopkinson çubuk testi vasıtasıyla incelenmiştir.

Teorik aşamada, BCC ve BCCZ kafes topolojileri için başlangıç elastisite modülü ve başlangıç çökme gerilmesini tahmin eden ampirik bağıntılar elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, mikro tellerin birbirine bağlı olduğu kesişim noktalarının etkileri hesaba katılmıştır. Başlangıç elastisite modülünün tahmini için Timoshenko kiriş modeli kullanılırken, başlangıç çökme gerilmesi için ise tam (ful) plastik çökme teorisinden yararlanılmıştır.

Son bölümde ise sonlu elemanlar yöntemi vasıtasıyla deneysel sonuçlarla uyumlu sayısal modeller geliştirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, geçerliliği sağlanan modellerle, mikro kafes yapılarda dalga yayılımı ve yapısal kusurların kafes yapıların mekanik davranışa etkisinin belirlenmesine yönelik bir dizi parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde yapılan çalışmalar deneysel, teorik ve sayısal olmak üzere üç bölüm halinde sunulacaktır.

2.1. Deneysel Çalışmalar

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar temelde iki bölüme ayrılmaktadır. Birinci bölümde, mikro kafes blokların statik ve dinamik mekanik testleri çeşitli yükleme durumlarında incelenmektedir. İkinci bölümde ise bireysel mikro tellerin gerilme-birim şekil değiştirme davranışları, birim şekil değiştirme hızını da içerecek şekilde incelenmeye çalışılmıştır.

2.1.1. Numune Üretimi

Mikro kafes malzemelerin ve mikro tellerin üretimi için Seçici Lazer Ergitme yönteminden (SLM) yararlanıldı. Seçici Lazer Ergitme yönteminin çalışma prensipleri Bölüm 1.4’de verilmiştir. Bu çalışmada, ticari bir Seçici Lazer Ergitme cihazı olan MCP Realizer II (SLM250) kullanıldı. Maksimum lazer gücü 200 W ve maksimum numune ölçüleri 250x250x240 mm³’dür. Tarama sistemi (scanner), çift eksenli ayna ayarlama düzeneği ve 300 mm odak uzunluklu lense sahip Galvanometre odaklama optiklerinden oluşmaktadır. Şekil 2.1’de SLM250’ye ait bir fotoğraf görülmektedir.

Numuneler % 0.2’den düşük oksijen seviyesinde paslanmaz çelik 316L mikro tozları kullanılarak üretildi. 316L paslanmaz çeliğinin bileşenleri Tablo 2.1’de verilmektedir. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere küresel parçacıklardan oluşan metal tozları 20-50 µm değerlerinde değişen büyüklüğe sahiptir.

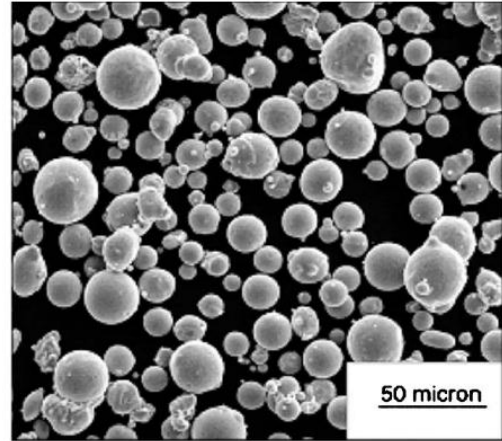
Tablo 2.1. 316L paslanmaz çeliğini oluşturan elementlerin yüzde oranları

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Fe	Mo
% miktarı	0.03	2.00	0.025	0.010	0.75	18	10.10	0.20	-	2.50



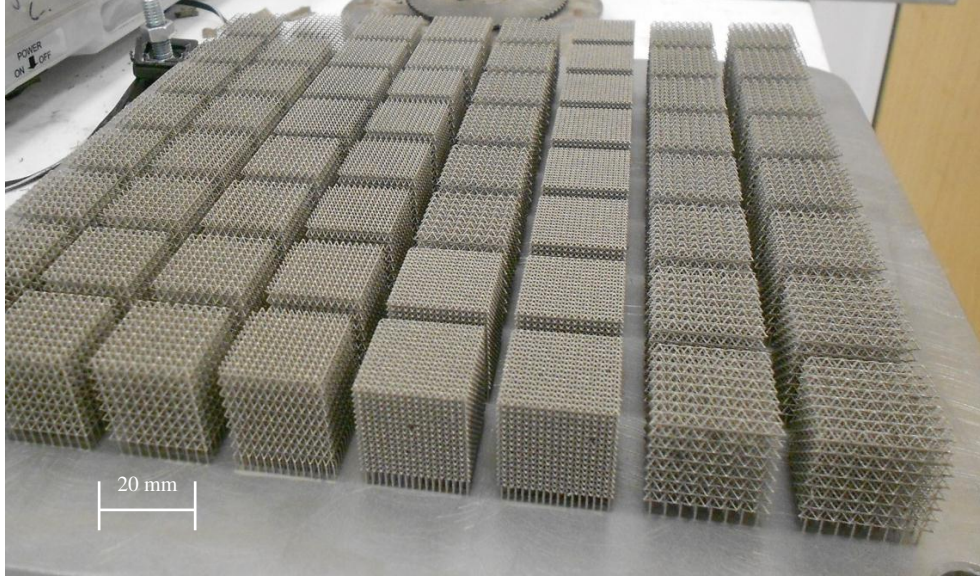
Şekil 2.1. SLM250 Seçici Lazer Ergitme Cihazına ait bir fotoğraf

Yüzde dağılımı (%)	Toz büyüklüğü (µm)
0.2	45
7.4	38-45
72.0	16-38
18.3	10-16
21.0	10



Şekil 2.2. Mikro metal tozların büyüklüklerine göre yüzde dağılımları

Şekil 2.3'te üretilen kafes yapıların bir seti gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere numuneler bir destek plakasının üzerinde inşa edilmektedir. Bu sebeple numunelerin zarar görmeden destek plakasından ayrılması için tel kesme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 2.3. Lazer ergitme yöntemi ile üretilen mikro kafes blokların bir seti

2.1.2. Kafes Blokların Statik Mekanik Davranışlarının İncelenmesi

Mikro kafes blokların mekanik davranışlarını karakterize etmek için basma, kesme, çekme ve iki eksenli yükleme testleri gibi bir dizi test gerçekleştirildi. Statik testler iki tip sınır koşullarında gerçekleştirildi. Birincisinde, numune direk olarak (serbest yüzeyli) basma testine tabi tutuldu. Yani numunenin yüzeyleri serbesttir. İkincisinde ise, numunenin alt ve üst yüzeylerine birer plaka yapıştırıldı. Bu sebeple bu numunelere, sınır tabaka etkilerini içeren sınırlandırılmış bloklar adı verilmektedir. Basma testlerinin bir kısmı da dahil olmak üzere, kesme, çekme ve iki eksenli yükleme testleri bu şekilde oluşturulan numunelerle gerçekleştirildi. Şekil 2.4’de serbest yüzeyli ve sınırlandırılmış numunelere ait birer örnek verilmiştir.

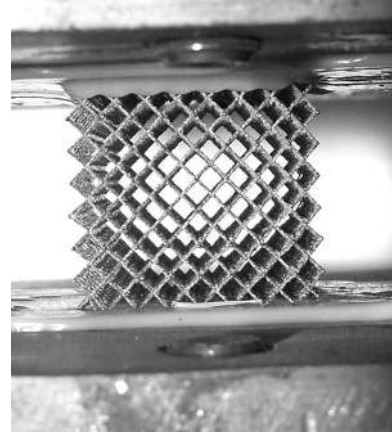
2.1.2.1. Serbest Yüzeyli Blokların Deneysel Testleri

Serbest yüzeyli blokların basma testleri Instron konvansiyonel test cihazı vasıtasıyla gerçekleştirildi. Test hızı, çökme başlayana kadar ki bölümde 0.25 mm/dakika olarak seçilirken, çökme başlangıcı sonrasında 0.5 mm/dakika olarak alınmıştır. 20 mm’lik bir blok yüksekliği için ortalama şekil değiştirme hızı 10^{-4} s^{-1} mertebesinde gerçekleşmektedir. Gerilmeler, ölçülen kuvvet değişiminin numune kesit alanına bölünmesiyle elde edilirken,

birim şekil değıştirme değeri, numunedeki eksenel yer değıştirme miktarının numune yüksekliğine bölünmesiyle elde edilmiştir.



(a)

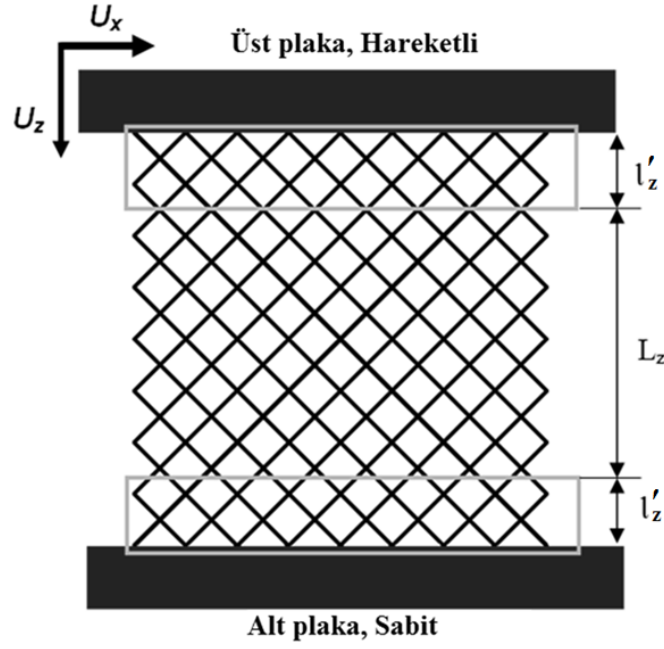


(b)

Şekil 2.4. Uygulanan testlere örnekler; a) Serbest yüzeyli numune, b) Sınırlandırılmış yüzeyli numuneler

2.1.2.2. Sınırlandırılmış Blokların Deneysel Testleri

Şekil 2.5’te şematik olarak sınırlandırılmış bir numuneye ait gösterim mevcuttur. Görüldüğü üzere numunenin alt ve üst yüzeylerine plakalar monte edilmiştir. Monte işlemi, “ l_z ” kadar mesafede hem alt hem de üst yüzeylerin yapıştırıcı ile doldurulmasıyla sağlanmıştır. Yapıştırma işlemi ise güçlü bir yapıştırıcı olan Araldite 420A/B kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapıştırma işleminden sonra yapıştırıcının sertleşmesi için, fırında 140 °C’de yaklaşık bir saat bekletilmiştir. Daha sonra numuneler, oda sıcaklığında 15 saate kadar tutulduktan sonra testler gerçekleştirilmiştir. Bu koşullar altında yapıştırıcının mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan basma testlerinde 1 GPa elastisite modülü ve 30 MPa akma mukavemeti belirlenmiştir.



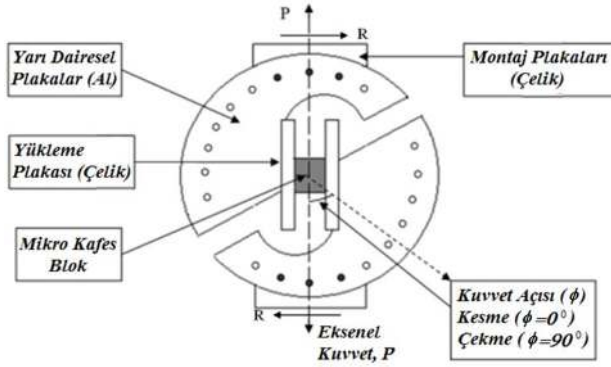
Şekil 2.5. Sınırlandırılmış numunenin şematik gösterimi

Sınırlandırılmış blokların mekanik testleri Şekil 2.6’da gösterilen Arcan test aparatları vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. İki yarı dairesel plakadan oluşan Arcan test aparatı, plakaların üzerinde bulunan delikler sayesinde, plakalar döndürülerek kesme, basma ve bileşik yükleme testlerinde kullanılabilir. Şekil 2.6 kuvvet açısının 0^0 olduğu durum saf kesme pozisyonunu göstermektedir. Arcan test aparatının kullanımı ile ilgili iki konfigürasyon mevcuttur (Mohr ve Doyoyo, 2002). Bunlar tek pimli ve kenetlenmiş (Clamped) konfigürasyonlardır. Tek pimlide yarı dairesel plakalar montaj plakalarına göre dönüş yapabilmektedir. Bunun sonucu olarak yatay reaksiyon kuvveti ortadan kalkmaktadır. Kenetlenmiş konfigürasyonda, yarı dairesel plakalar montaj plakalarına sabitlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan Arcan test aparatı kenetlenmiş tip Arcan konfigürasyonuna uymaktadır. Bu durumda, Şekil 2.6’da görüldüğü üzere, montaj plakalarında yükleme durumunda iki kuvvet ortaya çıkmaktadır. Bu kuvvetler altında iki eksenli yükleme durumunda numunede oluşan normal ve kesme gerilmeleri sırasıyla aşağıdaki bağıntılar vasıtasıyla hesaplanabilir.

$$\sigma = \frac{P}{L_x L_y} \sin \phi - \frac{R}{L_x L_y} \cos \phi \quad (2.1)$$

$$\tau = \frac{P}{L_x L_y} \cos \phi + \frac{R}{L_x L_y} \sin \phi \quad (2.2)$$

Burada L_x ve L_y sırasıyla numunenin kesit uzunluklarıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan deney sistemi yatay reaksiyon kuvvetinin ölçümüne izin vermediği için $R=0$ olarak alınmış ve hesaplarda yalnızca dikey P kuvveti dikkate alınmıştır. Bu doğal olarak hesaplanan gerilmelerde belli bir derecede hataya yol açacaktır. Yatay reaksiyon kuvvetinin önemi Bölüm 3'te sonlu elemanlar yöntemiyle irdelenecektir.



(a)

(b)

Şekil 2.6. Arcan test aparatları; a) Şematik gösterim ve etkiyen kuvvetler, b) Test cihazının görünümü

Kuvvet değişimi ve yarı dairesel plakaların birbirine göre izafi hareketi, sırasıyla bir yük hücresi ve ekstensometre kullanılarak ölçülmüştür. Normal ve açısal birim şekil değiştirme, ekstensometreden ölçülen izafi yer değişimler açısından aşağıdaki bağıntılarla belirlenmiştir.

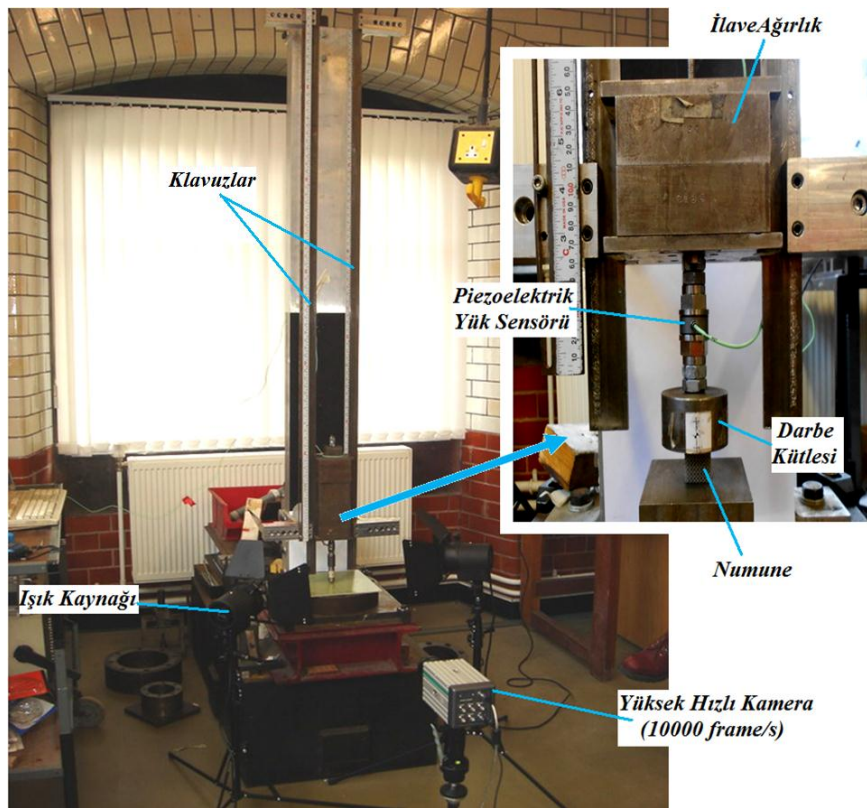
$$\varepsilon = \frac{U}{L_z} \cos \phi \quad \text{ve} \quad \gamma = \frac{U}{L_z} \sin \phi \quad (2.3)$$

Burada, U yarı dairesel plakaların birbirine göre toplam izafi yer değişimini göstermektedir.

2.1.3. Kafes Blokların Dinamik Mekanik Davranışlarının İncelenmesi

Mikro kafes yapıların dinamik basma davranışı düşme test cihazı vasıtasıyla incelenmiştir. Bu test cihazında çarpma kütlesi belli bir yükseklikten serbest

bırakılmaktadır. Şekil 2.7’de düşme deney cihazına ait aparatlar görülmektedir. Düşen kütle piezoelektrik mantıkla çalışan bir yük sensörü resimdeki gibi yerleştirilmiştir. Bu sensör vasıtasıyla darbe yükü zamana göre ölçülmektedir. Yer değişim ise yüksek hızlı kamera ile ölçülmektedir (saniyede 10000 resim kapasiteli). Kameranın kaydettiği video Proanalysis adlı bir program vasıtasıyla analiz edilerek düşen kütlenin zamanla hareket ve hız değişimi elde edilmektedir. Deney esnasında piezoelektrik yük sensorunun ürettiği voltaj bir amplifikatör sayesinde yükseltilmektedir. Oluşan voltaj değişimi Windows tabanlı, 45 MHz veri kaydetme hızına sahip bir osiloskop vasıtasıyla kaydedilmiştir.



Şekil 2.7. Düşme testi cihazı ve aparatları

2.1.4. Lazer Ergitme Yöntemiyle Üretilen Mikro Tellerin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Davranışlarının Belirlenmesi

Lazer ergitme yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çelik mikro tellerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini belirlemeye yönelik ilk çalışma, Tsopanos vd. (2010) tarafından gerçekleştirildi. Fakat deneysel ekipmanların yetersizliği sebebiyle, testlerden hem elastisite modülü (50 GPa gibi) hem de akma gerilmesi için oldukça düşük sonuçlar elde

edilmiştir. Bunun sonucunda sonlu elemanlar modelleri kullanılarak, deneme yanılma yöntemi ile elastisite modülü için 140 GPa değerini belirlemişlerdir.

Bu çalışmada, hem elastisite modülü için belirlenen değerin ne derece gerçeği gösterdiğinin belli olmaması hem de akma gerilmesi için uygun bir değerin belirlenmemesi dolayısıyla, mikro kafes tellere ait daha güvenilir gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesine yönelik yeni bir deneysel yöntem geliştirilmiştir. Ayrıca mikro tellerin birim şekil değiştirme hızı bağımlılığının ve Cowper-Symond birim şekil değiştirme hızı parametrelerinin belirlenmesine yönelik dinamik çekme testleri ve Hopkinson çekme çubuğu testleri gerçekleştirilmiştir.

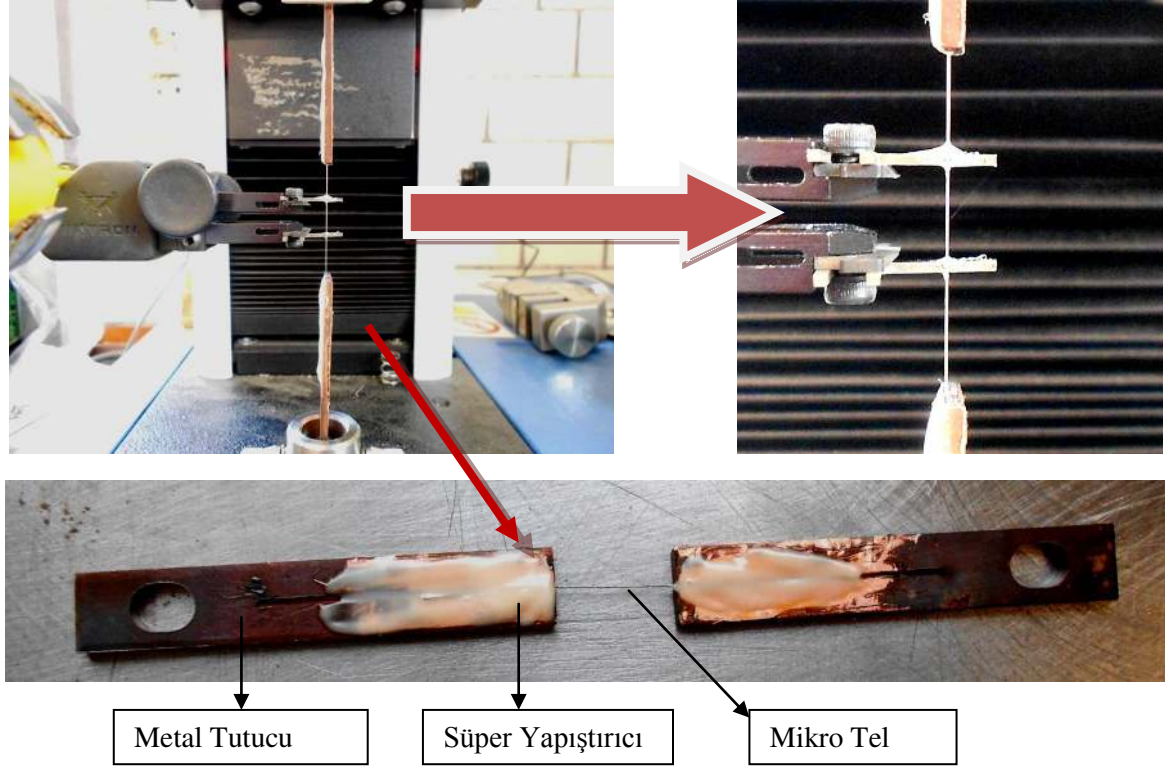
2.1.4.1. Statik Çekme Davranışının İncelenmesi

Mikro tellerin gerilme- birim şekil değiştirme eğrisinin belirlenmesi için Şekil 2.8’de gösterildiği gibi iki tane metalik tutucu tasarımı yapıldı. Bu bakır tutucuların yüzeylerinin ortasında, 1mm derinliğinde ve genişliğinde kanallar bulunmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi mikro kalınlıklı tel bu kanallara yerleştirildi ve kanallar Araldite 2015 adında süper yapıştırıcı ile dolduruldu. Yapıştırıcının maksimum sertleşmeyi alması için numune, 140⁰C’lik fırında bir saat kadar bekletildi. Hazırlanan numune Instron 3342 Mikro test cihazının tutucularına şekilde görüldüğü gibi pimler vasıtasıyla dikey olarak monte edildi. Birim şekil değiştirme değerleri Instron Clip Gauge ölçüm cihazıyla (model 2630-120 ve ölçüm aralığı 8 mm) hesaplandı. Instron Clip Gauge cihazının kolları şekildeki gibi Rapid Araldite marka yapıştırıcı ile herhangi bir ön yükleme olmaksızın numunelere tutturuldu. Yapıştırıcının yeterli mukavemete ulaşması için 15 saatlik bir bekleme süresi öngörüldü. Böylelikle testler esnasında Clip Gauge kollarında herhangi bir kayma önlenmiş oldu. Çekme hızı 0.1 mm/dakika olarak gerçekleştirildi. Bu çekme hızıyla 10⁻⁵ mertebesinde birim şekil değiştirme hızı elde edilmektedir.

2.1.4.2. Birim Şekil Değiştirme Hızına Bağlılığının İncelenmesi

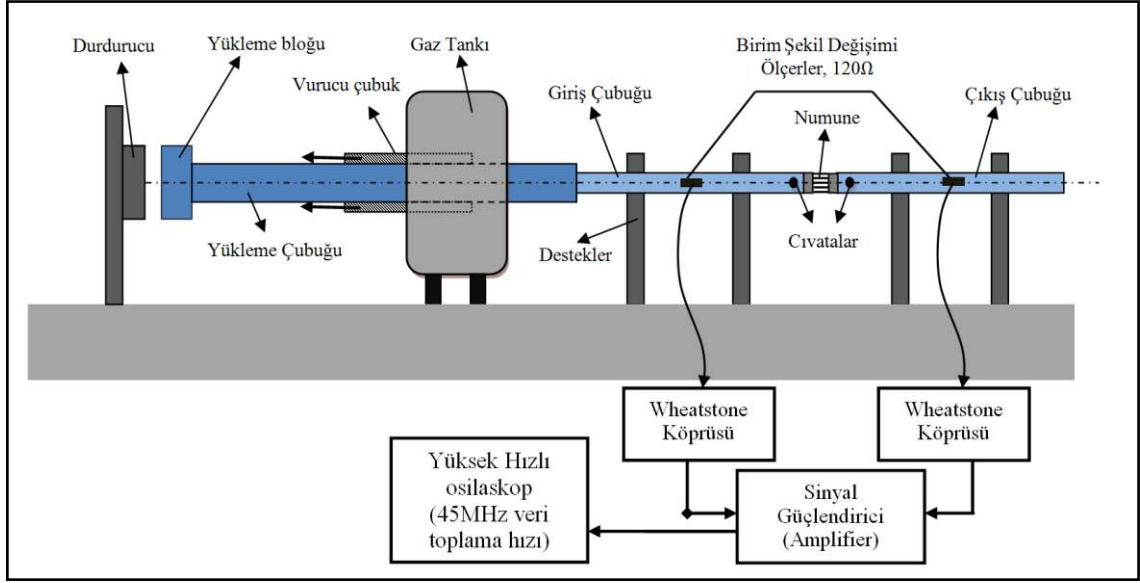
80 s⁻¹ birim şekil değiştirme hızlarına kadar dinamik testler E3000 servo kontrollü çekme test cihazında gerçekleştirildi. Birim şekil değiştirme hızı, yükleme hızının numune ölçüm boyuna bölünmesiyle elde edildi. Şekil 2.8’de gösterilen numuneler dinamik

testlerde de kullanıldı. Metal tutucular basınç kontrollü E3000 cihazının metalik ağızlarına yerleştirildi. Dinamik testlerde birim şekil değiştirme direk olarak metalik tutma çenelerinin hareketinden hesaplandı.

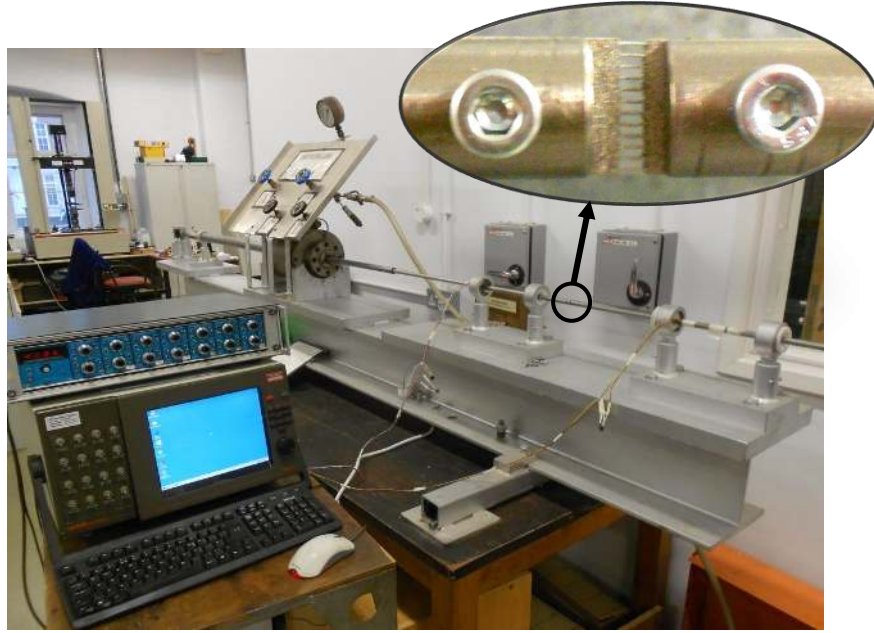


Şekil 2.8. Mikro tellerin çekme davranışının belirlenmesi için hazırlanan numune ve test cihazının resimleri

Mikro tellerin yüksek birim şekil değiştirme hızlarındaki davranışlarının belirlenmesi için Hopkinson çekme çubuk testi kullanılmıştır. Bölüm 1.6'da Hopkinson test ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Şekil 2.9, kullanılan Hopkinson çekme çubuk testi cihazının şematik ve gerçek resmini göstermektedir. Bu cihazda giriş ve çıkış çubukları titanyum alaşımından yapılmıştır. Bu çubukların uzunlukları 680 mm ve çubukların ortalarına 120 Ω 'luk birim şekil değiştirme ölçerler yapıştırılmıştır. Birim şekil değiştirme ölçerler ve 120 Ω 'luk dirençler, çubuklardaki eğilme gerilmelerini yok edilmesi için yarı Wheatstone köprüsü oluşturacak şekilde bağlandılar. Numuneler cıvatalar vasıtasıyla çubuklara bağlandı. Ayrıca Wheatstone köprüsünden çıkan sinyal, amplifikatör vasıtasıyla güçlendirildi. En son olarak Windows 95 işletim sistemli yüksek hızlı osiloskop vasıtasıyla sinyaller görüntülendi ve veri kaydı gerçekleştirildi.



(a)

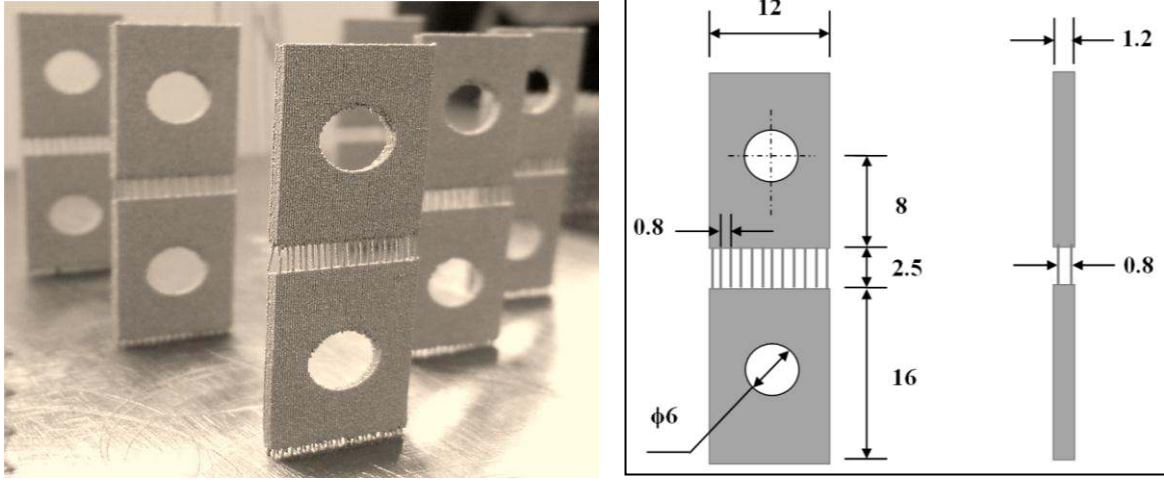


(b)

Şekil 2.9. Yüksek hızlı çekme test cihazı; a) Hopkinson çekme deney düzeneğinin şematik gösterimi, b) Deney düzeneği

Yalnızca bir tane mikro tel kullanılması durumunda, çubuk ve numune arasında önemli empedans farkı meydana gelmektedir. Bu durumda iletilen dalganın genliği çok düşük olmaktadır. İletilen dalganın genliğinin artırılmasına yönelik olarak Şekil 2.10'da görülen numune tasarımı gerçekleştirildi. Bu tasarımda aynı anda 24 adet mikro tel kullanıldı. Birden fazla telin kullanılmasından dolayı elde edilen sonuçlar ortalama

davranışı göstereceği aşıkardır. Görüldüğü üzere mikro teller, yine Seçici Lazer Ergitme yöntemiyle aynı süreçte üretilen iki metalik katı tutucu arasındadır. Ayrıca numunelerin çubuklara montajının sağlanması için katı parçaların ortalarında delikler tasarlandı. Katı parçaların kalınlığı 1.2 mm ve genişliği 12 mm'dir. Üretilen mikro teller için lazer parametreleri ise 90 W lazer gücü ve 1000 μ s nüfus etme süresidir (exposure time).



(a)

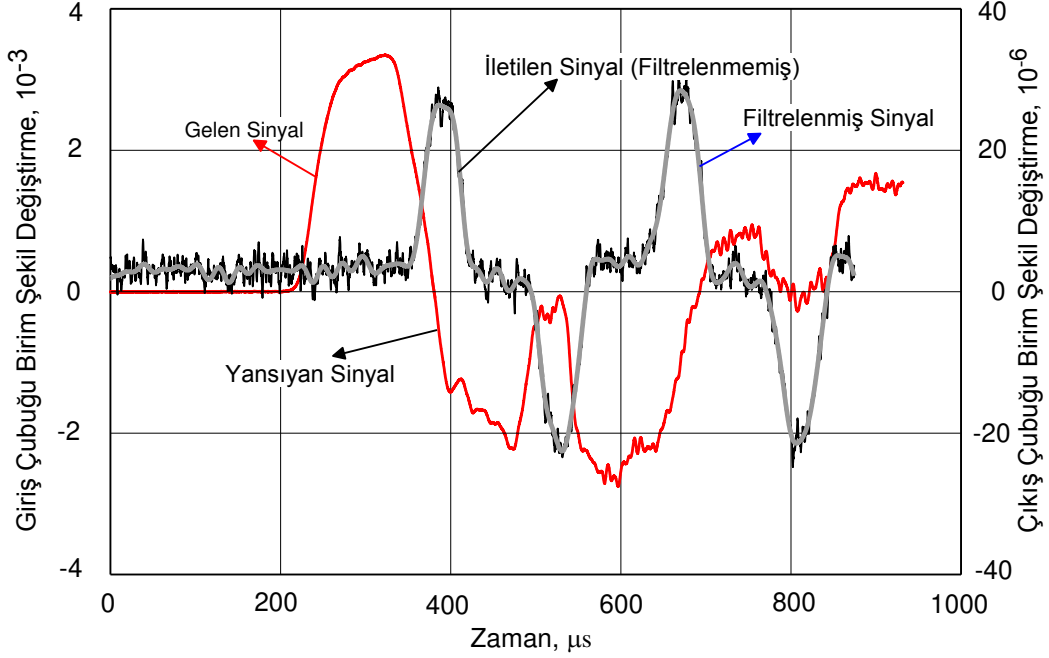
(b)

Şekil 2.10. Hopkinson çubuk testi numuneleri; a) Üretilen numunelerin resmi, b) Numunelerin ölçüleri (mm)

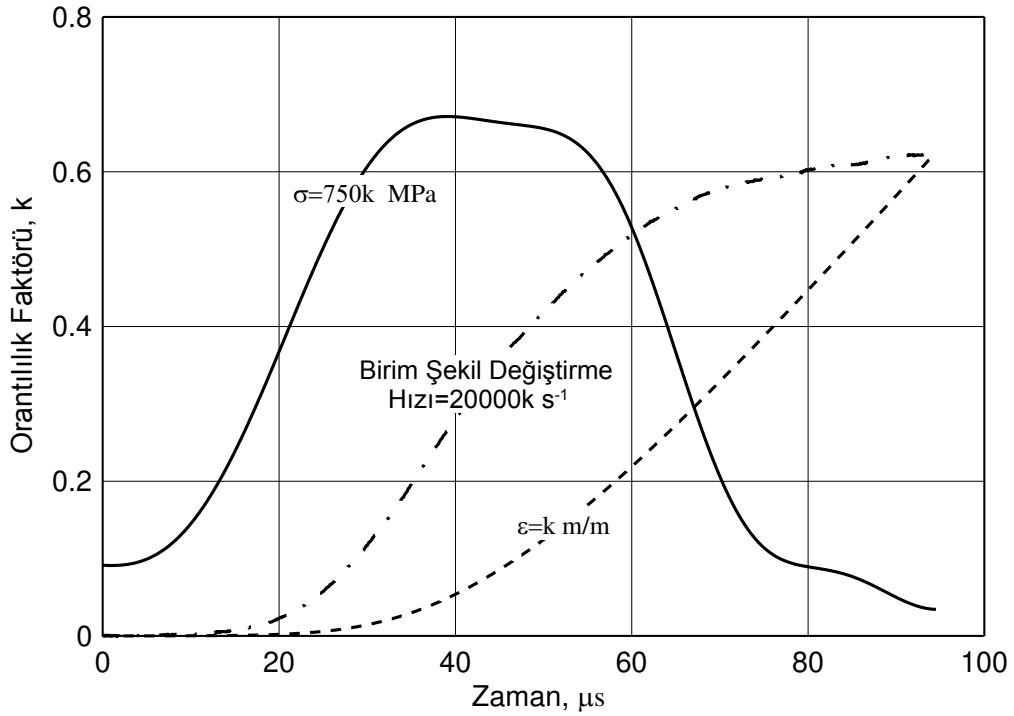
Şekil 2.11'de örnek bir test sonucu görülmektedir. Görüldüğü üzere iletilen sinyalin genliğinin nispeten düşük olması sebebiyle, aşırı gürültü ihtiva etmektedir. İletilen sinyalin genliğinin düşük olmasının sebebi Hopkinson çubukları ve numuneler arasındaki çok büyük empedans farkının olmasıdır. İletilen sinyaldeki aşırı gürültü nedeniyle filtreleme uygulandı. Şekilde filtrelenmiş eğri de aynı anda verilmektedir. Çalışma boyunca filtrelenmiş eğriler kullanılacaktır.

Şekil 2.11'de verilen sinyaller için (1.1), (1.2) ve (1.3) eşitlikleri kullanılarak elde edilen gerilme, birim şekil değiştirme ve birim şekil değiştirme hızı değişimini gösteren eğriler Şekil 2.12'de verilmiştir. Bu eğriler aynı grafikte gösterilebilmesi için bir orantılılık faktörü ile bölünmüştür. Görüldüğü üzere birim şekil değiştirme hızı 20 ile 40 μ s arasında çok aşırı değişim göstermektedir. Bundan dolayı birim şekil değiştirme hızını belirlemek için ortalama birim şekil değiştirme hızı kullanılmıştır. Bunun için birim şekil değiştirme eğrisinin ortalaması alınmıştır. Şekil 2.12'deki test için birim şekil değiştirme hızı 6610 s^{-1}

bulunur. Bu değer birim şekil değiştirmenin zamana bölünmesi ile elde edilen 6666 s^{-1} değerine oldukça yakındır.



Şekil 2.11. Hopkinson çekme testinde giren, yansıyan ve iletilen birim şekil değiştirme sinyallerini gösteren bir test sonucu



Şekil 2.12. Örnek test için gerilme, birim şekil değiştirme ve birim şekil değiştirme hızının zamana göre değişimi

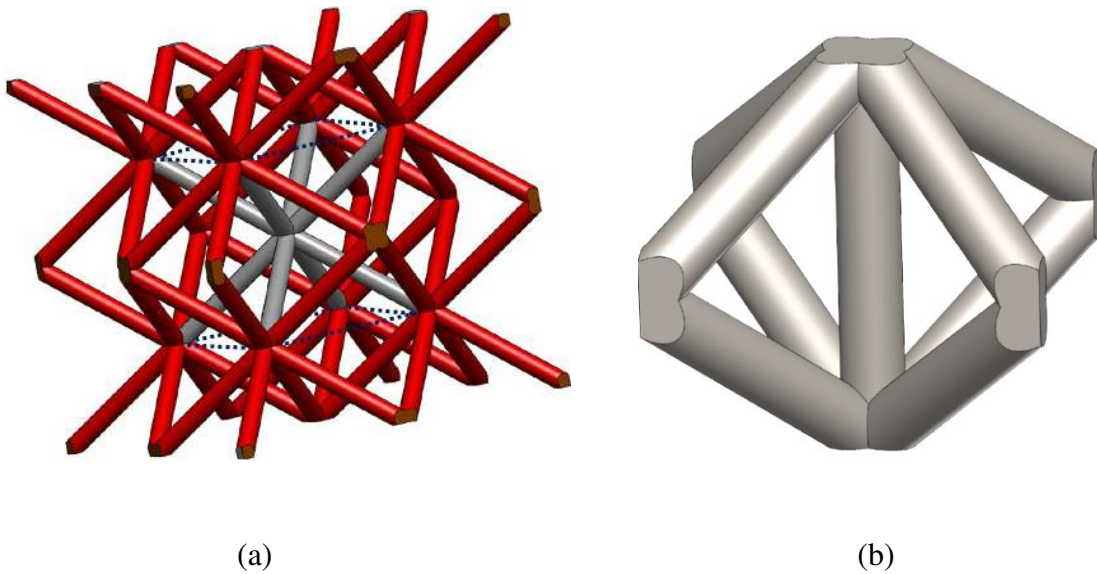
Dinamik malzeme modelini oluşturmak için,

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/q} \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilen Cowper-Symonds eşitliği kullanılacaktır. Bu eşitlikte σ_0 statik testlerde elde edilen akma ve maksimum çekme gerilmelerini ifade ediyorken, “D” ve “q” ise deneysel verilere eğri uydurma ile elde edilen sabitlerdir.

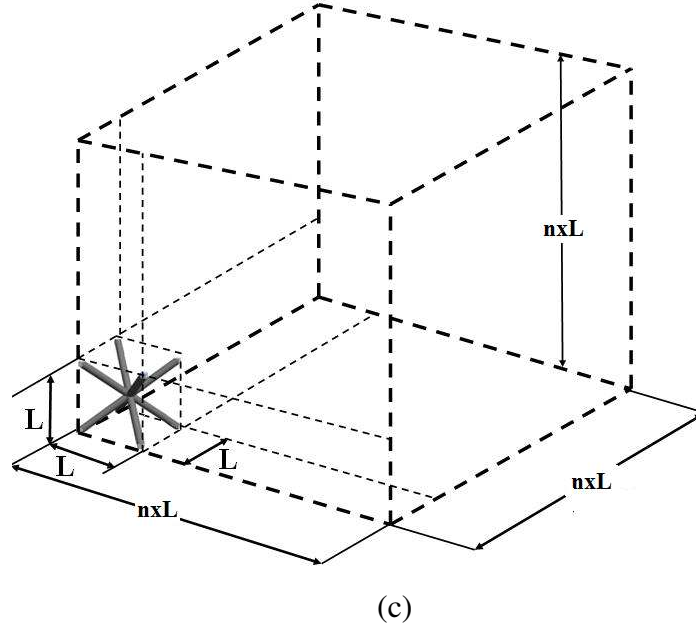
2.2. Teorik Çalışmalar

Bu bölümde, BCC ve BCCZ mikro kafes yapıları için başlangıç elastisite modülü ve başlangıç çökme mukavemeti veya gerilmesinin, tel çapının hücre boyutuna oranına (d/L, aspect ratio) göre değişimini veren teorik bağıntılar elde edilmektedir. Elde edilen modeller serbest yüzeyli numunelerin basma davranışlarından elde edilen sonuçları temsil etmektedir. Bunların yanında ideal (kusursuz) mikro kafes yapıların izafi yoğunluğunun, d/L oranına göre değişimini veren ifade katı modelleme programı yardımıyla belirlenecektir. şekil 2.13’de BCC ve BCCZ birim hücreleri ile bir kafes bloğun geometrik tanımı sunulmaktadır.



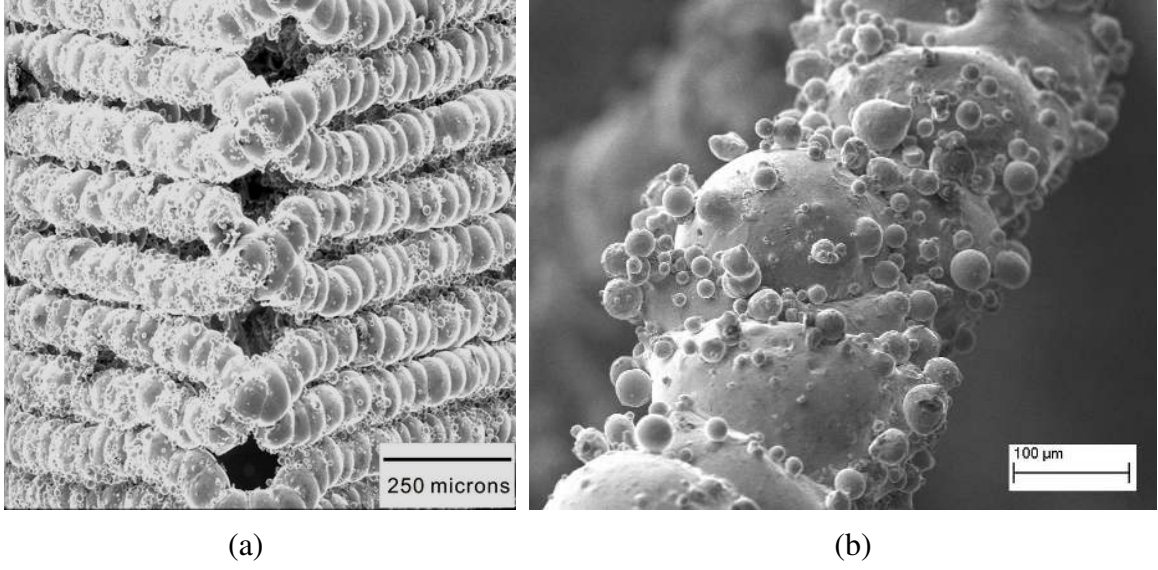
şekil 2.13. Mikro yapıların geometrik tanımları; a) BCC birim hücre, b) BCCZ birim hücre ve c) mikro kafes bloğun tanımları (n, kenar boyunca hücre sayısıdır)

Şekil 2.13'ün devamı,



2.2.1. BCC Kafes Yapısının Deneysel Çökme Davranışının Fiziksel Analizi

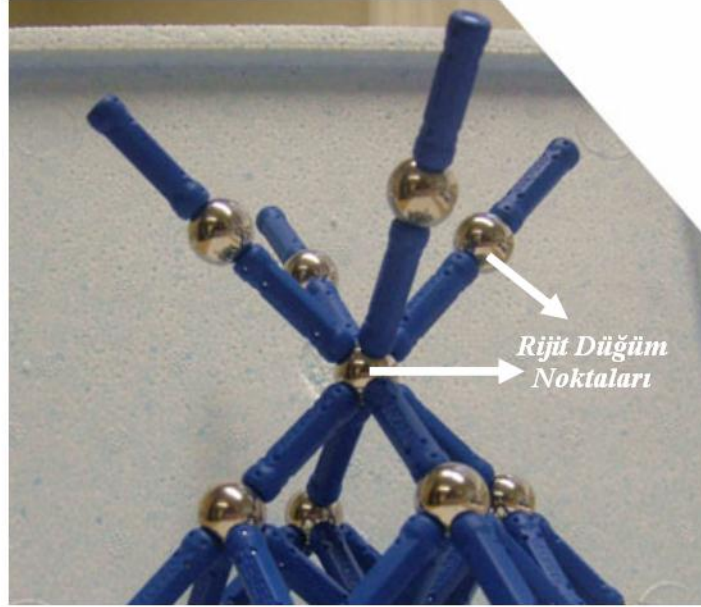
Teorik modellemeye geçilmeden önce mikro kafes yapıların deneysel çökme mekanizmalarının incelenmesi modelleme açısından daha iyi fikir vereceği düşünülmüştür. Şekil 2.14'de 2.5 mm hücre boyutuna sahip tamamıyla sıkıştırılmış bir mikro kafes yapı ve kafesi oluşturan mikro telin detaylı fotoğrafları görülmektedir. Fotoğraftan da görüldüğü üzere mikro teller, üretim yönteminin doğasından kaynaklanan çok ciddi oranda kusur içermekte ve bunun sonucunda yüzeylerinde aşırı pürüzler ve çentikler barındırmaktadır. Hatta yarı ergimiş veya ergimemiş pek çok mikro toz, mikro telin yüzeyinde bulunmaktadır (Şekil 2.14b). Tüm bu yapısal kusurların kafesin mekanik davranışını belli bir oranda etkileyeceği açıktır. Çökme davranışı açısından bakıldığında (Şekil 2.14a), eğilme mekanizmasının etkin olduğu görülmekte ve plastik çökme mekanizmasının açık şekilde mikro tellerin kesişim noktalarının veya kesişim bölgesinin çevresinde olduğu görülmektedir. Yani maksimum eğilme momentleri, mikro tellerin kesişim noktalarının merkezinden ziyade, çevresinde veya merkezden belli mesafede oluşmaktadır. Ayrıca görüldüğü üzere kesişim noktalarında herhangi bir deformasyon veya dönme hareketi oluşmamaktadır. Bu durum mikro tellerin eğilme deformasyon mekanizmasında kesişim noktalarında ankastre bağ koşullarının etkin olduğuna işarettir.



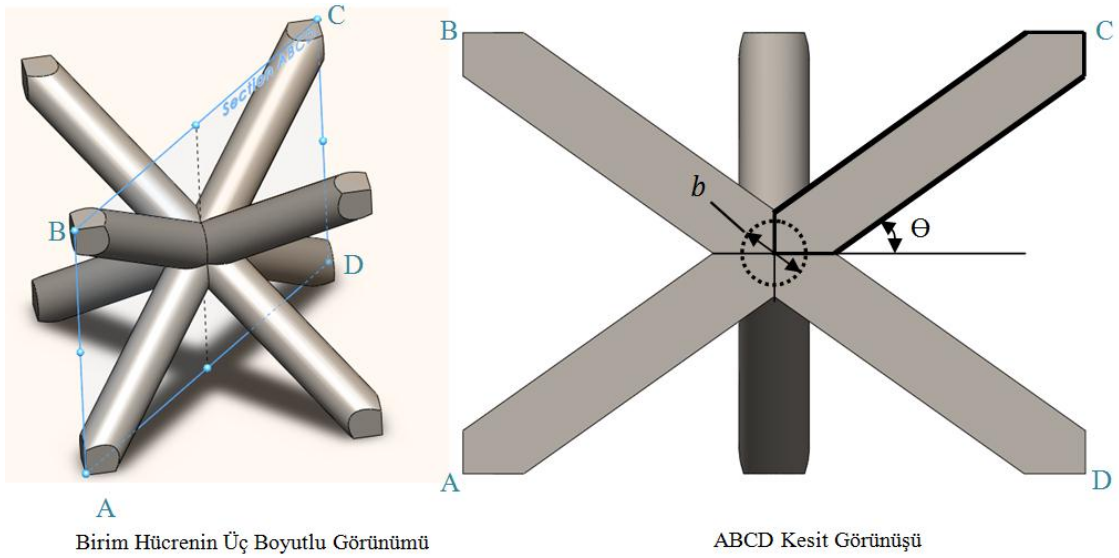
Şekil 2.14. Mikro yapıların detaylı fotoğrafları; a) Tam şekilde sıkıştırılmış mikro kafes yapı, b) Bireysel mikro tel

Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, kesişim noktalarının etkisinin teorik analizde dikkate alınmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Kesişim noktalarında mikro tellerin birbirleri ile kesişmesinin doğal sonucu olarak bir malzeme yığılması meydana gelmektedir. Buna mukabil, kesişim noktalarının mukavemetinin, mikro tellere göre daha yüksek olduğu deneysel deformasyon mekanizmasından ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple, kesişim noktalarının rijit modellenmesinin gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmesi açısından uygun olacağı düşünülmüştür. Sonuç olarak, buradaki matematiksel analiz, mikro kafes yapıların Şekil 15’de verilen şekle benzer olarak, rijit küresel kesişim noktaları ve bunları birbirine bağlayan mikro tellerden oluştuğu kabulü yapılarak geliştirilmiştir. Burada problem, rijit kürenin çapının ne olması gerektiğidir. Bu sebeple, BCC kafes bloğu veya birim hücrenin mekanik davranışının matematiksel analizinde, Şekil 2.16’da verilmiş olan bireysel mikro telin geometrik tanımı kullanılacaktır. Şekil bireysel ideal bir mikro telin kesit görüntüsünü ve etkiyen kuvvetlerle birlikte geometrik büyüklükleri göstermektedir. Şekilden de anlaşılabileceği üzere, ideal dairesel tellerin bağlantı noktalarında, telin alt ve üst yüzeylerinde (kesme düzleminde veya bloğun basma yükleme yönünde) diğer tellerle kesiştiği iki nokta bulunmaktadır. Bu noktaların düğüm noktasının merkezinden uzaklığı “a” ve “b” olmaktadır (Şekil 2.16b). Gerçekte kesişim noktasının tamamıyla rijit olmadığı dikkate alınır, eğilme momentinin etkidiği dik düzlemin merkezden mesafesi “x”, “a” ve “b” mesafelerinin arasında bir yerde olması gerektiği düşünülmüştür. Bu çalışmada, “x” mesafesi “a” ve “b” mesafesinin ortası, yani $(a+b)/2$

olarak alınacaktır. Bunun sonucu olarak aktif moment kolunun uzunluğu Şekil 2.16b’de görüldüğü üzere $\sqrt{3}L/2$ ’den " l "’ye düşmektedir. Bu efektif moment kolu olarak adlandırılacaktır.



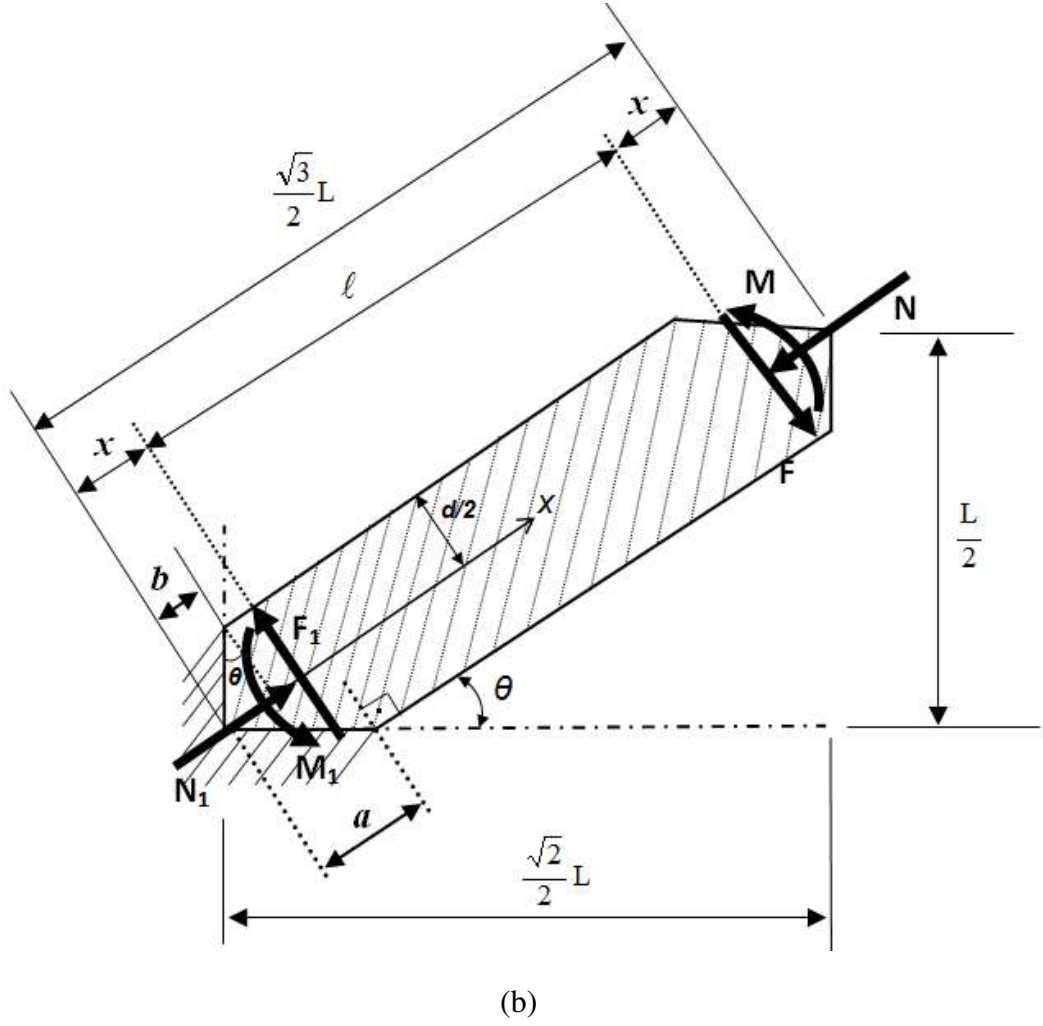
Şekil 2.15. BCC yapıda rijit düğüm noktaları ve mikro tellerin temsili gösterimi (Mines, 2008).



a)

Şekil 2.16. Geometrik tanımlar ve sınır şartları, a) Üç boyutlu birim hücre ve kesit görünüşü, b) İdeal bir mikro telin yükleme, sınır koşulları ve geometrik ölçüleri

Şekil 2.16'nın devamı,



Geometrik ilişkilerden “a”, “b” ve efektif moment kolu şu şekilde hesaplanabilir.

$$a = \frac{d}{2 \tan \theta} \quad (2.5)$$

$$b = \frac{d}{2} \tan \theta \quad (2.6)$$

$$\ell = \frac{\sqrt{3}}{2} L - 2x \Rightarrow \ell = \frac{\sqrt{3}}{2} L - d \quad (2.7)$$

Kesişim noktalarında dönme olmaması sebebiyle her bir tel ankastre bağlı bir kiriş gibi düşünülebilir. Tele etkiyen M , M_I , N , N_I ve F , F_I sırasıyla eğilme momenti, bası kuvveti ve kesme kuvvetleridir. Şekil 2.16'dan tel boyunca eğilme momenti,

$$M(x) = Fx - M_1 \quad (2.8)$$

şeklinde elde edilebilir. Burada, maksimum eğilme momenti kesişim noktalarına en yakın yerde oluşur ve değeri “ $M_1 = \frac{F\ell}{2}$ ” (kirişin uçlarında dönme yok) ile belirlenir. Ayrıca, statik denge ilişkilerinden, $N_I = N$ ve $F_I = F$ olduğu kolayca gözükmemektedir. M_I momenti (2.8) eşitliğinde yerine yazılırsa, final eşitlik,

$$M(x) = F\left(x - \frac{\ell}{2}\right) \quad (2.9)$$

şeklinde elde edilir. Tel açısı, $\Theta = 35.264^\circ$ olduğu geometrik ilişkilerden bulunmaktadır.

2.2.2. İzafi Yoğunluğun Belirlenmesi

a. BCC yapılar;

Şekil 2.14'den hatırlanacağı üzere mikro teller çok karmaşık şekle ve pürüzlü bir yüzeye sahiptir. Bundan dolayı, bir mikro tel için gerçek çapın tanımlanması imkânsızdır. Bu yüzden bu çalışmada mikro teller için teorik ortalama tel çapı kullanılacaktır. Teorik ortalama tel çapı, gerçek mikro kafes yapının kütlesi ve buna bağlı olarak izafi yoğunluk kavramından hesaplanmaktadır. Hesaplanan ortalama tel çapları, bu çalışma boyunca teorik ve sayısal çalışmalarda kullanılmıştır.

“ n^3 ” adet birim hücreden oluşan kübik bir mikro kafes yapının kapladığı toplam hacim “ $V_T = n^3 L^3$ ” ile hesaplanabilir. Kesişim noktalarındaki malzemenin üst üste yığılmasını da düşünerek, önceki bölümdeki analize benzer şekilde burada da kafes yapının

“ x' ” çapında kürelerden ve onları birbirine bağlayan “ $\ell' = \frac{\sqrt{3}}{2}L - 2x'$ ” uzunluğunda tellerden oluştuğu kabul edildi. Bu durumda mikro kafesin gerçek hacmi (boşluksuz),

$$V_{BCC} = \left(2\pi d^2 \ell' + \frac{4}{3} \pi (x')^3 \right) . n^3 \quad (2.10)$$

şeklinde elde edilir. BCC kafes topolojisine sahip bir sürekli yapının izafi yoğunluğu ($\rho^* / \rho_s = V_{BCC} / V_T$),

$$\rho_{BCC}^* / \rho_s = \frac{1}{L^3} \left(2\pi d^2 \ell' + \frac{4}{3} \pi (x')^3 \right) \quad (2.11)$$

şekilde yazılabilir. Burada, “ ρ_s ” ana (bulk) malzemenin, yani 316L paslanmaz çeliğin yoğunluğunu (yaklaşık 8000 kg/m³) temsil etmektedir. “ x' ” büyüklüğü üç boyutlu katı modelleme programları (CAD) vasıtasıyla belirlenmiştir. Kolayca anlaşılacağı üzere CAD modeller ideal ve kusursuz (kusur ve değişken kalınlık içermeyen) hacim ve kütle değerlerine sahiptir. Şekil 2.13’deki modele benzer şekilde CAD modeller oluşturuldu ve CAD programı vasıtasıyla katı modelin kapladığı gerçek hacim (boşluksuz) hesaplandı. “ x' ”nün yerine konulan deneme büyüklüklerle yapılan teorik hesaplar CAD sonuçlarıyla karşılaştırıldı. En yakın sonucu, “ $x' = b$ ” değerinin verdiği belirlenmiştir.

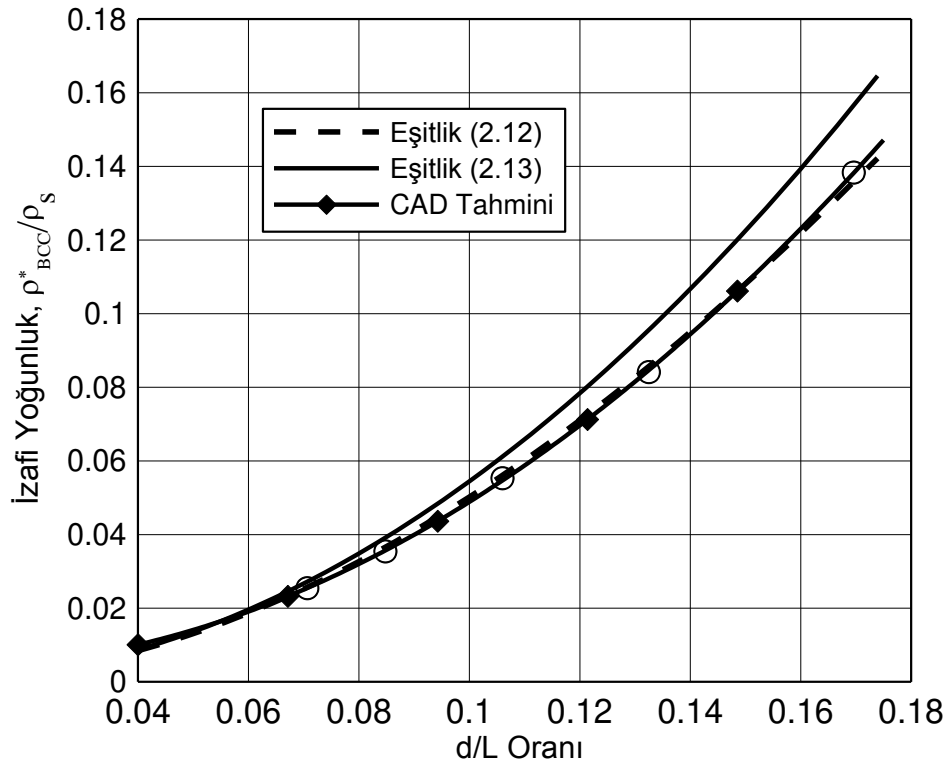
(2.6) eşitliği (2.11) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$\rho_{BCC}^* / \rho_s = \pi \left(\frac{d}{L} \right)^2 \left[\sqrt{3} - 2 \left(\frac{d}{L} \right) \tan \theta \left(1 - \frac{\tan^2 \theta}{12} \right) \right] \quad (2.12)$$

elde edilir. Bu eşitlikte parantezin içindeki ikinci terim ihmal edilirse, literatürde pek çok çalışmada da kullanılan (Tsopanos vd., 2010; Deshpande vd., 2001a), (2.12) eşitliğinin basit formu, aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$\rho_{BCC}^*/\rho_s = \sqrt{3}\pi \left(\frac{d}{L}\right)^2 \quad (2.13)$$

(2.13) eşitliği kesişim noktalarının etkisini içermemektedir. Elde edilen sonuçların CAD tahminleriyle karşılaştırıldığı eğriler Şekil 2.17’de verilmiştir. d/L oranının düşük değerleri için hem eşitlik (2.12) hem de (2.13) birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Kesişim etkilerini içeren (2.12) eşitliği yüksek d/L değerlerinde de hemen hemen CAD ile aynı sonucu vermektedir. Düğüm noktası etkilerini içermeyen (2.13) eşitliği ise örneğin $d/L=0.16$ değeri için yaklaşık % 15’lik fark göstermektedir. Bu fark, farklı malzemelerin birbirleriyle karşılaştırılmasında önemli bir parametre olan özgül mukavemet ve özgül rijitlik değerlerinde ciddi bir hata oluşturabilir.



Şekil 2.17. BCC kafes yapısı için izafi yoğunluk tahminlerin karşılaştırılması

b. BCCZ yapılar;

Yukarıda BCC kafes yapılar için geliştirilen yöntem kolayca BCCZ yapılara uygulanabilir. BCCZ yapılarda Şekil 2.13b’de görüldüğü üzere birim hücrede sekiz adet

eğik mikro tele ilave bir tane dikey tel bulunmaktadır. Gerçek hacim hesabında dikey tellerin hacmi de ilave edilmedir. Bu durumda BCCZ gerçek hacmini hesaplamak için Eşitlik (2.12)'ye ilave terim olarak " $\pi d^2 \ell_z / 4$ " terimi eklenir. Bu terimde " ℓ_z ", dikey mikro tellerin kesişim noktalarının hariç tutulduğu efektif boyu temsil etmektedir ve " $\ell_z = L - 2d$ " ile ifade edilebilir. Bunun sonucunda BCCZ kafes yapısı için gerçek hacim ifadesi,

$$V_{BCCZ} = \left(2\pi d^2 \ell' + \frac{4}{3} \pi (x')^3 + \frac{\pi d^2}{4} (L - d) \right) . n^3 \quad (2.14)$$

şeklinde elde edilir. BCC için yapılan hesaplara benzer şekilde, BCCZ kafes yapısı için izafi yoğunluk denklemi,

$$\rho_{BCCZ}^* / \rho_s = \pi \left(\frac{d}{L} \right)^2 \left[\left(\sqrt{3} + \frac{1}{4} \right) - 2 \left(\frac{d}{L} \right) \tan \theta \left(1 - \frac{\tan^2 \theta}{12} + \frac{1}{4 \tan \theta} \right) \right] \quad (2.15)$$

şeklinde elde edilir.

2.2.3. Mikro Kafes Yapıların Başlangıç Elastisite Modülünün Hesabı

a. BBC yapılar;

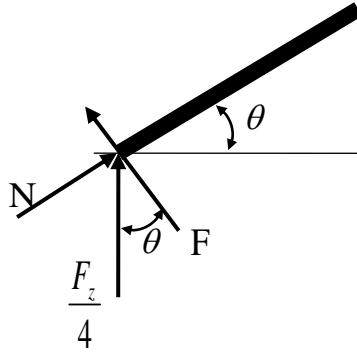
Yukarıdaki analizlerden yararlanarak mikro kafes yapıların başlangıç elastisite modülünü veren bağıntılar elde edilmiştir. Şekil 2.18'de eğik bir mikro telin yükleme durumu ve sınır şartları verilmiştir. Telin bir ucuna ankastre sınır şartları uygulanmış iken diğer ucuna dönme sınır şartı uygulanmaktadır. Ushijima vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada eksenel kuvvetin BCC (kübik) yapıların mekanik davranışlarına ve mikro telin kesitine etkiyen normal gerilmelere önemli bir katkısının bulunmadığını tespit etmişlerdir. Bu sebeple, buradaki teorik çalışmalarda yalnızca eğilme momentinin etkisi dikkate alınacaktır ve eksenel kısalma ihmal edilecektir. Ayrıca, tüm kafes yapının üniform deformasyona maruz kaldığı, yani yapıdaki tüm mikro tellerin aynı miktarda eğilme

$$\varepsilon = \frac{\sigma_z}{E^*} = \frac{F_z}{A^* E^*} \quad (2.18)$$

Burada, “A^{*}” birim hücrenin yüzey alanı olup L² değerine eşittir. Ayrıca, “E^{*}” kafes bloğun başlangıç elastisite modülünü göstermektedir. Şekil 2.19’de telin ucuna etkiyen kuvvet bileşenleri verilmiştir. Buradan kesme kuvveti, hücreye etkiyen dikey basma kuvveti açısından,

$$F = \frac{F_z}{4} \cos \theta \quad (2.19)$$

ile ifade edilebilir.



Şekil 2.19. Telin ucuna etkiyen kuvvet bileşenleri

(2.19) ve (2.18) eşitlikleri, eşitlik (2.17)’de yerine yazılırsa;

$$\varepsilon = \frac{4F}{L^2 E^* \cos \theta} \quad (2.20)$$

ifadesi elde edilir. (2.16), (2.17) ve (2.20) eşitlikleri kullanılarak, telin serbest ucundaki deplasman,

$$\omega = \frac{2F}{LE^* \cos^2 \theta} \quad (2.21)$$

şeklinde elde edilir. Serbest ucun deplasman değeri, Timoshenko kiriş model vasıtasıyla da başka bir formda bulunabilir. Timoshenko kiriş modelinde, moment,

$$M = EI \frac{d\psi}{dx} \quad (2.22)$$

ile ifade edilir. Burada, “ ψ ” tel kesitinin dönmesini göstermektedir. “I” ve “E” ise sırasıyla kesit atalet momentini ve telin elastisite modülünü göstermektedir. Eşitlik (2.9)’den yararlanılarak ve “ $\psi(x=\ell)=0$ ” sınır şartı altında, (2.22) denklemi çözülürse;

$$\psi = \frac{F}{EI} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{\ell}{2} x \right) \quad (2.23)$$

ifadesi elde edilir. Kirişin tarafsız ekseninin eğimi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{d\omega}{dx} - \psi(x) = -\frac{F}{k^2 GA} \quad (2.24)$$

Burada, “ k^2 ” şekil faktörüdür ve dairesel kesitli kirişler için 1/1.1 değeri ile ifade edilir (Timoshenko ve Gere, 1961). “G” ve “A” sırasıyla kirişin kayma modülü ve kesit alanını göstermektedir. Eşitlik (2.23) denklem (2.24)’de yerine yazılırsa,

$$\frac{d\omega}{dx} = -\frac{F}{k^2 GA} + \frac{F}{EI} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{\ell}{2} x \right) \quad (2.25)$$

şeklinde kiriş deplasmanını veren birinci derece diferansiyel denklem elde edilir. Sabit uçta yer değişiminin sıfır olması sınır koşulu “ $\omega(x=\ell)=0$ ” yardımıyla, denklem (2.25) çözülürse,

$$\omega(x) = -\frac{Fx}{k^2 GA} + \frac{F}{EI} \left(\frac{x^3}{6} - \frac{\ell x^2}{4} \right) + \frac{F\ell}{k^2 GA} + \frac{F\ell^3}{12EI} \quad (2.26)$$

şeklinde deplasmanı veren eşitliğin son hali elde edilir. Eşitlik (2.26)'de “x=0” konularak, telin serbest ucundaki maksimum deplasman değeri hesaplanabilir.

$$\omega = \omega(x=0) = \frac{F\ell}{k^2GA} + \frac{F\ell^3}{12EI} \quad (2.27)$$

(2.21) ve (2.27) eşitlikleri birbirlerine eşitlenirse, kapalı formda kafes bloğun başlangıç elastisite modülünü veren eşitlik,

$$E^* = \frac{2}{L \cos^2 \theta \left[\frac{\ell}{k^2GA} + \frac{\ell^3}{12EI} \right]} \quad (2.28)$$

şeklinde elde edilmiş olur. (2.28) eşitliğinin açık formu, eşitlik (2.7) yardımıyla,

$$E^* = \frac{\pi \left(\frac{d}{L} \right)^2}{2 \cos^2 \theta \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{d}{L} \right) \left[\frac{1}{k^2G} + \frac{4}{3E} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{L}{d} \right) - 1 \right)^2 \right]} \quad (2.29)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece elde edilen (2.29) eşitliği, kesişim noktaları ve kesme etkilerini de dikkate alarak BCC kafes yapının başlangıç elastisite modülünü hesaplayan karmaşık bir denklemdir. Eşitliği basitleştirmek için kesme terimi ihmal edilirse ($\cos \theta \equiv \sqrt{6}/3$), (2.29) eşitliği,

$$E^* = \frac{\frac{9}{16} \pi \left(\frac{d}{L} \right)^4 E}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{d}{L} \right)^3} \quad (2.30)$$

ifadesine indirgenmiş olur. Son eşitlik (2.29) eşitliğine göre oldukça basit bir form almıştır. Karşılaştırma amacıyla Ushijima vd. (2010) tarafından elde edilen “E*” eşitliğinin burada verilmesinde fayda olduğu düşünülmektedir.

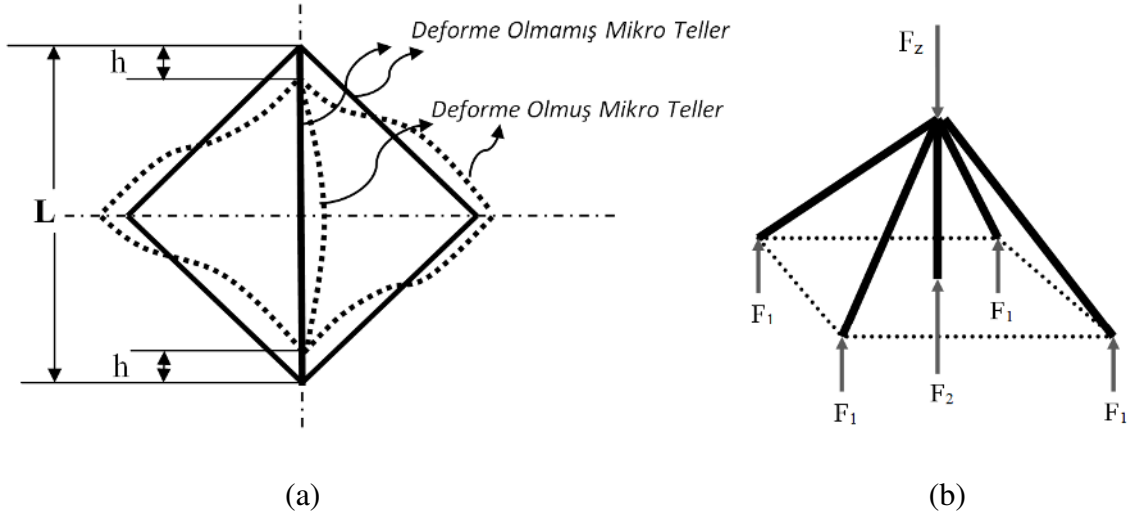
$$E^* = \frac{\sqrt{3}\pi\left(\frac{d}{L}\right)^2 E}{1 + 2\left(\frac{d}{L}\right)^2} \quad (2.31)$$

Ushijima vd. (2010) yaptıkları teorik çalışmada kesişim noktalarının etkisini ve kesme etkilerini ihmal etmişlerdir. Eğer kesişim noktalarının etkileri yukarıda yapılan analizlerden çıkarılırsa, elde edilen (2.30) eşitliği (2.31) eşitliğiyle aynı sonucu verecektir.

b. BCCZ yapılar;

Bu bölümde, BCCZ yapılar için Şekil 2.20’de verilen birim hücre ve deformasyon durumu dikkate alınarak teorik elastisite bağıntıları geliştirilecektir. Kolayca anlaşılabileceği üzere BCCZ yapılarda, bası yüklemesi altında dikey tel basmaya maruz kalırken, buna mukabil eğik teller eğilme ve basma yüklemelerine maruz kalır. Bası yükünden dolayı, dikey tellerde belli bir yük değerinden sonra burkulma olacağı aşikârdır. Elastisite modülünü belirleyebilmek için, dikey tellerin burkulmadan önceki stabilitesi dikkate alınacaktır. Bu analizde de daha önce BCC yapılar için yapılanlara benzer bazı kabuller yapmak hem kolaylık sağlayacaktır hem de anlaşılabilirliği artıracaktır. Bu kabuller şunlardır:

- Tüm tellerin düz ve kusursuz olduğu kabul edildi, yani kusur etkileri ihmal edildi.
- Eğik tellerin aksenal kısalmaları ihmal edildi
- BCC yapılara benzer şekilde eğik tellerdeki aksenal kuvvet etkisi ihmal edildi
- Yapıdaki tüm hücrelerin aynı miktarda deformasyona maruz kaldığı kabul edildi
- Kolaylık açısından, BCC yapılarda dikkate alınan kesme etkileri, burada eğik teller için dikkate alınmadı.



Şekil 2.20. BCCZ birim hücrenin şematik gösterimleri; a) Deformasyon mekanizması, b) Dikey yönde yük dengesi

Şekil 2.20b’de mikro tellerin kesişim noktasındaki kuvvet dengesi dikey kuvvetler açısından gösterilmektedir. F_2 kuvveti dik tellere etkiyen bası kuvvetini gösterirken, F_1 kuvveti eğik tellerin taşıdığı dikey yükü göstermektedir. Hatırlanacağı üzere F_1 kuvveti BCC yapılarında $F_z/4$ değerine eşittir. Şekil 2.20b’den dikey yöndeki kuvvet dengesi yazılırsa;

$$F_z = 4F_1 + F_2 \quad (2.32)$$

şeklinde statik kuvvet dengesi elde edilir. Şekil 2.20a’dan kolayca anlaşılacağı üzere, bası yüklemesi altında dikey telin boyunda oluşan kısılma, eğik tellerin yaptıkları maksimum deplasman miktarlarının dikey bileşeninin toplamına eşit olmalıdır. Eğik tellerin maksimum deplasmanının dikey bileşeni olan “h” değeri Şekil 2.18’de tanımlanmıştır ve 2.16 eşitliği ile belirlenmektedir. Buna göre;

$$\Delta \ell_z = 2h = 2\omega \cos \theta \quad (2.33)$$

şeklinde ifade edilir. Burada “ $\Delta \ell_z$ ” dikey teldeki aksenal kısılma miktarını göstermektedir. Klasik mukavemet bağıntıları yardımıyla kolayca şu şekilde ifade edilir.

$$\Delta \ell_z = \frac{F_2 \ell_z}{A_z E} \quad (2.34)$$

Denklemden, “ A_z ” dik tellerin kesit alanını göstermektedir. Eğik tellerin deplasman değeri olan “ ω ” eşitlik (2.27)’de verilmişti. Kesme terimi ihmal edilerek bu eşitlik ve (2.34) eşitliği, (2.33) eşitliğinde yerlerine yazılırsa, dikey ve eğik tellere etkiyen kuvvetler arasında,

$$F_1 = \frac{3F_2 d^4 \left(1 - \frac{d_z}{L}\right)}{d_z^2 \left(\sqrt{3} - \frac{2d}{L}\right)^3 L^2 \cos^2 \theta} \quad (2.35)$$

bağıntısı elde edilir. Burada “ d_z ” ifadesi dikey tellerin çapını ifade etmektedir. (2.35) eşitliği kuvvet eşitliğinde yerine konulursa, hücreye uygulanan kuvvet ile dikey telin maruz kaldığı kuvvet arasında bağıntı;

$$F_z = F_2 \left[\frac{12d^4 \left(1 - \frac{d_z}{L}\right)}{d_z^2 \left(\sqrt{3} - \frac{2d}{L}\right)^3 L^2 \cos^2 \theta} + 1 \right] \quad (2.36)$$

şeklinde elde edilmiş olur. BCC yapılar için yapılan analizlere benzer şekilde, BCCZ için birim şekil değiştirme şu şekillerde ayrı ayrı hesaplanabilir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell_z}{L} \quad (2.37a)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_z}{E_{BCCZ}^*} = \frac{F_z}{A^* E_{BCCZ}^*} \quad (2.37b)$$

(2.37a) ve (2.37b) ifadeleri birbirlerine eşitlenirse, BCCZ yapı için elastisite modülü birim hücreye gelen kuvvet cinsinden ifade edilir.

$$E_{BCCZ}^* = \frac{F_z}{\Delta \ell_z L} \quad (2.38)$$

(2.34) ve (2.36) ifadeleri (2.38) ifadesinde yerine yazılıp düzenlenirse;

$$E_{BCCZ}^* = \frac{\pi E}{4} \left[\frac{12 \left(\frac{d}{L} \right)^4}{\left(\sqrt{3} - 2 \frac{d}{L} \right)^3 \cos^2 \theta} + \frac{\left(\frac{d_z}{L} \right)^2}{\left(1 - \frac{d_z}{L} \right)} \right] \quad (2.39)$$

ifadesi ile BCCZ yapıların elastisite modülünü veren ifade elde edilmiş olur. Eğer dikey ve eğik tellerin çapları birbirine eşit ise bu durumda ifade,

$$E_{BCCZ}^* = \frac{\pi \left(\frac{d}{L} \right)^2 E}{4 \left(1 - \frac{d}{L} \right)} \left[\frac{12 \left(\frac{d}{L} \right)^2 \left(1 - \frac{d}{L} \right)}{\left(\sqrt{3} - 2 \frac{d}{L} \right)^3 \cos^2 \theta} + 1 \right] \quad (2.40)$$

formunu alır. Son eşitlikte parantez içindeki ilk ifade eğik tellerin katkısını ifade etmektedir. Eğer eğik tellerin katkısı ihmal edilirse, ifade en sade halini aşağıdaki gibi alır.

$$E_{BCCZ}^* = \frac{\pi \left(\frac{d}{L} \right)^2 E}{4 \left(1 - \frac{d}{L} \right)} \quad (2.41)$$

2.2.4. Mikro Kafes Yapıların Başlangıç Çökme Gerilmesinin Hesabı

a. BCC yapılar;

Sınırlandırılmamış BCC kafes yapıların başlangıç plastik çökme gerilmesini bulmak için tam plastik moment kavramından (Stronge ve Yu, 1993) yararlanılacaktır. Bu kavram, kiriş kesitinde oluşan eğilme momentinin plastik çökme şekil değişimi momentine eşit olması durumunda, kirişte çökme meydana geleceğini veya kirişin yük taşıma özelliğini kaybetmeye başlayacağını ifade eder. Tüm kesit boyunca plastik momentin oluşumu, elastik rijit plastik malzemeler için tam olarak geçerlidir. Bu çalışmada, deformasyon sertleşmesine sahip bir malzeme için tam plastik moment kavramı genişletilmektedir. Deformasyon sertleşmesine sahip bir malzeme için dairesel kesitli bir plastik mafsalda (plastic hinge) tam plastik moment veya daha doğru şekilde çökme momenti,

$$M_o = \beta \sigma_o d^3 \quad (2.42)$$

ifadesi ile verilmektedir (Stronge ve Yu, 1993). Burada, “ σ_o ” malzemenin akma gerilmesi iken “ β ” ise ileri ki bölümlerde kafes blokların deneysel basma testleri vasıtasıyla hesaplanacak bir deneysel sabittir. Buradaki teorik analizde de bir önceki bölümde yapılan tüm kafes bloğun üniform deformasyona maruz kaldığı kabulünden yararlanılacaktır. Bölüm 2.2.1’de bir mikro telin eğilme momenti,

$$M(x=0) = \frac{F\ell}{2} = \frac{F_z \ell \cos \theta}{8} \quad (2.43)$$

şeklinde verilmişti. Bu denklemde, “ $F_z = \sigma^* L^2$ ” yazılabilir. “ σ^* ” basma esnasında kafes bloğa etkiyen gerilme veya burada bloğun başlangıç çökme gerilmesi olarak adlandırılır. Mikro telde çökmenin başlayabilmesi için “M” ve “ M_o ” ifadeleri birbirlerine eşit olması gerekmektedir. İfadeler eşitlenir ve yeniden düzenlenirse, BCC kafes blok için başlangıç gerilmesi;

$$\sigma^* = \frac{4\sqrt{6}\beta\sigma_0}{\left[\frac{\sqrt{3}}{2} - \left(\frac{d}{L}\right)\right]} \left(\frac{d}{L}\right)^3 \quad (2.44)$$

şeklinde bulunur. (2.44) eşitliği kesişim noktalarının etkilerini içermektedir. Yine karşılaştırma amaçlı, Ushijima vd. (2010) tarafından elde edilen gerilme ifadesi aşağıda verilmektedir.

$$\sigma^* = \frac{4\sqrt{2}}{3} \sigma_0 \left(\frac{d}{L}\right)^3 \quad (2.45)$$

Son denklemde, “ σ_0 ” gerilmesi akma gerilmesini ifade etmemektedir. Ushijima vd. (2010), deformasyon sertleşmesini hesaba katmak için basit bir yöntem kullanmışlardır. Onlar “ σ_0 ” değeri için, % 5 birim şekil değiştirme değerine karşılık gelen gerilme değerini (flow stress) almışlardır.

b. BCCZ yapılar;

Şekil 2.20a’da da görüldüğü üzere BCCZ hücrelerinde çökme dikey tellerin burkulması ile gerçekleşecektir. Burada dikey telde oluşan aksenal basma gerilmesinin belli bir gerilme düzeyine ulaşması durumunda çökmenin başlayacağı kabul edilerek teorik analiz geliştirilecektir. Fakat burada, tellerin deformasyon sertleşmesi (work hardening effect) özelliği sebebiyle çökme gerilmesi (σ_f) değerinin, akma gerilmesinden daha yüksek gerilme değerlerinde olacağı kolayca anlaşılabilir. Bu nedenle çökme gerilmesinin belirlenmesi bir problem oluşturmaktadır. Çökme gerilmesinin belirlenmesi için BCC yapılarda olduğu gibi mikro kafes yapıların deneysel basma testlerinin sonuçlarından yararlanılacaktır. Bununla ilgili çalışmalar “Bulgular ve İrdeleme” bölümünde sunulacaktır. Hücreye gelen kuvvetin hücreye uygulanan gerilme cinsinden değeri ve dikey tel kuvvetinin çökme gerilmesi açısından ifadeleri;

$$F_z = A^* \sigma_{BCCZ}^* \quad (2.46a)$$

$$F_2 = A \sigma_f \quad (2.46b)$$

ile verilebilir. Eşitlik (2.36)'deki F_z ifadesini (2.46a)'da yerine yazıp, elde edilen ifade (2.46b) denklemiyle harmanlanırsa;

$$\sigma_{BCCZ}^* = \frac{\pi \left(\frac{d}{L}\right)^2 \sigma_f}{4} \left[\frac{12 \left(\frac{d}{L}\right)^2 \left(1 - \frac{d}{L}\right)}{\left(\sqrt{3} - 2 \frac{d}{L}\right)^3 \cos^2 \theta} + 1 \right] \quad (2.47)$$

şeklinde BCCZ yapılar için çökme gerilmesi ifadesi elde edilir. Bu ifadede parantez içindeki ilk terim ihmal edilirse denklemin en sade hali elde edilir. Elde edilen ifade eğik tellerin etkisinin ilave edilmediği gerilme halidir.

$$\sigma_{BCCZ}^* = \frac{\pi \left(\frac{d}{L}\right)^2}{4} \sigma_f \quad (2.48)$$

2.3. “ β ” Katsayısının Hesabı

Denklem (2.44)'da en önemli problem “ β ” katsayısının değerinin belirlenmesidir. Bu sebeple dairesel kesitli elastik lineer plastik malzemeden yapılmış bir kirişte plastik moment değişimi aşağıdaki gibi verilmektedir (denklemin elde edilişi ile ilgili detaylı bilgi “EKLER” bölümünde verilmektedir):

$$M = 2\sigma_0 \left\{ 0.0625d^3(1-\mu)(0.333A^2+0.5)\sqrt{A} + 0.015625 \frac{d^4}{c} B \right\} \quad (2.49)$$

Burada, “d” ve “c” sırasıyla kiriş çapı ve akmaya başlayan liflerin (Fibre) tarafsız eksenenden uzaklığıdır. “ μ ” ise tanjant modülünün elastik modüle oranıdır. Ayrıca “A” ve “B” sabitleri şu şekilde verilmektedir.

$$A=1-4\left(\frac{c}{d}\right)^2 \quad \text{ve} \quad B = (1 - \mu)ArcSin \left[2\frac{c}{d} \right] + 1.5708\mu \quad (2.50)$$

Denklemler (2.49) ve (2.50)'den görüldüğü üzere kesin çözüm için “c” değerinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Fakat “c” için elastik lineer plastik malzemeler için herhangi bir asimptotik bir değer bulunmamaktadır. “c” ayrıca aşağıdaki şekilde de tanımlanabilir (Yu ve Zhang, 1996);

$$c = \frac{\sigma_0}{E\varepsilon_a} \left(\frac{d}{2} \right) \quad (2.51)$$

Denklem (2.51) “c” değerini “ ε_a ” değerine bağlı hale getirir. “ ε_a ” ise kesitte oluşan en yüksek birim şekil değiştirme (en dış fiberlerde) değeridir. Böylelikle BCC kafes bloğun başlangıç çökme gerilmesinin belirlenmesi için “ ε_a ”nın değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değer belirlenmesinde BCC kafes malzemelerin deneysel basma testlerinden yararlanılacak ve “Bulgular ve İrdeleme” kısmında seçim yönteminden bahsedilecektir.

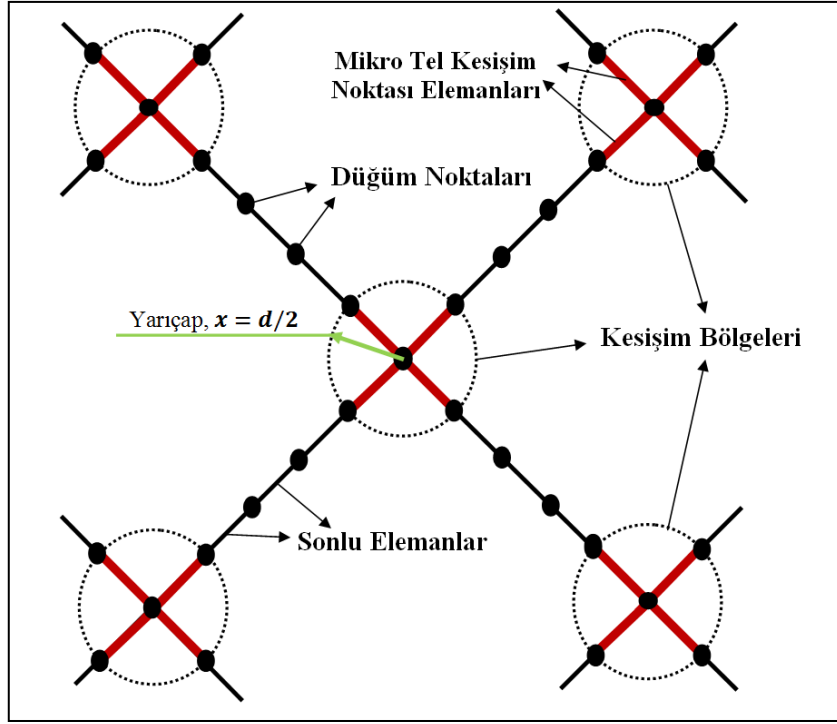
2.4. Sayısal Çalışmalar

Mikro kafes yapıların mekanik davranışlarını sayısal olarak modellemek için sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmıştır. Bunun yanında dalga etkileri, numune büyüklüğü ve yapısal kusurların etkilerinin incelenmesi gibi bazı parametrik çalışmalar da sayısal modeller yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Burada sayısal modelleme için iki tip model ve eleman tipi kullanıldı. Bunlar bir boyutlu kiriş eleman (1D beam model) ve üç boyutlu katı elemanların (3D solid model) kullanıldığı modellerdir. 1D modellerde tüm kafes yapı modellenirken, 3D modellerde ise yalnızca bir mikro tel için sayısal model oluşturuldu. Burada 1D modelden kasıt, geometrik olarak bir boyutlu çizgi elemanların kullanılmasıdır. Tüm analizler LS-DYNA 3D ticari sonlu elemanlar paket programında eksplisit yöntemle gerçekleştirilmiştir.

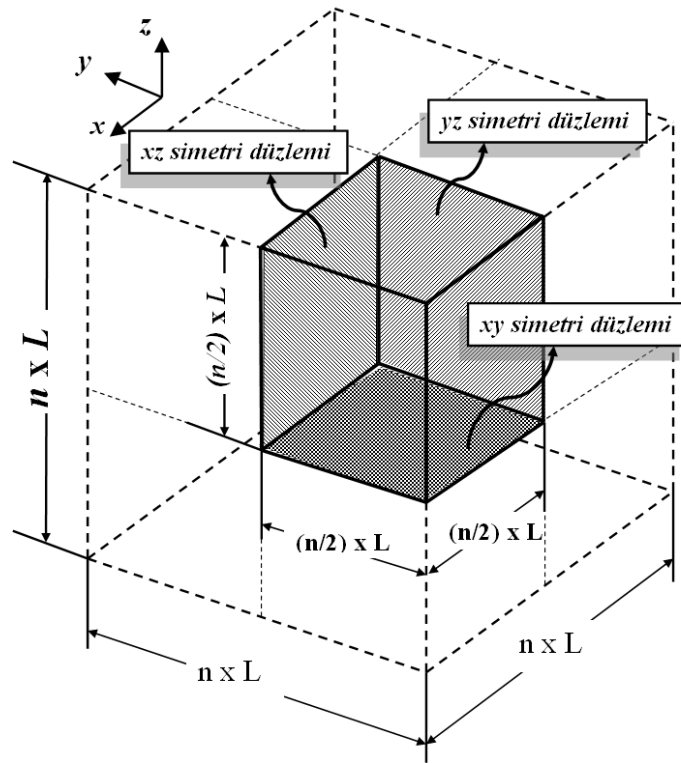
2.4.1. Bir Boyutlu Elemanlarla Bloğun Statik Modellenmesi

Bir boyutlu modelleme için bir tanesi eleman koordinatını tanımlamaya yarayan, hesaplamalarda yer almayan toplamda üç düğüm noktalı (node) çizgi elemanlar kullanıldı. Hughes-Liu giriş eleman formülasyonu 16 integrasyon noktası ile kullanılmıştır (Hallquist, 1998). Bu eleman formülasyonu sonlu deformasyon ve kesme etkilerini hesaba katmaktadır. Her bir mikro teldeki eleman sayısı hücre boyutuna göre değişmektedir. Örneğin 2.5 mm hücre boyutuna sahip kafesteki her bir tel 10 adet çizgi eleman ile modellenirken, 1.25 mm hücre boyutuna sahip kafesteki teller 6 çizgi eleman ile modellenmiştir. Kesişim noktaları etkilerini (mikro tellerin kesişim noktası) ilave etmek için mikro tellerin kesim noktalarına temas eden en yakın elemanların boyları, teorik kabule uygun olarak “ $x=d/2$ ” şeklinde düzenlendi. Bu elemanlara kesişim noktası elemanları adı verilecektir. Şekil 2.21a’da kesişim noktası elemanları ve ağ yapısı şematik olarak verilmektedir. Kesişim noktası elemanları dışındaki diğer elemanların boyları, hücre büyüklüğüne göre 0.22-0.24 mm değerleri arasında değişmektedir.

Basma testlerinde kafes blokların simetrisinden yararlanarak yalnızca kübik bloğun 1/8’i modellenmiştir. Kesme ve bileşik yükleme durumlarında deformasyonun simetrik gelişmemesi nedeniyle simetrik modeller kullanılmamıştır. Şekil 2.21b’de kafes bloğun simetri yüzeyleri gösterilmektedir. Simetri sınır şartları olarak simetri yüzeylerindeki düğüm noktalarının hem yüzey normali yönündeki hareket serbestlik dereceleri hem de dönme serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır. Simetri şartlarına ilave olarak xy simetri düzlemindeki düğüm noktalarının birbirinden bağımsız dikey eksen yönünde hareketini engellemek için bu düğüm noktalarının z eksen yönündeki hareket serbestlik dereceleri “CONSTRAINED_SET” opsiyonu kullanılarak birbirine bağlanmıştır. Mikro tellerin deformasyon esnasında birbirleriyle yapacağı temas “CONTACT_AUTOMATIC_GENERAL” kartı vasıtasıyla sağlanmıştır.



(a)

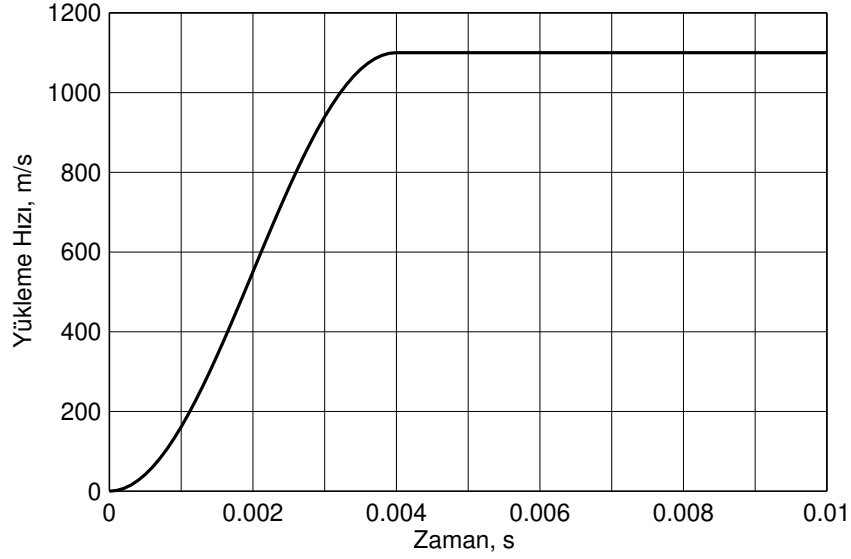


(b)

Şekil 2.21. Bir boyutlu elemanlarla modelleme; a) Düğüm noktası elementlerin modellemesi, b) simetri düzlemleri

Sınırlandırılmış modellerde bloğun alt yüzeyindeki düğüm noktalarının serbestlik dereceleri sıfırlanırken, yükün uygulandığı yüzeydeki düğüm noktalarında ise, yükleme yönündeki serbestlik dereceleri hariç diğer tüm serbestlik dereceleri sıfırlanmıştır. Ayrıca sınırlandırılmış modellerin bazılarında Şekil 2.5'te görüldüğü üzere yapıştırıcının bulunduğu “ l_z ” mesafesi içindeki tüm düğüm noktalarının serbestlik dereceleri “CONSTRAINED_SET” opsiyonu kullanılarak birbirine bağımlı hale getirildi. Böylece yapıştırıcının bulunduğu bölgede herhangi bir deformasyona izin verilmedi.

Yükleme, LS DYNA programının sağladığı standart rijit duvar opsiyonları vasıtasıyla sağlandı. Numune, alt yüzeyine sabit bir rijit duvar yerleştirilmiş iken, üst yüzeyinden hareketli bir rijit duvar ile yüklemeye maruz bırakıldı. Rijit duvarlar ile numune arasında 0.15’lik bir sürtünme katsayısı öngörüldü. Tüm statik sayısal çalışmalar kuasi statik olarak gerçekleştirildi. Bir kuasi statik analiz, atalet etkilerinin uygun şartlarda minimum tutularak yapay bir yüksek hızlı yükleme ile ekspilisit çözüm yönteminin kullanılmasıdır. 1D elemanlarla yapılan modellerde rijit duvar hızı Şekil 2.22’de verilen yapay eğri vasıtasıyla tanımlanmaktadır. Görüldüğü üzere başlangıçta yumuşak bir temas sağlanarak atalet etkilerinin minimum tutulması sağlanmıştır. Sonrasında çok yüksek simülasyon hızlarına çıkılmakla birlikte belli bir zamandan sonra hız sabit tutulmuştur. Yapay hıza ilave, zaman adımını arttırmak için malzeme yoğunluğu 100 kat arttırılmıştır. Bu yapay işlemlerden sonra en büyük problem kuasi statik testlerin geçerliliğinin sağlanmasıdır. Literatürde, kuasi statik testlerin geçerliliği ile ilgili birkaç kıstas bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi, bir kuasi statik simülasyon esnasında toplam kinetik enerjinin toplam şekil değiştirme enerjisi ile karşılaştırıldığında ihmal edilecek düzeyde olmasıdır (Gümrük ve Karadeniz, 2009). Fakat bu çalışmada literatürden farklı olarak hem yükleme hem de sabit rijit duvar reaksiyon kuvvetlerinin karşılaştırması üzerine bir kıstas dikkate alınmıştır. Eğer kuasi statik test geçerli ise statik yüklemenin doğası gereği her iki duvardaki reaksiyon kuvvetleri birbirine eşit veya çok yakın değerlere sahip olması gerekmektedir. Bu kıstas buradaki tüm statik simülasyonlarda geçerlilik kıstası olarak alınmıştır.



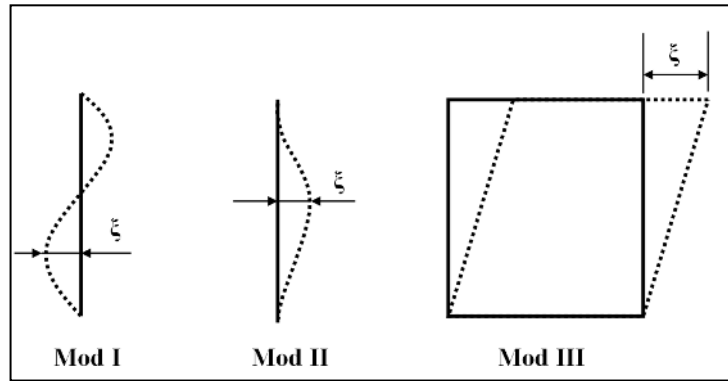
Şekil 2.22. Kuasi statik testler için yükleme eğrisi

Malzeme modeli olarak parçalı lineer plastik model (Piecewise linear plastic model) kullanılmıştır. Bu model LS DYNA programının sağladığı izotropik malzeme modellerinden biridir (Hallquist, 1998). Bölüm 2.1.4.1’de yapılan çalışmalar vasıtasıyla, 316L paslanmaz çelik için elde edilen gerçek gerilme-gerçek plastik birim şekil değiştirme eğrisi, bu malzeme modeline malzeme verisi olarak atanmıştır. Statik basma simülasyonlarında herhangi bir kopma birim şekil değiştirme değeri kullanılmaz iken kesme, çekme ve bileşik yükleme simülasyonlarında 0.15’lik bir kopma birim şekil değiştirme değeri (failure strain) kullanılmıştır. Ayrıca, kuasi statik simülasyonlarda birim şekil değiştirme hızı parametreleri kullanılmamıştır.

Teorik model geliştirme kısmında bahsedildiği gibi mikro tellerin kesişim noktalarında malzemelerin üst üste binmesi sonucu bir rijitlik ve mukavemet artışı olmaktadır. Bu etkiyi modelleyebilmek için Luxner vd. (2005) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmalardakine benzer bir yöntem uygulanmıştır. Onlar, kesişim noktasına en yakın elemanların (Şekil 2.21a) elastisite modülünü diğer elemanlardan belli bir oranda yüksek alarak kesişim noktalarının etkilerini sayısal modellere tanıtmışlardır. Bundan yola çıkarak, deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılarak gerçekleştirilen deneme çözümleri sonucunda kesişim noktası elemanlarının elastisite modülünün % 50 fazla olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Kafes modellerin sonlu elemanlar modellerinde yapısal kusur (imperfection) olarak, Şekil 2.23’de gösterilen üç tip model, kafes tipine bağlı olarak uygulanmıştır. Bu kusur

modellerinin tanımında deneysel deformasyon davranışlarından yararlanılmıştır. BCC kafes yapılar için Mod I ile ifade edilen kusur tipi mikro tellere uygulandı. BCCZ kafes modellerinde eğik mikro teller için Mod I kusur tipi kullanılırken, dikey mikro tellerde Mod II kusur tipi kullanılmıştır. Mod III kusur tipi BCCZ kafes blokları için kullanılmıştır. Bu modelde bloğun üst köşesi “ ξ ” değeri kadar ötelenerek paralel kenar bir şekle benzer çarpıtılmış kafes blok elde edilmiştir. Bunun yapılmasındaki amaç BCCZ yapılarda, köşeden köşeye uzanan kesme bandı şeklindeki deformasyon modunun modellenmesidir. Mod I ve II için “ ξ ” değeri çapın % 10’nu olarak alınmıştır. Bu değer, sayısal modellerin sonuçlarıyla deneysel sonuçların karşılaştırılması sonucunda elde edilmiştir. Karşılaştırmalar sınırlandırılmış numune testleri için yapılmıştır. Karşılaştırmalarda esas amaç sayısal modelin elastisite modülü ve çökme gerilme değerlerinin (2.5 mm hücre boyutu için) deneysel sonuçlara en yakın olduğu duruma karşılık gelen “ ξ ” değerini belirlemektir.



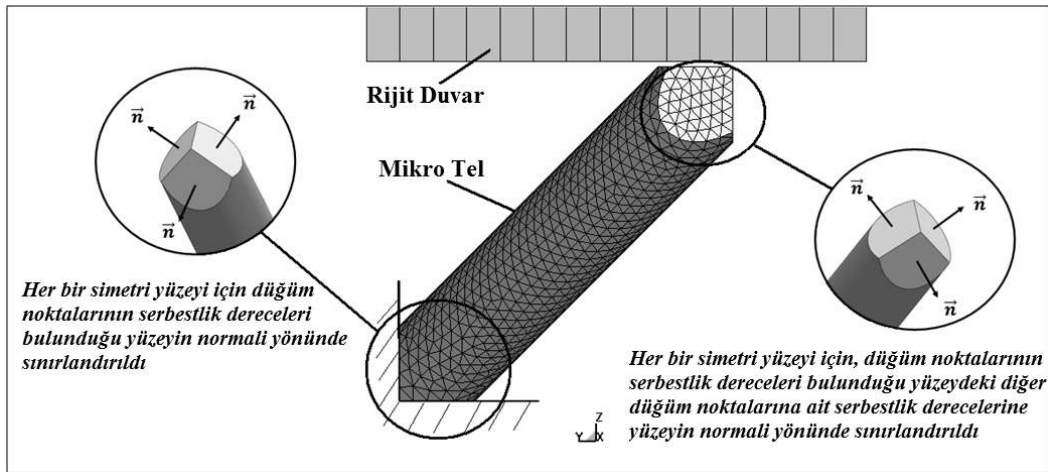
Şekil 2.23. Sayısal modellerde kullanılan kusur modlarının şematik gösterimleri

2.4.2. Üç Boyutlu Elemanlarla Mikro Telin Modellemesi

3D modellemede dört düğüm noktalı tetrahedron elemanlar kullanılmıştır (Hallquist, 1998). Bu elemanın düğüm noktaları dönme serbestlik derecelerine sahiptir. Bu çalışmada tüm düğüm noktalarının dönme serbestlik dereceleri sıfırlanmıştır. Tüm kafes yapıda üniform çökme davranışı ve hesaplama zamanı dikkate alınarak yalnızca bir mikro tel üç boyutlu olarak modellenmiştir. 3D model ile ilgili sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları Şekil 2.24’de görülmektedir. Şekilden de açıkça görüleceği üzere mikro telin her iki

ucunda üçer tane simetri yüzeyi bulunmaktadır. Mikro telin sabit ucundaki (Şekil 2.24’de sol taraftaki ucu) her bir yüzey üzerinde bulunan düğüm noktalarının hareket serbestlik dereceleri, ait olduğu yüzeyin normal yönünde sınırlandırılmıştır. Böylece bu uçta hem simetri şartları hem de ankastre sınır şartları sağlanmıştır. Hareketli uçta ise (Şekil 2.24’de sağ taraftaki uç), sabit uçtan farklı olarak, her bir simetri yüzeyi üzerindeki düğüm noktalarının hareket serbestlik dereceleri ait olduğu yüzeyin normal yönünde birbirlerine “CONSTRAINED_SET” opsiyonu kullanılarak birbirlerine bağlanmıştır. Bunun sonucu olarak, simetri yüzeyindeki herhangi bir düğüm noktası o yüzeydeki diğer düğüm noktalarından bağımsız şekilde yüzey normal yönünde hareket edemez. Bu sınır koşulları vasıtasıyla hem simetri şartları sağlanırken hem de ucun yükleme ile yer değişimine olanak sağlanmaktadır.

Katı modellerde de kuasi statik analiz gerçekleştirilmiştir. Burada kafes modellerden farklı olarak rijit duvara 1000 mm/s’lik ilk hız ve 100 kg kütle verilmiştir. Kuasi statik testlerin geçerliliği, sabit ve hareketli uçlardaki yükleme yönündeki reaksiyon kuvvetlerinin karşılaştırılması ile sağlanmıştır. Malzeme modeli ve verisi kafes modellerle aynı seçilmiştir.



Şekil 2.24. 3D sonlu elemanlar modellerine ait yükleme, sınır şartları ve ağ yapısı

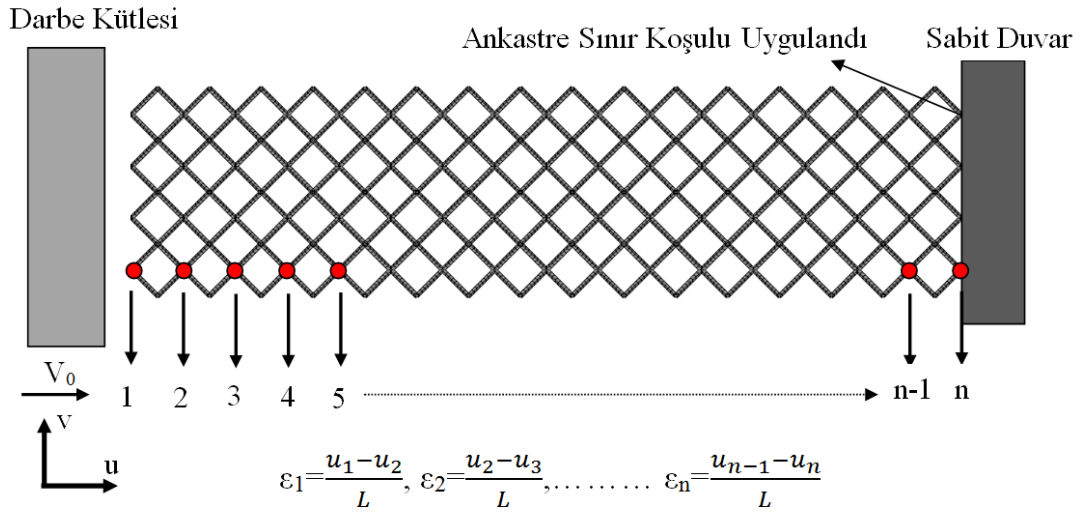
2.4.3. Bir Boyutlu Elemanlarla Dinamik Modelleme

Dinamik sayısal modellerde yalnızca 1D elemanlar kullanılmıştır. Ağ yapısı ve sınır şartları statik modellerle benzer şekilde oluşturulmuştur. Burada, problemin doğası gereği

1/8 yerine 1/4 simetrik modeller tercih edilmiştir. Yükleme bir ilk hız ve kütleye sahip rijit duvarın serbest çarpması şeklinde uygulanmıştır. Malzemenin yoğunluğunda zaman adımını arttırmaya yönelik herhangi bir değişim yapılmamıştır.

Ayrıca BCC kafes yapısı için dalga yayılımını incelemeye yönelik sayısal modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller 40 mm uzunluğa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu modellerle ilgili sınır şartları ve yükleme durumu Şekil 2.25’de görülmektedir. Elastik ve plastik dalganın kafes boyunca yayılımını gözlemleyebilmek için, hücrelerin deformasyonundan yararlanılarak birim hücre şekil değiştirme ifadesi tanımlanmıştır.

Şekil 2.25’de birim hücre şekil değişiminin hesaplama şekli gösterilmektedir. Birim hücre şekil değiştirme değeri, şekilden de görüldüğü üzere, yükleme doğrultusunda birim hücrenin aynı doğrultu üzerinde bulunan kesişim noktalarının yer değişim değerlerinin farkının, başlangıç hücre boyutuna bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Bu hesaplama o doğrultudaki her hücre için tekrarlanılarak o zaman adımında, kafes yapıda meydana gelen dalganın profili elde edilmektedir.

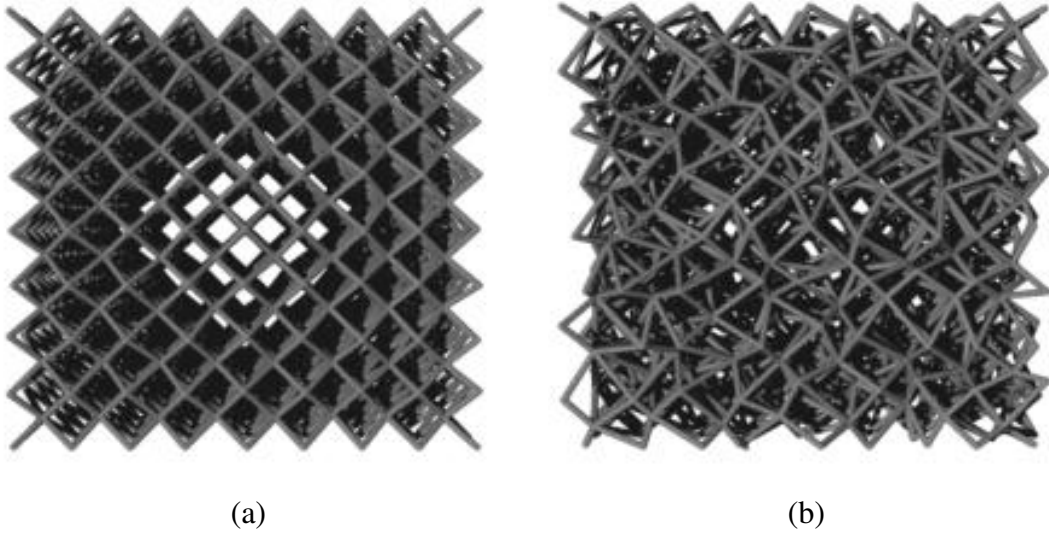


Şekil 2.25. Dinamik sonlu elemanlar modeli ve birim hücre şekil değiştirme ifadesinin hesaplama metodunun gösterimi

2.4.4. Yapısal Kusurların Modellenmesi

Yapısal düzensizliklerin mikro kafes yapıların makro mekanik davranışları üzerine etkisini statik olarak incelemek için kafes modellerin hücre geometrileri rastgele olarak çarpılmıştır. Bu işlem Matlab programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için

önce çizgi şeklinde, kafes bloğun tümü katı programlama programında modellendi. Oluşturulan dosya IGES formatında kaydedildi. Bu format Matlab programına okutuldu. Çizgilerin kesişim noktalarının koordinatları, birbirinden bağımsız olarak x,y ve z yönlerinde Matlab programında üretilen rastgele rakamın değerine göre “ $+\Delta$, 0, $-\Delta$ ” değerleri kadar değiştirildi. Bu değerler kusur şiddeti olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntem tüm noktalar için gerçekleştirilerek düzensiz kafes yapı elde edildi. Bu yöntemde teller yine düz kalmaktadır. Kafes yapıda “ $+\Delta$, 0, $-\Delta$ ” miktarlarıyla x, y ve z yönlerinde yer değiştiren bir nokta için yer değişim miktarı “ $\sqrt{3}\Delta$, $\sqrt{2}\Delta$, Δ , veya 0” değerlerinden biri olmaktadır. Buna göre bir noktanın maksimum yer değiştirmesi “ $\sqrt{3}\Delta$ ” şeklinde gerçekleşebilir. Şekil 2.26’da 2.5 mm hücre boyutuna sahip bir BCC kafes bloğu için yukarıdaki yöntemle üretilmiş kusurlu ve kusursuz görünüm verilmektedir. Bu yapı için $\Delta=3L/16$ alınmıştır.



Şekil 2.26.Yapısal, a) Kusursuz, b) Kusurlu yapıların geometrik karşılaştırması

3. BULGULAR VE İRDELEME

Mikro tel ve kafes yapılar üzerine gerçekleştirilen deneysel, sayısal ve teorik çalışma bulguları bu bölümde ayırık formda detaylı olarak sunulmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm numunelerde lazer parametreleri olarak, aksi söylenmedikçe 90 W lazer gücü ve 1000 μ s nüfus etme süresi kullanılmıştır.

3.1. Serbest Yüzeyli Numunelerin Basma Testi Sonuçları

a. BCC yapılar;

Şekil 3.1’de BCC kafes yapılara ait basma testlerinden elde edilen gerilme- birim şekil değiştirme eğrileri 2.5, 2, 1.6, 1.379 ve 1.25 mm hücre boyutları için ayrı ayrı grafikler halinde sunulmaktadır. Ayrıca grafikler, aynı hücre boyutundaki bloklar için hem izafi yoğunluğun sonuçlara etkisini görmek, hem de deneylerin tekrarlanabilirliğini göstermek için birden fazla test sonucunu ihtiva etmektedir. En genel olarak şekilden de görüldüğü üzere, BCC kafes yapıları, Şekil 1.9’da şematik olarak gösterilen eğilme baskın davranışa uygun şekilde bası davranışlarına sahiptir. Yani deformasyon esnasında mikro tellerde eğilme deformasyon mekanizması etkin olmaktadır. Lineer elastik yükleme bölgesinin ardından elastik-plastik deformasyon bölgesi ortaya çıkmakta ve ardından gerilmelerin neredeyse lineer bir şekilde arttığı kararlı çökme bölgesi oluşmaktadır. Bu bölgenin bitişi mikro tellerin birbiri ile temas etmeye başladığı yoğunlaşma bölgesi ile olur. Açık şekilde, bu davranış biçimi konvansiyonel köpük malzemelerin davranışına benzerdir (Gibson ve Ashby, 1997).

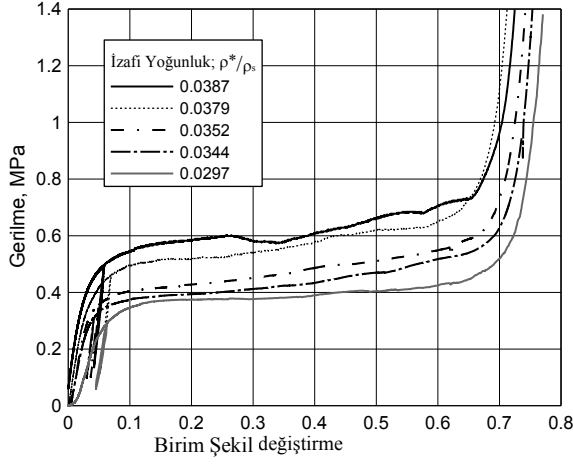
Şekil 3.1’de görüldüğü üzere hücre boyutu azaldıkça, gerilme değerleri artmaktadır. Örneğin 2.5 mm hücre boyutu için çökme gerilmesi 0.52 MPa (0.0387 izafi yoğunluk için) çivarında olurken 1.25 mm hücre boyutunda bu değer 4.5 MPa (0.1141 izafi yoğunluk için) olmaktadır. Diğer bir nokta ise yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerinin, hücre boyutu arttıkça azalmasıdır. Ayrıca, aynı hücre boyutuna sahip kafes blokların izafi yoğunluğu değişirse gerileme-birim şekil değiştirme eğrilerinin değiştiği açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Burada dikkat çekilecek nokta, farklı izafi yoğunluğa sahip aynı hücre boyutuna sahip kafeslerin davranışlarının eğilimleri benzer olmakla birlikte, birbirine göre

belli bir oranda ötelenmiş gibi durmalarıdır. Bu duruma zıt tek durum, Şekil 3.1e’de görüldüğü üzere 1.25 mm hücre boyutuna sahip kafes yapılarıdır. Şekilde görüldüğü üzere 0.1141 izafi yoğunluğuna sahip kafesin kararlı çökme bölgesi eğimi, 0.1383 izafi yoğunluğa sahip kafesten düşük olmaktadır. Bu durumun, 0.1383 izafi yoğunluğuna sahip kafesteki mikro tellerin çapının diğer kafese göre daha yüksek olması ve hücre boyutunun küçüklüğü sebebiyle, mikro tellerin üzerinde kalan ergimemiş veya yarı ergimiş mikro tozların (Şekil 2.14) erkenden birbirleriyle temas etmesiyle ortaya çıktığı düşünülmektedir.

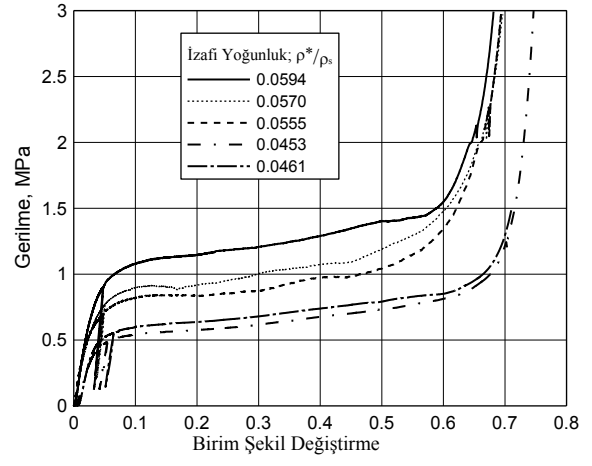
Elastisite modülünü belirlemek için yükleme başlangıcına yakın bir noktada uygulanan yükte belli bir dereceye kadar boşaltma uygulanmış ve ardından tekrar yüklemeye devam edilmiştir. Bunun sonucunda elde edilen boşaltma-yükleme eğrileri (Unloading curve) Şekil 3.1’de görülmektedir. Yapının gerçek elastisite modülü bu eğriler vasıtasıyla hesaplanmıştır. Bu eğrilerin eğimi başlangıç yükleme eğrisinin eğiminden oldukça fazladır. Başlangıç yükleme eğrisinin eğiminin düşüklüğü, kafes bloğunun temas yüzeyleri ve mikro tellerin içerdiği yüksek derecede kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sebeple, boşalma eğrisinin başlangıcı genel olarak, Gibson ve Ashby (1997) tarafından köpük malzemeler için önerilen, çökme gerilmesinin % 75’i referans alınarak gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

BCC kafes yapılar için gerçekleştirilen testlerle ilgili hem numunelere ait özellikler hem de elde edilen sonuçların bir özeti Tablo 3.1’de sunulmuştur. Tüm numuneler için tel çapları eşitlik (2.12) kullanılarak hesaplanılmış ve bunun sonucunda d/L oranı teorik olarak hesaplanan tel çapları kullanılarak elde edilmiştir. Eşitlik (1.1) kullanılarak elde edilen yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerleri tabloda her bir numune için verilmiştir. Değerlerin elde edilme yöntemiyle ilgili görsel grafikler ileriki bölümlerde verilecektir. Tablodan kolayca anlaşılabileceği üzere, yoğunlaşma birim şekil değiştirme, hem hücre boyutuna hem de izafi yoğunluğa (aynı hücre boyutuna sahip numuneler için) bağlıdır. İzafi yoğunluk veya hücre boyutu arttıkça yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerleri azalış göstermektedir ve buna bağlı olarak kararlı çökme bölgesi mesafesi düşmektedir. Bu da bloğun enerji sönümleme kapasitesini düşürmektedir.

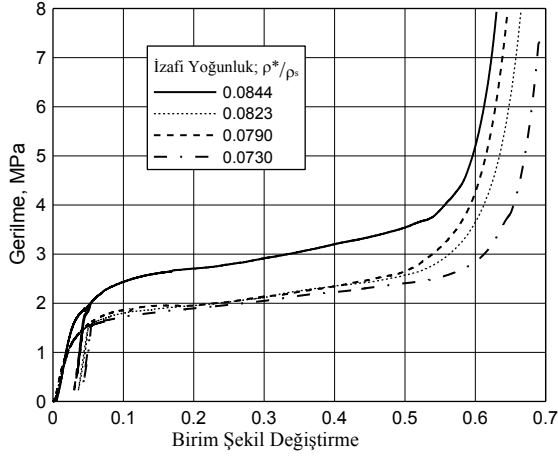
BCC yapılara ait belirli şekil değiştirmelerde ortaya çıkan deformasyon mekanizmaları Şekil 3.2’de görülmektedir. Görüldüğü gibi belli bir bası miktarından sonra tüm hücre boyutları için kafes bloğunun merkezinde deformasyon lokalleşmesi oluşmaktadır. Lokalleşme 2.5, 2 ve 1.6 mm hücre boyutuna sahip kafes yapılar için 0.2 birim şekil değiştirmede belirgin olmaya başlarken, 1.379 mm’den küçük hücreliler



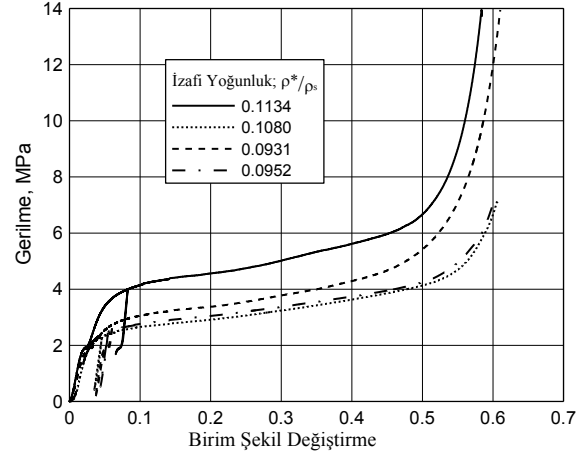
(a)



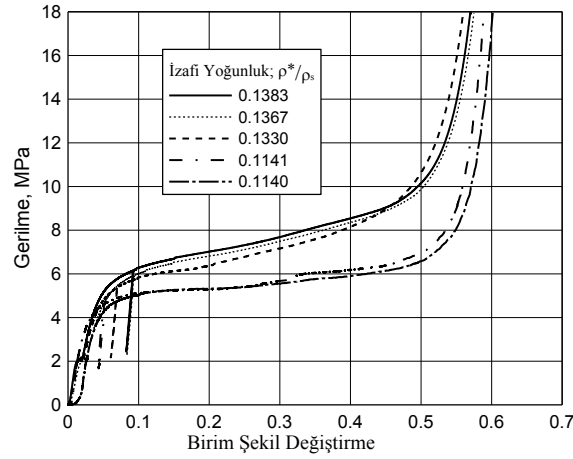
(b)



(c)



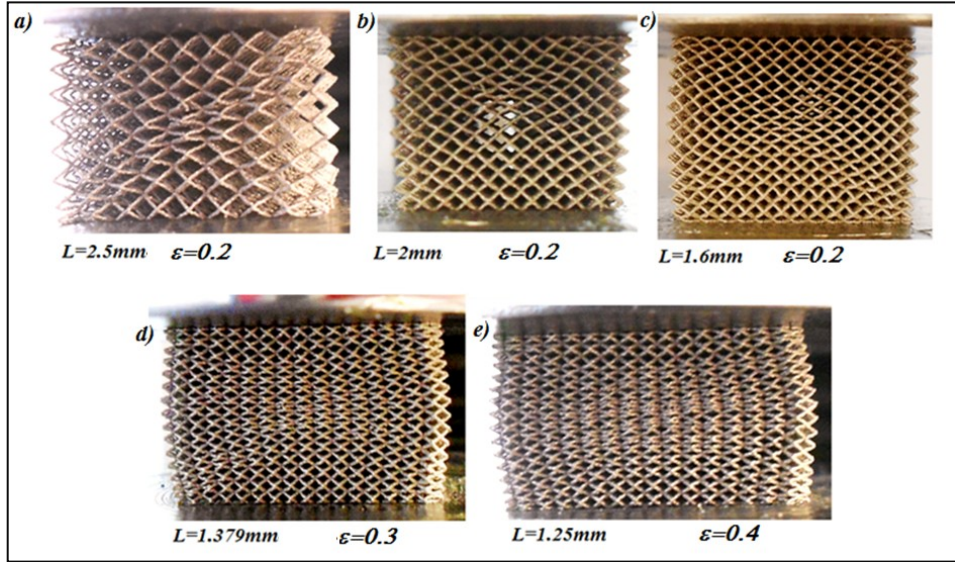
(d)



(e)

Şekil 3.1. BCC yapıların basma testlerinden elde edilen, hücre boyutları a) 2.5, b) 2, c) 1.6, d) 1.379, d) 1.25 mm olan mikro kafes bloklara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini gösteren grafikler

için aynı olgu 0.3 veya 0.4'te gözle görülür hal almaktadır. Bu lokalleşmenin nedeni ve malzemenin mekanik davranışlarına etkisi tam olarak bilinmemekle birlikte, bu durumun kafes blok ile bası levhaları arasındaki sürtünme ve kafes içindeki yapısal kusurların etkileri sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 3.2. Farklı hücre boyutuna sahip BCC kafes blokların belirli birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri

b. BCCZ yapılar;

BCCZ yapılar için elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü üzere büyük hücre boyutları için (1.5 mm'de dahil) bası davranışı BCC yapılardan oldukça farklıdır. Büyük hücreli BCCZ yapılar (Şekil 3.3a ve b) başlangıçta çok düşük birim şekil değiştirme değerlerinde, bir pik gerilme değerine ulaşp ardından ikinci bir pik değerinin başlangıcına kadar düşüş göstermektedir. Bu pik değer yapıda başlangıçta çeki-bası dominant deformasyon mekanizmasının etkin olduğunu ve dikey mikro tellerin burkulması ile çökmenin başladığını ortaya koymaktadır. Bu mekanizma türünden ve oluşan davranıştan, hatırlanacağı üzere Bölüm 1.5'de (Şekil 1.9b) bahsedilmişti. Ayrıca, hücre büyüklüğü azaldıkça gerilmedeki başlangıç pik değeri belirginliğini kaybetmektedir (Şekil 3.3c). Hücre büyüklüğü daha da azaldıkça, Şekil 3.3d'de görülen 1.25 mm hücre boyutu değerinde pik değer tamamen kaybolmaktadır ve yapı BCC yapılarınkine benzer bir davranış sergilemektedir. Bu durumun dikey mikro tellerin boyunun, burkulma mekanizmasının ortaya çıkamayacağı derecede, hücre

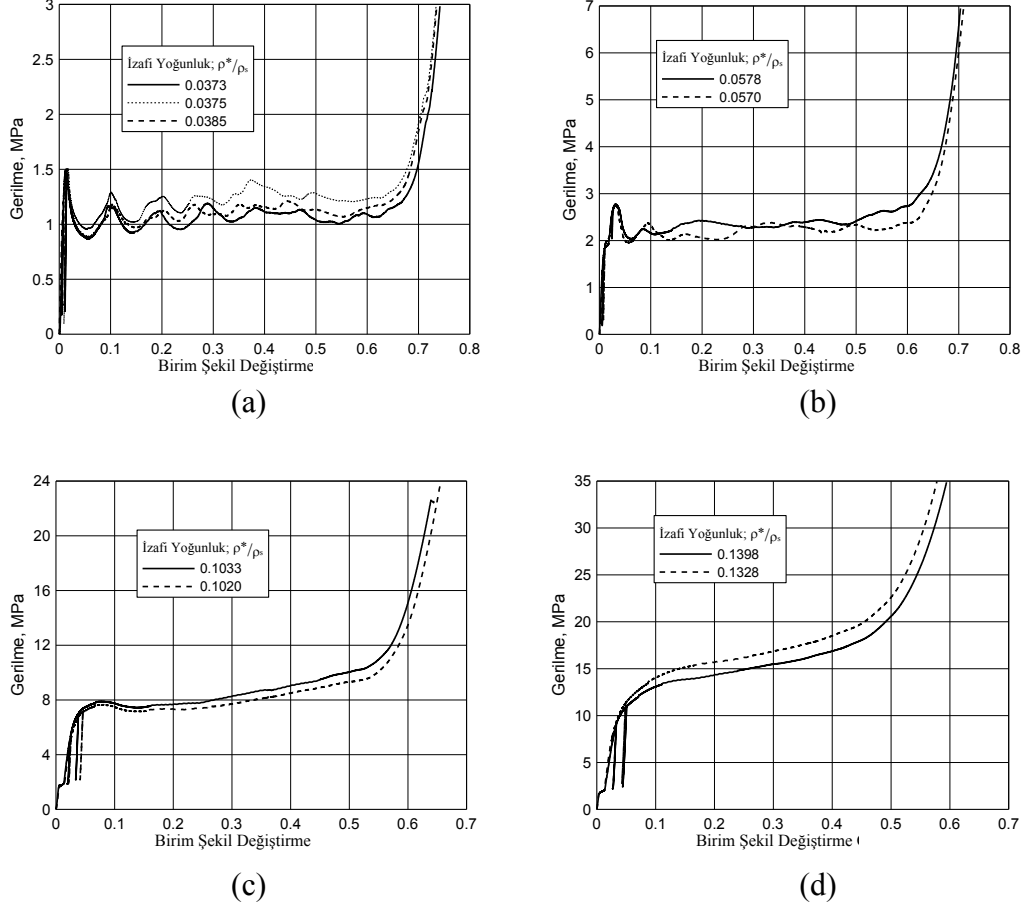
boyutuna paralel olarak kısılması sebebiyle olduğu söylenebilir. Üstelik mikro tellerin kesişim noktaları etrafındaki ergimemiş veya yarı ergimmiş mikro tozlarında dikey tellerin burkulmasını engeller vaziyette görev gördüğü düşünülmektedir. Tüm bunlar 1.25 mm hücre boyutuna sahip kafes yapının mekanik davranışını eğilme baskın deformasyon davranışına benzetmektedir.

Tablo 3.1. BCC kafes yapılar için deneysel sonuçların özeti

Hücre Boyutu (mm)	Numune Boyutu (mm ³)	Kütle (g)	İzafi Yoğun.	Teorik Tel Çapı, Eşitlik (2.12), (mm)	d/L oranı	Başlan. Elastisite Modülü (MPa)	Başlangıç Çökme Geril. (MPa)	Yoğun. Birim Şekil Değ.
2.5	20 ³	2.60	0.039	0.218	0.0872	19.780	0.523	0.656
		2.40	0.036	0.211	0.0844	22.414	0.408	0.67
		2.55	0.038	0.216	0.0864	17.646	0.471	0.65
		2.25	0.035	0.204	0.0816	19.696	0.390	0.685
		2.20	0.035	0.203	0.0812	17.856	0.360	0.691
2	20 ³	3.65	0.055	0.210	0.105	44.747	0.850	0.57
		3.55	0.054	0.208	0.104	39.257	0.789	0.569
		3.80	0.058	0.215	0.108	52.687	1.025	0.562
		2.90	0.036	0.185	0.092	30.600	0.522	0.63
		3.00	0.045	0.189	0.094	27	0.570	0.635
1.6	20.8 ³	6.25	0.085	0.210	0.131	138.80	2.280	0.512
		6.10	0.080	0.204	0.127	98	1.774	0.56
		5.85	0.078	0.196	0.123	94	1.700	0.563
		5.40	0.071	0.191	0.119	104.38	1.600	0.575
1.379	20.7 ³	8.40	0.114	0.212	0.154	284	4.000	0.485
		8.00	0.107	0.201	0.146	175	2.895	0.5
		6.90	0.095	0.194	0.141	176	2.630	0.524
		7.05	0.098	0.196	0.142	178	2.543	0.521
1.25	20 ³	8.75	0.133	0.209	0.167	370	5.890	0.486
		8.85	0.138	0.214	0.171	378	5.467	0.487
		8.75	0.133	0.209	0.167	364	5.580	0.481
		7.3	0.1141	0.195	0.156	220	4.86	0.504
		7.3	0.114	0.195	0.156	252	4.89	0.503

BCCZ kafes yapılarda hücre boyutu ve izafi yoğunluğa bağlı mekanik davranışlar BCC yapılarınkine benzerdir. Hücre boyutu ve izafi yoğunluk artıkça gerilme değerleri artarken, yoğunlaşma birim uzama değerlerinde ciddi düşüşler olmaktadır. Ayrıca

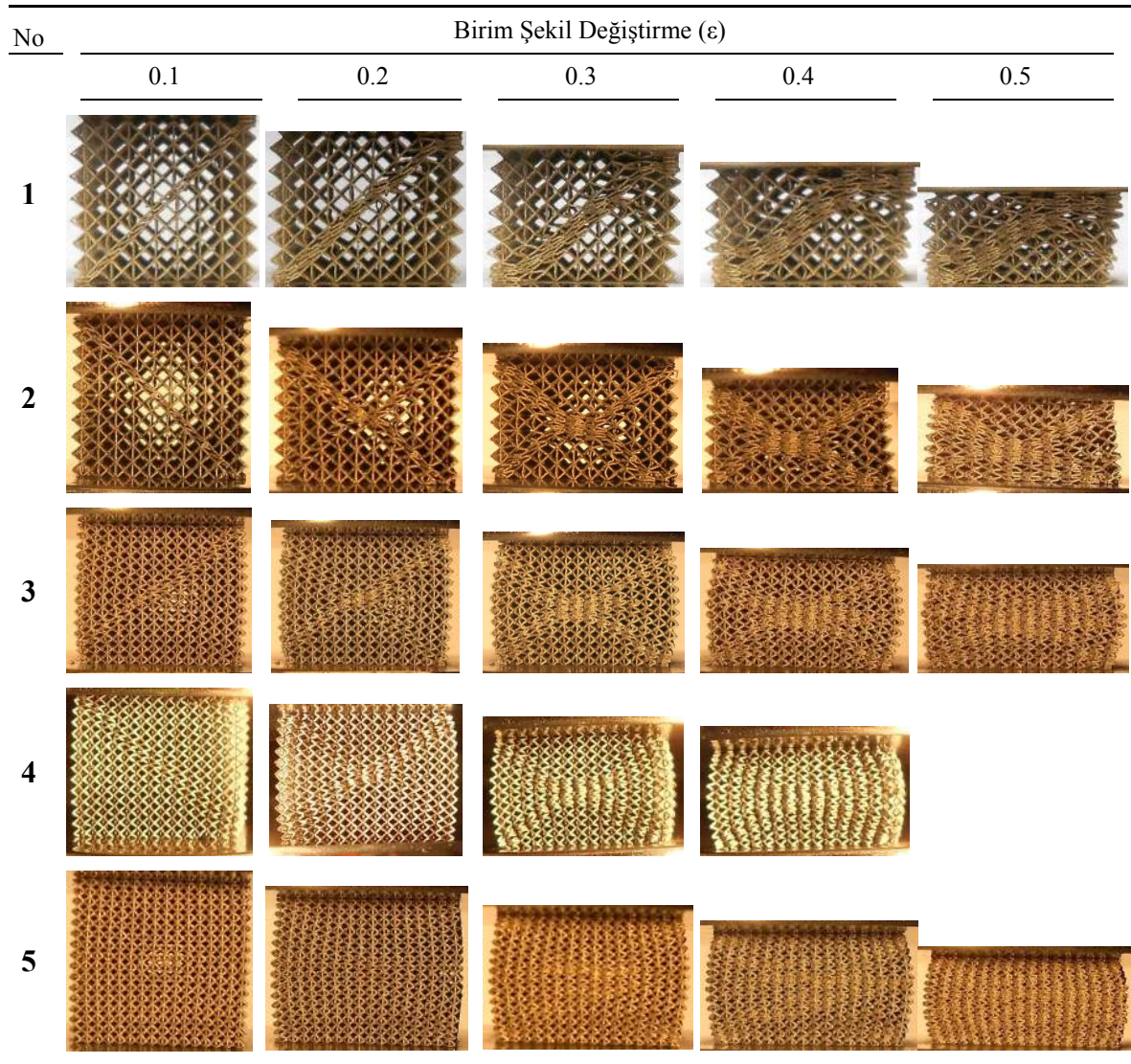
belirtmek gerekir ki aynı izafi yoğunluğa sahip bloklar hemen hemen aynı basma gerilme cevabına sahiptir. Bu da bu yapılar için deneylerin tekrarlanabilirliği olduğunu gösterir.



Şekil 3.3. BCCZ yapıların basma testlerinden elde edilen, hücre boyutları a) 2.5, b) 2, c) 1.5, d) 1.25 mm olan mikro kafes bloklara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini gösteren grafikler

Şekil 3.4’de farklı hücre boyutuna sahip BCCZ yapıları için basma testi esnasındaki deformasyon gelişimi, farklı birim şekil değiştirmelere ait deformasyon şekilleri ile temsil edilmektedir. Resimlerde tüm BCCZ kafes blokların deformasyon lokalleşmesine sahip oldukları açıkça görülmektedir. Fakat burada lokalleşme BCC yapılarıdakilerden farklı olmakla birlikte hücre boyutuna göre iki tip lokalleşme ortaya çıkmaktadır. 2.5, 2, 1.5 ve 1.379 mm hücre boyutuna sahip kafes bloklarda 45° ’lik açıda bloğun bir köşesinden diğer köşesine uzanan diyagonal bir kesme deformasyon lokalleşmesi oluşmakta iken 1.25 mm hücre boyutuna sahip blokta ise bloğun merkezinde deformasyon lokalleşmesi meydana gelmektedir. Bu kesme deformasyon lokalleşmesi, resimlerden de görülebildiği gibi

diyagonal üzerinde dikey mikro tellerin burkulması sebebiyle oluşmaktadır. 2.5 mm hücre boyutuna sahip blokta tüm deformasyon diyagonal olarak gelişmekte ve yoğunlaşmaya kadar sürmektedir. 2, 1.5 ve 1,379 mm hücre boyutlarına sahip bloklarda bloğun başlangıç deformasyonu 45° 'lik kesme bandı şeklinde olurken ($\epsilon=0.1$), sonrasında diğer köşelerden ikinci bir kesme bandı ($\epsilon \geq 0.2$) gelişmektedir. Oluşan bu kesme bantlarının gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde pik sayısını etkileyeceği muhakkaktır. Fakat bunların gerilme değerlerine etkisini belirlemek tam olarak mümkün değildir. Kesme bantlarının kafes bloklar ile basma plakası arasındaki sürtünme ve mikro tellerin içerdiği karmaşık yapısal kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.4. Farklı hücre boyutlu BCCZ kafes yapıların basma deformasyonunun gelişim aşamalarını gösteren resimler (1-2.5 mm, 2-2.0 mm, 3-1.5 mm, 4-1.379 mm, 5-1.25 mm)

BCCZ bloklarla gerçekleştirilen testlerde kullanılan numunelere ait fiziksel özellikler ve elde edilen sonuçların bir özeti Tablo 3.2’de verilmiştir. Mikro tellere ait çaplar, eşitlik (2.15) kullanılarak teorik olarak hesaplanmıştır. Tabloda dikkat çeken bir sonuç, 1.379 mm hücre boyutuna sahip blokların başlangıç çökme gerilmesi ve elastisite modülü değerleri 1.5 mm hücre boyutuna sahip bloklardan düşüktür. Görüldüğü gibi hücre boyutu küçük dahi olsa, izafi yoğunluğu daha büyük hücre boyutlu kafesten küçükse, mekanik özellikleri düşük olmaktadır. Bu izafi yoğunluğun, kafes malzemenin mekanik özellikleri üzerinde hücre boyutundan daha etkin bir parametre olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

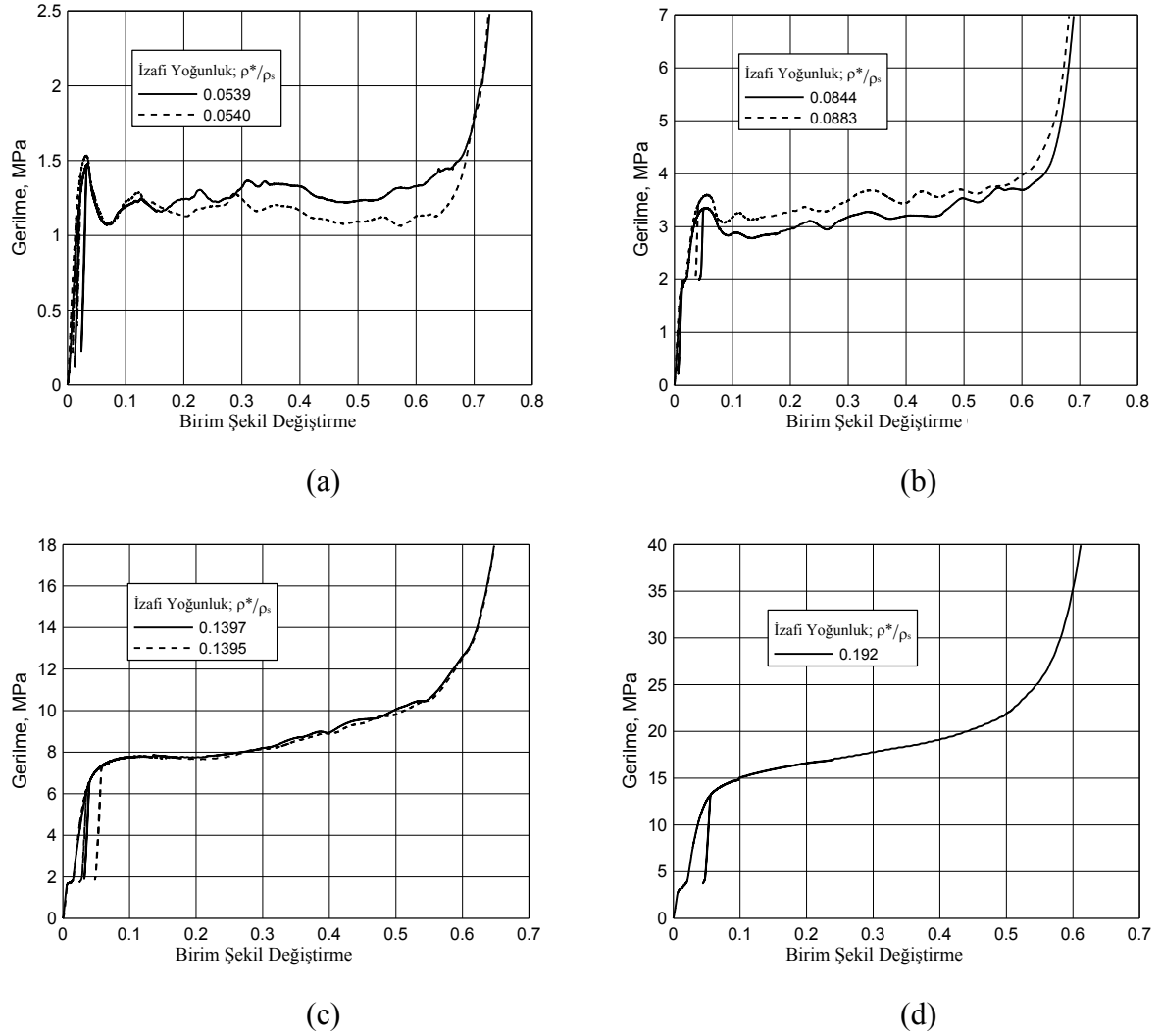
Tablo 3.2. BCCZ kafes yapılar için deneysel sonuçların özeti

Hücre Boyutu (mm)	Numune Boyutu (mm ³)	Kütle (g)	İzafi Yoğun.	Teorik Tel Çapı, Eşitlik (2.15), mm	d/L oranı	Başlangıç Elastisite Modülü (MPa)	Başlangıç Çökme Geril. (MPa)	Yoğunlaşma. Birim Şekil Değiştir.
2.5	20 ³	2.45	0.0383	0.204	0.0816	402.26	1.5	0.637
		2.40	0.0375	0.202	0.0808	435.55	1.436	0.635
		2.40	0.0373	0.201	0.0804	420	1.456	0.63
2	20 ³	3.65	0.057	0.201	0.1005	700	2.79	0.61
		3.70	0.0578	0.202	0.1010	750.56	2.771	0.615
1.5	21 ³	7.55	0.102	0.206	0.1373	1463.12	7.649	0.543
		7.65	0.1033	0.207	0.1380	1412.78	7.89	0.537
1.379	20.7 ³	5.85	0.0956	0.183	0.1327	1354	7.1	0.525
		6.15	0.1014	0.188	0.1363	1487.8	8.11	0.51
1.25	20 ³	8.5	0.1328	0.198	0.1584	2054.67	13.73	0.47
		8.95	0.1398	0.203	0.1624	2101.98	14.90	0.487

c. f₂BCC yapılar

f₂BCC yapılara ait 2.5, 2, 1.5 ve 1.25 mm hücre boyutlu bloklara ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.5’te verilmiştir. f₂BCC yapılarda BCCZ yapılara benzer davranış sergilemektedir. Büyük hücre boyutları için (örneğin 2.5 ve 2 mm) yüklemenin başlangıcında bir pik gerilme değeri oluşmaktadır. Bu davranış büyük hücreli f₂BCC kafeslerde çeki-bası burkulma dominant deformasyon mekanizmasının (stretching dominated) yüklemenin başlangıcında etkin olduğunu göstermektedir. 1.5 ve 1.25 mm

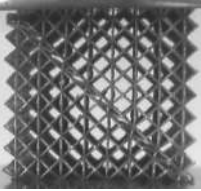
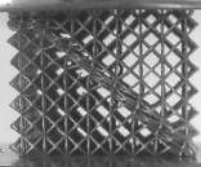
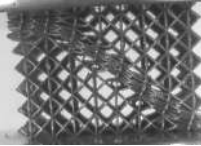
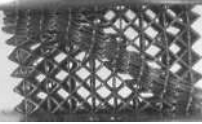
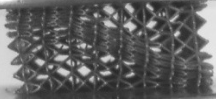
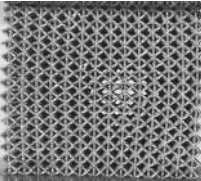
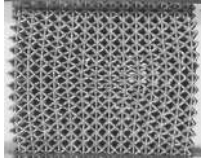
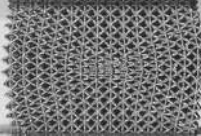
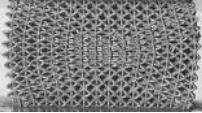
hücre boyutuna sahip bloklar ise eğilme dominant yapılara benzer davranış sergilemektedir. BCCZ yapılarda bahsedildiği gibi birim hücredeki mikro tellerin boylarının burkulma mekanizmasını desteklemeyecek derecede kısalmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.5. f_2 BCCZ yapıların basma testlerinden elde edilen, hücre boyutları a) 2.5, b) 2, c) 1.5, d) 1.25 mm olan mikro kafes bloklara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini gösteren grafikler

Deformasyon mekanizmaları açısından bakıldığında f_2 BCCZ yapıların deformasyon gelişiminin BCCZ yapılara benzediği görülmektedir (Şekil 3.6). 2.5 ve 2 mm hücre boyutuna sahip kafes bloklarda deformasyonun diyagonal kesme bantları şeklinde başlamakta ve gelişmektedir. Buna karşın 1.5 mm hücre boyutundaki blok için deformasyon lokalleşmesi bloğun merkezinde oluşmaktadır.

BCCZ ve f_2 BCCZ yapılarının deformasyon lokalleşmeleri karşılaştırılacak olursa, her iki hücre tipi için de hücre boyutu azaldıkça ve buna bağlı olarak izafi yoğunluk arttıkça deformasyon mekanizması bloğun merkezinde lokalleşmeye dönüşmektedir. Ayrıca, deformasyon lokalleşmesinin izafi yoğunluğa bağlılığı farklı kafes konfigürasyonları açısından da şu şekilde açıklanabilir. Örneğin, BCCZ yapı 1.5 mm değerinde kesme bandı şeklinde çökme deformasyonu gösterirken, aynı hücre boyutunda f_2 BCCZ yapı bloğun merkezinde deformasyon lokalleşmesi göstermektedir. Bu durum f_2 BCCZ birim hücre yapısının BCCZ birim hücreye göre neredeyse iki kat sayıda mikro tel içermesinden kaynaklanmaktadır.

No	Birim Şekil Değiştirme (ϵ)				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1					
2					
3					

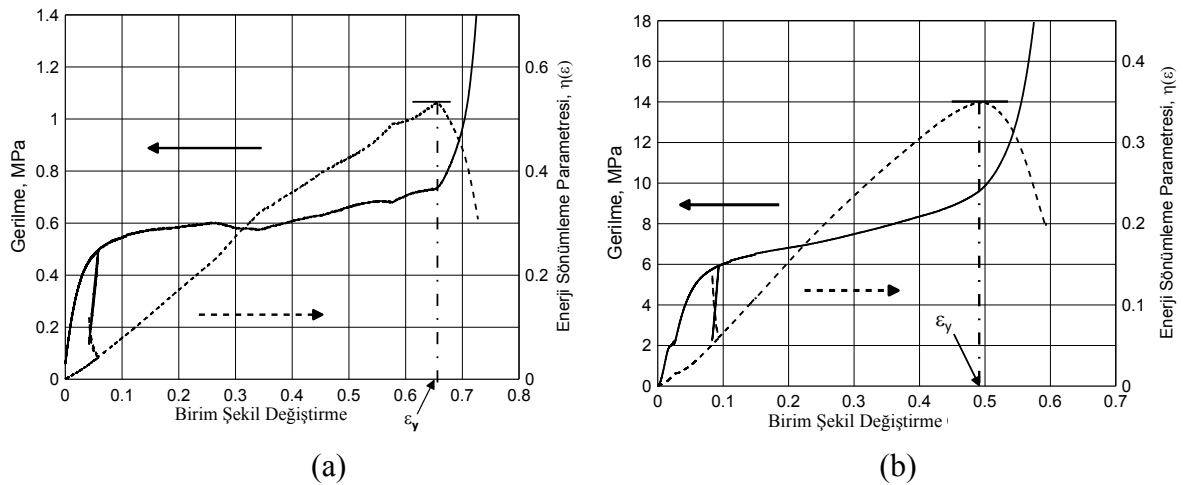
Şekil 3.6. Farklı hücre boyutlu f_2 BCC kafes yapıların basma deformasyonunun gelişim aşamalarını gösteren resimler (1-2.5 mm, 2-2 mm, 3-1.5 mm)

f_2 BCCZ kafes yapılar için gerçekleştirilen testlere ait numunelerin fiziksel özellikleri ve elde edilen sonuçların özeti Tablo 3.3'de verilmiştir. Bu yapı için teorik bağıntılar geliştirilmediğinden tablo teorik çap değerlerini içermemektedir. Tablodan görülebileceği üzere f_2 BCCZ kafes blokları için gerçekleştirilen testlerin tekrarlanabilirliği diğer kafes bloklarınkinden olduğu gibi izafi yoğunluğa bağlı olarak oldukça yüksektir.

Tablo 3.3. f_2 BCC kafes yapılar için deneysel sonuçların özeti

Hücre Boyutu (mm)	Numune Boyutu (mm ³)	Kütle (g)	İzafi Yoğunluk	Başlangıç Elastisite Modülü (MPa)	Başlangıç Çökme Geril. (MPa)	Yoğunlaşma Birim Şekil değiştirme
2.5	20 ³	3.45	0.0539	144.35	1.48	0.646
		3.45	0.054	157.27	1.533	0.656
2	20 ³	5.4	0.0844	323.6	3.359	0.621
		5.65	0.0883	382.65	3.6	0.628
1.5	21 ³	10.35	0.1397	615.68	7.73	0.555
		10.35	0.1395	628.26	7.62	0.554
1.25	15 ³	5.3	0.192	1120.1	14.23	0.502

Şekil 3.7’de yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerlerinin hesaplanma şeklini gösteren grafikler hem 2.5 hem de 1.25 mm hücre boyutu için verilmektedir. Grafikler BCC yapılara aittir. Kesiksi çizgiler, eşitlik (1.1) vasıtasıyla hesaplanan enerji sönümleme parametresini göstermektedir. Görüldüğü üzere, enerji sönümleme parametresine ait eğrinin gerilme değerinin pik yaptığı değere karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri yoğunlaşma birim şekil değiştirme olarak alınmıştır. Bu prosedür tüm kafes konfigürasyonları için her teste uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3’de sunulmuştur. Bu prosedürün en önemli avantajı Şekil 3.7b’de verilen 1.25 mm hücre boyutuna sahip kafes yapıya ait gerilme eğrisi gibi, yoğunlaşma noktasının belirgin olmadığı durumlarda kolayca bir fikir vermesidir.

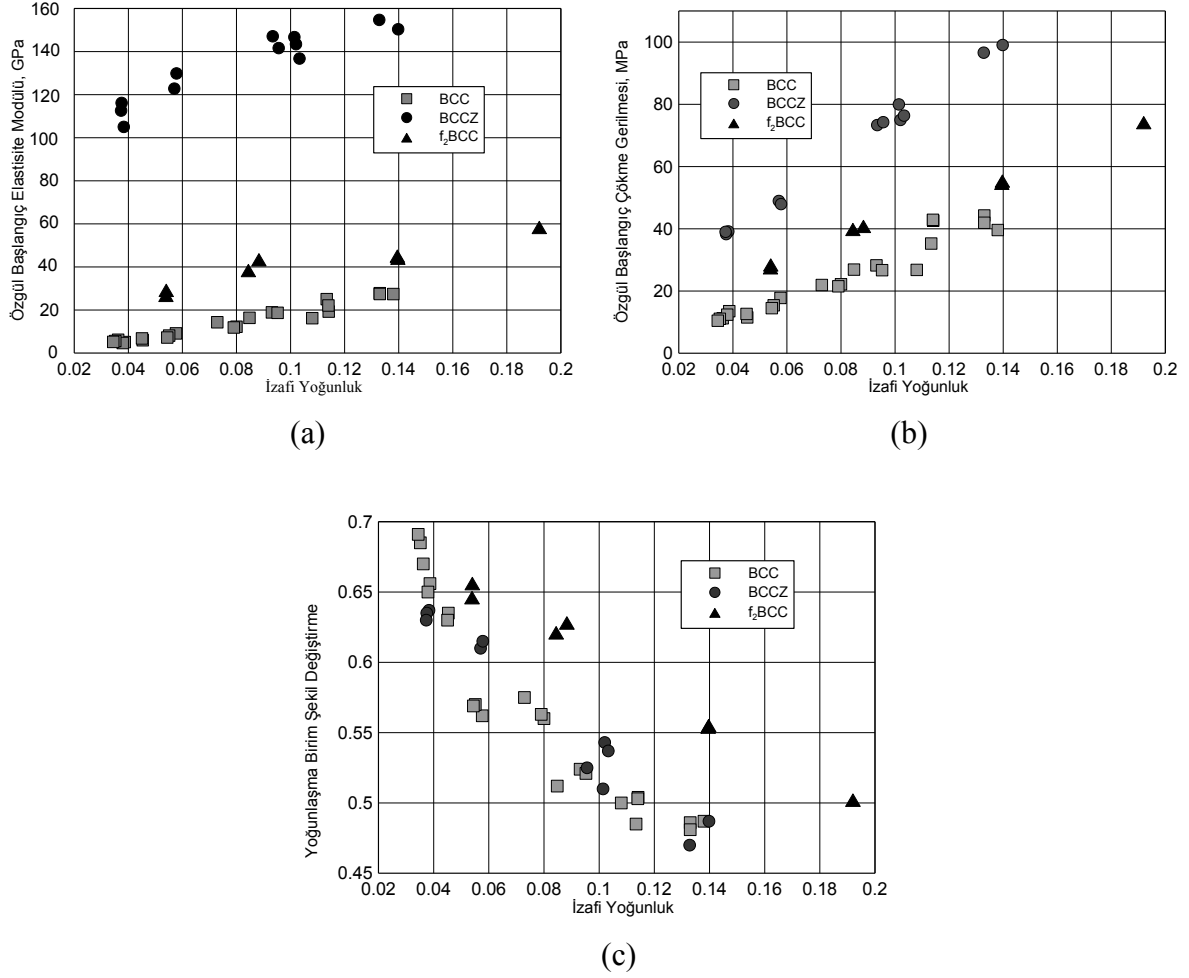


Şekil 3.7. Yoğunlaşma birim şekil değiştirmelerin hesaplanma şeklini gösteren BCC kafes yapısına ait örnek grafikler; a) 2.5 mm b) 1.25 mm hücre boyutu için

3.2. Farklı Kafes Konfigürasyonlarının Davranışlarının Karşılaştırılması

BCC, BCCZ ve f_2 BCC mikro kafes konfigürasyonlarının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması Şekil 3.8’de verilmektedir. Farklı malzemelerin veya farklı mikro kafes yapısına sahip yapıların mukavemet özelliklerin karşılaştırılmasında en etkin büyüklükler, Şekil 3.8a ve Şekil 3.8b’den görüldüğü gibi özgül elastisite ve özgül çökme gerilmeleridir. Bu büyüklükler mikro kafes yapıların karşılaştırılmalarında kullanılmıştır. Burada özgül elastisite ve özgül çökme gerilmeleri, deneysel testlerden elde edilen elastisite ve çökme gerilmelerinin, sırasıyla numunenin izafi yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilmiştir. Görüldüğü üzere Şekil 3.8’de karşılaştırmaları verilen tüm mekanik özellikler her mikro kafes konfigürasyonu için izafi yoğunlukla lineer şekilde değişmektedir. Hem özgül başlangıç elastisite modülü hem de özgül başlangıç çökme gerilmesi açısından BCCZ mikro kafes yapısı en iyi davranışı göstermekte iken BCC mikro kafes yapısı en kötü performansa sahiptir. Örneğin 0.06 izafi yoğunluk değeri için, BCCZ mikro kafes yapısı BCC kafes yapısından yaklaşık 15 kat ve f_2 BCC kafes yapısından ise 4 kat daha fazla özgül başlangıç elastisite modülüne sahiptir (Şekil 3.8a). Çökme gerilmesi açısından bu oran düşmekle birlikte, yinede 0.06 izafi yoğunluk değerinde BCCZ mikro kafes yapısı BCC kafes yapısından yaklaşık % 150 ve f_2 BCC kafes yapısından ise % 40 daha fazla başlangıç çökme gerilmesi değerlerine sahip olmaktadır. Bu sonuçlar tüm izafi yoğunluk değerleri için geçerliliğini korumaktadır. BCCZ mikro kafes yapının bu yüksek performansı önceki bölümde de bahsedildiği gibi hücre ortasından geçen dikey mikro tellerin varlığından ve bu dikey tellerin eğilme momentinden ziyade aksel bası yükü taşımasından kaynaklanmaktadır.

Yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerleri açısından bakıldığında ise tüm kafes konfigürasyonları için izafi yoğunluk arttıkça lineer bir azalış söz konusudur (Şekil 3.8c). İlginç bir sonuç, dikey mikro tellerin varlığına rağmen BCC ve BCCZ mikro kafes yapılarının hemen hemen aynı yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerlerine sahip olmasıdır. f_2 BCC mikro kafes yapısı aynı izafi yoğunluk değeri için en yüksek yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerlerine sahiptir. Bu durum aynı izafi yoğunluk değerleri için f_2 BCC kafes yapısının hücre büyüklüğü değeri diğer iki kafes yapısından yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.8. BCC, BCCZ ve f_2 BCC mikro kafes yapıların a) Özgül başlangıç elastisite modülü, b) Özgül başlangıç çökme gerilmesi, c) Yoğunlaşma birim şekil değiştirmeler gibi mekanik özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı olarak karşılaştırılması

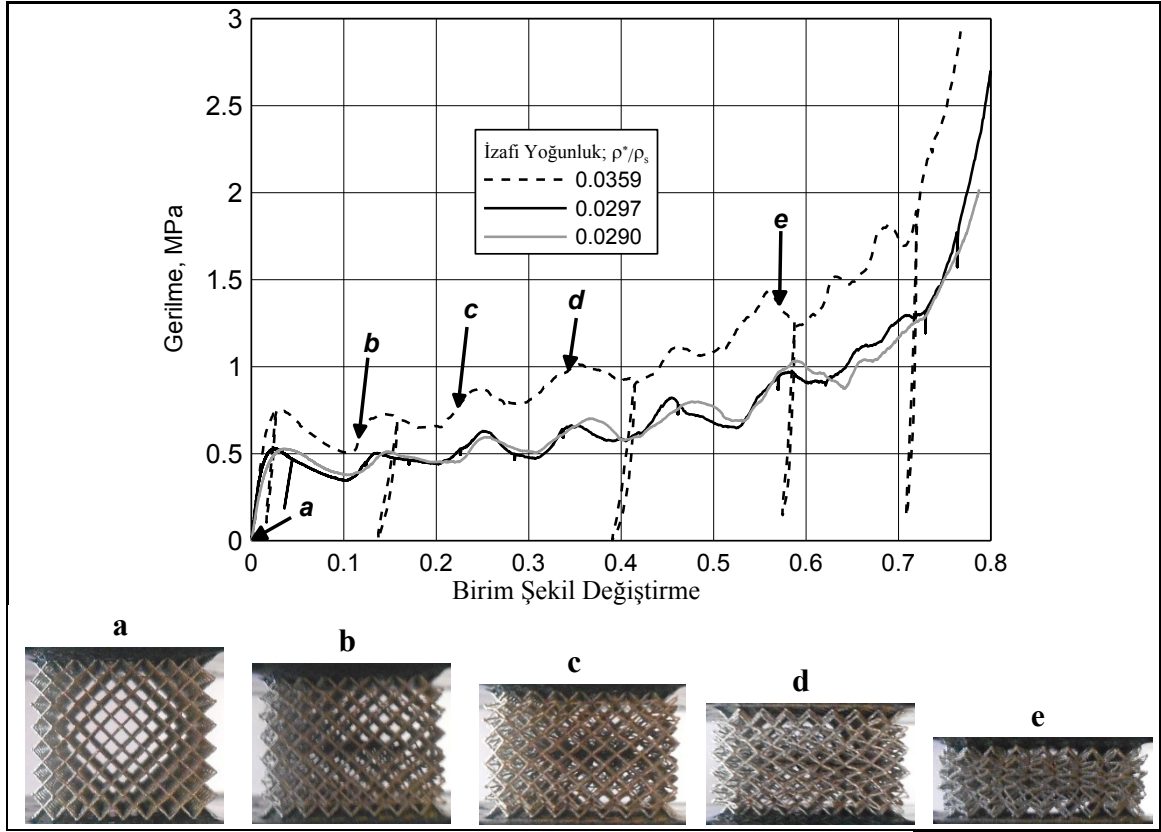
3.3. Sınırlandırılmış Blokların Basma ve Kesme Davranışlarının İncelenmesi

Sınırlandırılmış numunelerle yapılan basma, kesme ve çekme testlerine ait sonuçlar ayrı ayrı gerilme-birim şekil değiştirme değişimleri ve deformasyon açısından değerlendirilecektir. Sınırlandırılmış numunelerle yapılan tüm testlerde aynı geometrik özelliklere sahip kafes bloklar kullanılmıştır. Yani, bir kenarı 20 mm uzunluğa sahip kübik kafes blokların kullanıldığı bu testlerde yükleme yönünde numunenin aktif boyu " $L_z=17.5$ mm" olarak tayin edilmiştir (Şekil 2.5). Ayrıca sınırlandırılmış testler hücre boyutunun mekanik cevaba etkisini göstermek için, genellikle 2.5 mm ve 1.25 mm hücre boyutuna sahip mikro kafes yapılar için gerçekleştirilmiştir.

a. Basma sonuçları açısından inceleme;

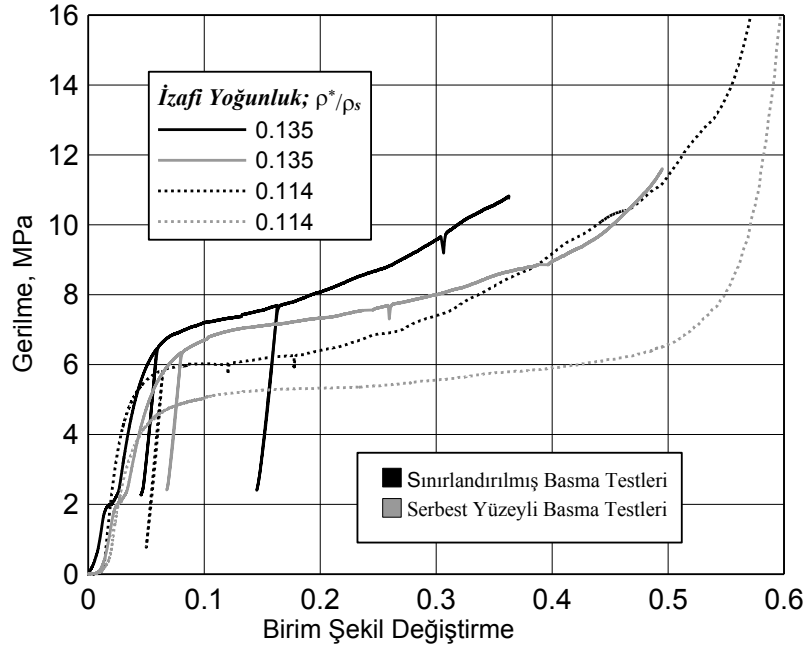
2.5 mm hücre boyutuna sahip BCC mikro kafes bloklarla gerçekleştirilen sınırlandırılmış basma testlerine ait karşılaştırma eğrileri ve belirli birim şekil değiştirme değerlerinde elde edilen deformasyon resimleri Şekil 3.9’da verilmiştir. İki farklı izafi yoğunluğa sahip kafes blok üzerinden bası testleri gerçekleştirilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere BCC kafes bloklar için gerçekleştirilen sınırlandırılmış basma testlerinin sonuçları BCC kafes yapıların serbest yüzeyli test durumundakinden (Şekil 3.1a) davranış olarak oldukça farklılık göstermektedir. Sınırlandırılmış numuneler şekilden de görüldüğü gibi başlangıçta bir pik gerilme durumundan sonra gerilmede belli bir derecede düşüş göstermektedir. Ardında şekil değişimi arttırıldıkça, meydana gelen ardışık çökme mekanizmaları sebebiyle artan yönde dalgalı bir gerilme eğrisi ortaya çıkmaktadır. Bu davranış mekanizması (pik gerilme değerleri ve düşüşleri), daha önce de bahsedildiği gibi kafes blokta mikro tellerin çeki bası yüklemelerine maruz kaldığı ve bunun sonucunda burkulma mekanizmasının eğilme mekanizmasından daha etkin olduğunu göstermektedir. Bu durum, deformasyon şekillerinde de açıkça ortaya çıkmaktadır. Şekilden kolayca fark edileceği gibi ilk çökme ve deformasyon bloğun merkezindeki mikro tellerin burkulması ile meydana gelmektedir (**b** ile numaralandırılmış resim). Ardından, deformasyon merkezde yoğunlaşmakta ve gelişim göstermektedir. Ayrıca resimlerin dikkatli incelenmesinden de fark edilebileceği gibi dış yüzeydeki mikro teller eğilme deformasyona sahiptir (**d** ve **e** ile numaralandırılmış resimler).

Grafikte dikkat çeken bir diğer nokta ise, izafi yoğunluk arttıkça gerilme eğrisinin düşük izafi yoğunluklu bloklarinkine göre bir skala ile çarpılmış gibi öteleme yapmasıdır. Yani, farklı izafi yoğunluklara rağmen gerilme eğrilerinin eğilimleri birbirine oldukça benzer çıkmaktadır. Bu durum her iki izafi yoğunluğa sahip bloktaki deformasyon ve çökme mekanizmalarının aynı olduğunu göstermektedir. Son olarak sınırlandırılmış basma testlerinde de deneylerin tekrarlanabilirliğinin mükemmel olduğu, şekilde sunulan izafi yoğunluklarının 0.0290 ve 0.0297 olan blokların basma testlerinden elde edilen sonuçlardan ortaya çıkmaktadır.



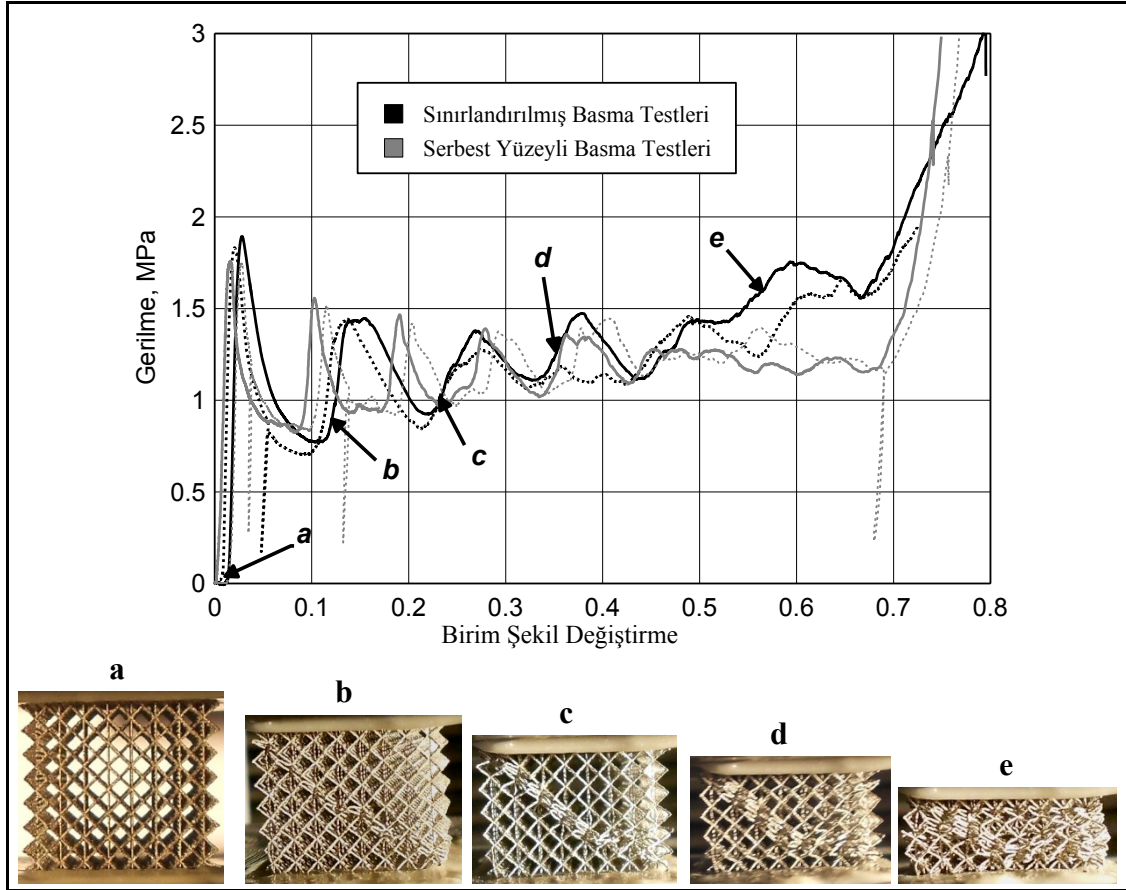
Şekil 3.9. Sınırlandırılmış BCC kafes bloklara ait deformasyonun gelişimini içeren basma testleri sonuçları ($L=2.5$ mm)

1.25 mm hücre boyutuna sahip kafes bloklar için sınırlandırılmış basma testleri, serbest yüzeyli testlerin sonuçları ile karşılaştırılması için Şekil 3.10’da verilmiştir. Sonuçlar 0.135 ve 0.114 gibi iki farklı izafi yoğunluğa sahip bloklar için değerlendirilmekte olup şekilde açık renk ile çizilen eğriler serbest yüzeyli numunelerin sonuçlarını temsil etmektedir. Grafikten çıkan en dikkat çekici sonuç 1.25 mm hücre boyutuna sahip blokların sınırlandırılmış bası davranışının genel eğimi serbest yüzeyli numune ile yapılan test sonuçlarıyla oldukça benzerdir. Yani 2.5 mm hücre boyutuna sahip bloklarınki gibi gerilme değerlerinde pik değerler ortaya çıkmamaktadır. Bu durum 1.25 mm durumunda sınır tabaka etkilerinin etkin deformasyon mekanizmasını etkilemediği ve bunun sonucunda mikro tellerde hala eğilme deformasyonunun etkin olduğu ortaya çıkmaktadır. Sınır tabaka etkileri yalnızca Şekil 3.10’dan da görüleceği üzere, gerilme değerlerinin serbest yüzeyli numunelere göre az miktarda da olsa artmasına neden olmaktadır. Buna karşılık en önemli etkisi yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerlerinde olmaktadır. Yani kararlı çökme bölgesinin eğimi, serbest yüzeyli numunelerinkinden daha yüksek çıkmaktadır.



Şekil 3.10. BCC mikro kafes yapısına ait sınırlandırılmış ve serbest yüzeyli basma testlerinin 1.25 mm hücre boyutu açısından karşılaştırılması

BCCZ mikro kafes yapısına ait sınırlandırılmış ve serbest yüzeyli basma test sonuçlarının 2.5 mm hücre boyutu için karşılaştırıldığı grafik ve belirli birim şekil değiştirme değerlerinde elde edilen deformasyon resimleri Şekil 3.11’de görülmektedir. Ayrıca grafik karşılaştırma amaçlı olarak BCCZ mikro kafes yapısına ait serbest yüzeyli basma test eğrilerini de (açık renkli olanlar) içermektedir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi sınırlandırılmış ve serbest yüzeyli basma test sonuçları, hem gerilme eğrisi hem de deformasyon mekanizması açısından neredeyse aynı sonucu vermektedir. Yalnızca, yoğunlaşma noktasına yakın bölgede sınırlandırılmış numunelerde serbest yüzeyli numunelere göre gerilme artışları meydana gelmektedir. Bu benzerlik BCCZ mikro kafes yapılarda başlangıçta dikey tellerde meydana gelen burkulma mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Sınır tabakanın varlığı dikey tellerdeki burkulma mekanizmasına herhangi bir etki yapmadığından dolayı her iki numune tipide aynı yükleme eğrisine sahip olmaktadır. Bu sebeple BCCZ yapıların sınır tabaka veya benzer bir etki olabilecek sürtünme etkilerine karşı duyarsız olduğu söylenebilir. Deformasyon resimlerine bakılacak olursa, başlangıç çökmesi, bloğun bir köşesinden diğer köşesine uzanan diyagonal bir kesme bandı şeklinde meydana gelmekte (**b** ile numaralandırılmış şekil) ve aynı bant üzerinde yoğunlaşma bölgesine kadar gelişim göstermektedir. Bu tamamen BCCZ kafes yapıların serbest numunelerinden elde edilen deformasyon mekanizmasına benzerdir.



Şekil 3.11. Sınırlandırılmış BCCZ kafes bloklara ait deformasyonun gelişimini içeren basma testleri sonuçları ($L=2.5$ mm)

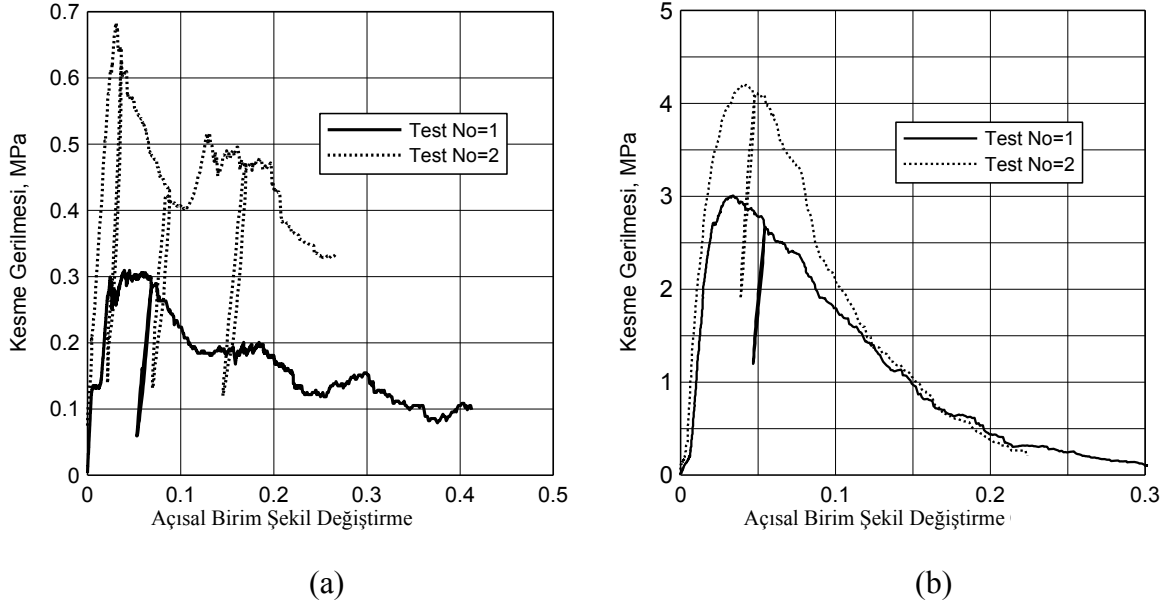
b. Kesme sonuçları açısından inceleme;

Kesme testleri de önceki sınırlandırılmış testler gibi yalnızca 2.5 ve 1.25 mm hücre boyutuna sahip BCC mikro kafes yapılar kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 3.12). Grafiklerden anlaşılabileceği üzere kesme testleri basma testlerinden oldukça farklı sonuçlar vermektedir. Hem 2.5 mm hem de 1.25 mm hücre boyutuna sahip bloklar, başlangıçta gerilme değerinde bir pik değere ulaşmakta ve ardından hızlıca yük taşıma kapasitelerini kaybetmektedir. 2.5 mm hücreli yapılar, açılal şekil değiştirme değeri arttıkça, tekrar toparlanma eğilimi göstermelerine rağmen 1.25 mm hücreli yapılar için yük taşıma kapasitesi sürekli bir düşüş eğilimine sahiptir ve düşük bir deformasyon miktarından sonra gerilme değerleri tamamen sıfıra yaklaşır (Şekil 3.12b). Ayrıca yapılan testler göstermiştir ki, kesme durumunda her iki hücre boyutu için deneylerin tekrarlanabilirliğinin çok düşüktür. Bu durum mikro kafes blokların kesme yüklemesi altında ortaya çıkan deformasyon mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.13'te kesme yüklemesi altında

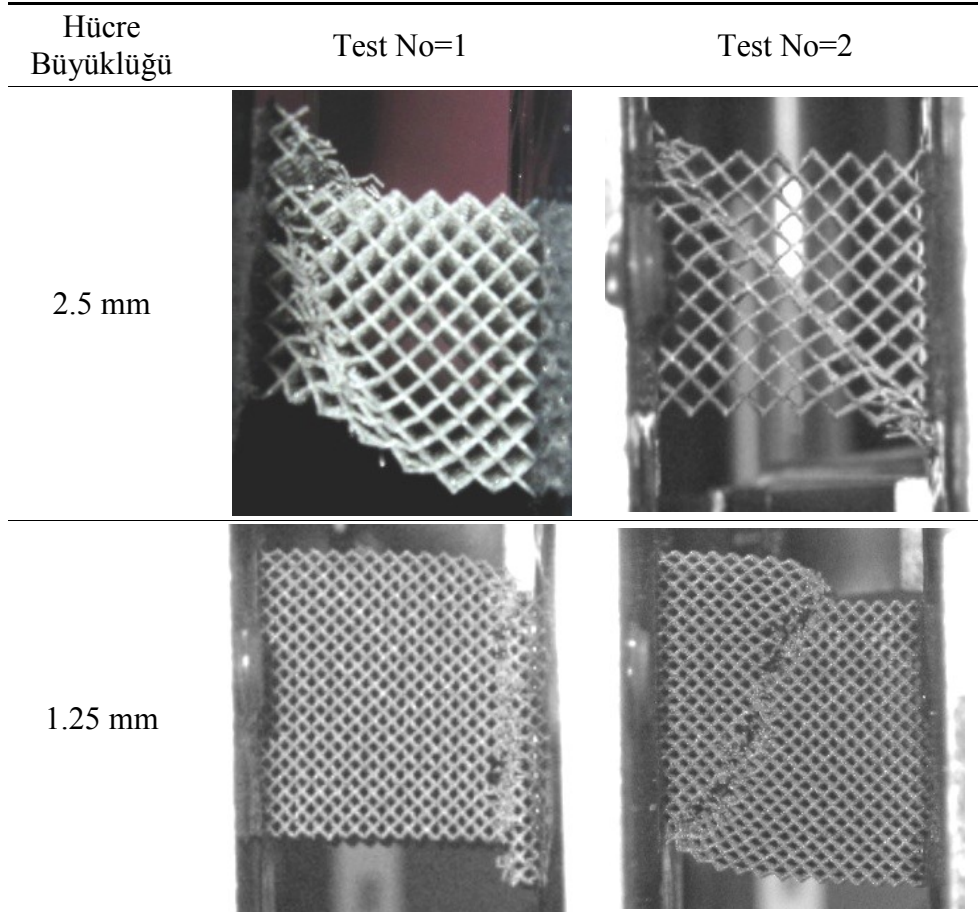
ortaya çıkan deformasyon mekanizmalarına ait resimler görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi gerilme eğrileri ve deformasyon mekanizmaları birebir ilişkilidir. Örneğin, 2.5 mm hücre boyutuna ait testlerden 1 numaralı teste ait numunenin deformasyonu bir kenar boyunca kesme ve mikro tellerin kopması şeklinde vuku bulmaktadır. Buna karşı 2 numaralı teste ait numune diyagonal kesme bandı şeklinde deforme olmakta ve bu diyagonal bandın üzerindeki mikro tellerin burkulmaları ile çökmeye maruz kalmaktadır. Şekil 3.12a'da görüldüğü üzere diyagonal deformasyona maruz kalan numune diğerine göre çok daha fazla gerilme değerlerine sahip olmaktadır. Benzer durum 1.25 mm hücre boyutuna sahip bloklar için de geçerli olmaktadır (Şekil 3.13b). Görüldüğü gibi 1 numaralı teste ait numune bir köşesi üzerinden tamamıyla kesme deformasyonuna maruz kalmakta iken 2 numaralı teste ait numune tam olarak gerçekleşmemekle birlikte diyagonal bir kesme deformasyonu gösterme eğilimindedir. Bunun sonucunda da 2 numaralı numune diğerine göre daha yüksek gerilme değerine ulaşmaktadır. Buradan kolayca şu sonuca varılabilir ki, 1.25 mm hücre boyutlu bloklar en yüksek kesme gerilmesi değerlerine, tam diyagonal kesme mekanizmasının etkin olduğu durumda ulaşır. Yapılan testlerin hiçbirinde 1.25 mm hücre boyutuna sahip bloklar için tam diyagonal kesme mekanizması elde edilememiştir.

Şekil 3.13'te verilen deformasyon mekanizmalarının ortaya çıkmasında en büyük etken mikro kafes yapıların içerdiği aşırı derecedeki yapısal kusurlardır. Ayrıca mikro tellerdeki çentikler kesme yüklemesi durumunda kesme bandının uç kısımlarındaki mikro tellerin kolayca kopmasına neden olmaktadır (2.5 mm hücre boyutuna sahip bloklar için). Bu kopmalarda Şekil 2.12a'daki gibi gerilme değerlerinde düşüşe yol açmaktadır. 1.25 mm için kopmalar, deformasyon mekanizmasından bağımsız olarak kesme bandının üzerindeki tüm mikro tellerde oluşmaktadır. Hatırlanacağı üzere bası testlerinde mikro tellerde kopma oluşmamakta veya yapının bası davranışını önemli bir derecede etkilemeyecek düzeyde oluşmaktadır.

Sonuç olarak, yapılan kesme testlerinde kafes blokların mekanik cevabı ile ortaya çıkan kesme deformasyon mekanizması arasında yakın ilişkinin olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 3.12. Kesme testi sonuçları; a) Hücre boyutu 2.5 mm ($\rho^*/\rho_s=0.0359$), b) Hücre boyutu 1.25 mm ($\rho^*/\rho_s=0.133$)

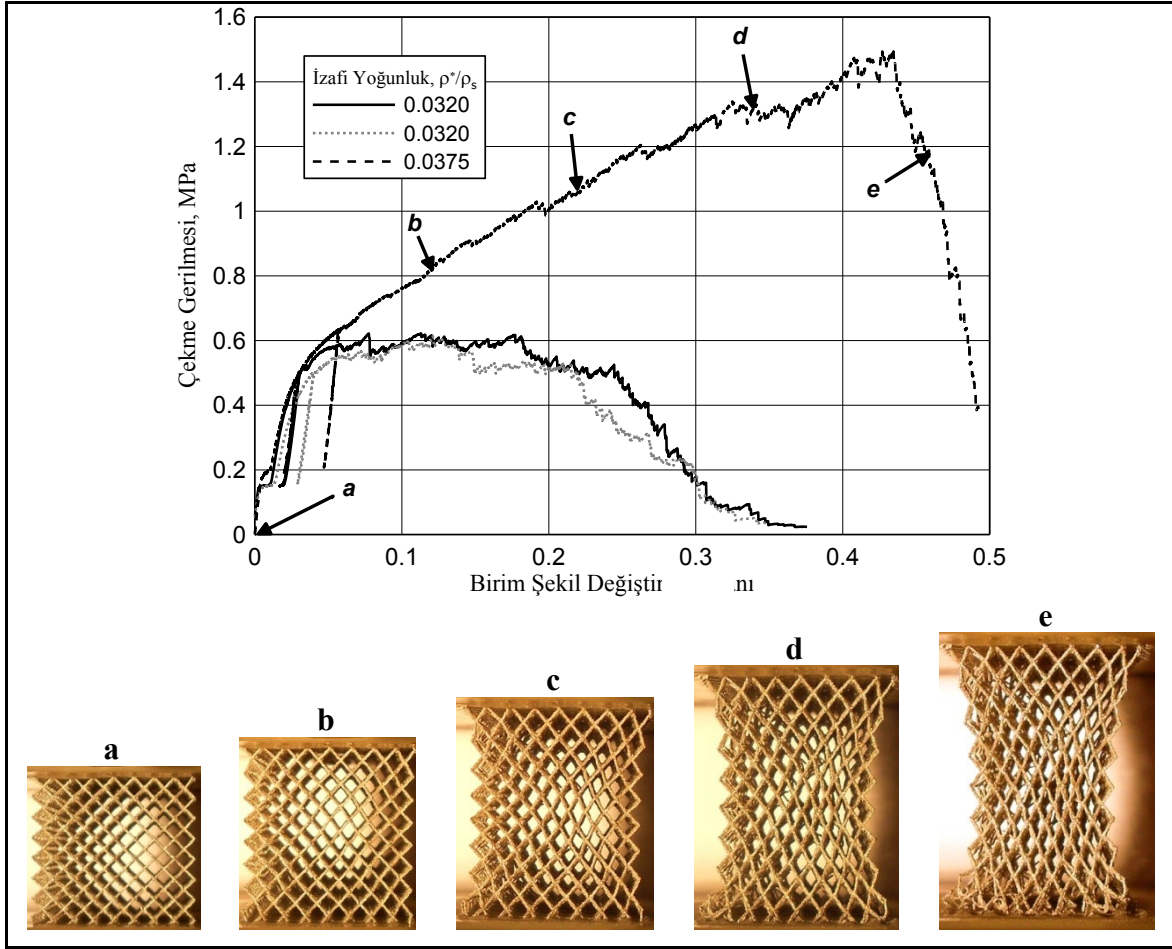


Şekil 3.13. Kesme testlerinden elde edilen deformasyon mekanizmalarından bazıları

c. Çekme sonuçları açısından inceleme;

Sınırlandırılmış numunelerle gerçekleştirilen bir başka yükleme testi çekme testleridir. Çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve deformasyon mekanizmasının gelişim aşamaları Şekil 3.14’de verilmiştir. Testler, izafi yoğunluğun etkisini göstermek için 0.0320 ve 0.0375 gibi izafi yoğunluklara sahip iki farklı BCC mikro kafes numunelerle Arcan test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14’den de görüldüğü üzere izafi yoğunluk çekme testinde deformasyon mekanizması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Düşük izafi yoğunluk durumunda, akma gerilmesinden hemen sonra gerilmelerde düşüş başlamakta ve kafes yapının, artan şekil değiştirme ile yük taşıma özelliği kaybolmaktadır. Yüksek izafi yoğunluğa sahip blok ise akmadan sonra hızlı bir şekilde gerilme artışı göstermektedir. Bu esnada blok ortasında büzülme görülmektedir (**d** ve **e** ile numaralandırılmış resimler) ve birim hücrelerin hücre açılarında ciddi artış meydana gelmektedir. Kolayca anlaşılacağı üzere bu esnada mikro tellerde eğilme gerilmelerinin yanında eksenel çekme gerilmeleri gittikçe artış göstermektedir. Gerilmeler mikro tellerin taşıyamayacağı düzeye ulaştınca, mikro tellerde ani toplu kopmalar başlamasıyla yapı yük taşıma kapasitesini hızlı bir şekilde kaybetmektedir. Düşük izafi yoğunluğa sahip kafes blokların erkenden yük taşıma kapasitelerini kaybetmelerinin nedenleri olarak, yapısal kusurların yanında daha ince mikro tel çapına sahip olmaları ve bunun sonucunda mikro çatlak veya çentiklere daha hassas hale gelmeleri söylenebilir.

Basma testleriyle çekme testleri sonuçları karşılaştırılırsa, çekme ve basma davranışları farklı karakteristiklere sahip oldukları görülmüştür. Şekil 3.9’da görüldüğü üzere 2.5 mm hücre boyutlu BCC kafes yapılar dalgalı bir gerilme davranışına sahiptir. Çekme durumunda akma gerilmesinden sonra hızlı bir gerilme artışı devam etmektedir. Ayrıca her iki yüklemenin akma gerilmeleri de farklı olmaktadır. Örneğin, 0.0359 izafi yoğunluklu malzeme yaklaşık 0.75 MPa çökme gerilmesine sahipken (Şekil 3.9), 0.0375 izafi yoğunluğuna sahip kafes blok çekme yüklemesi altında 0.60 MPa gerilme değerinde akmaya başlamaktadır. Son olarak, 0.0320 izafi yoğunluk için elde edilen eğriler çekme testlerinin de tekrarlanabilirliğinin olduğunu göstermektedir.

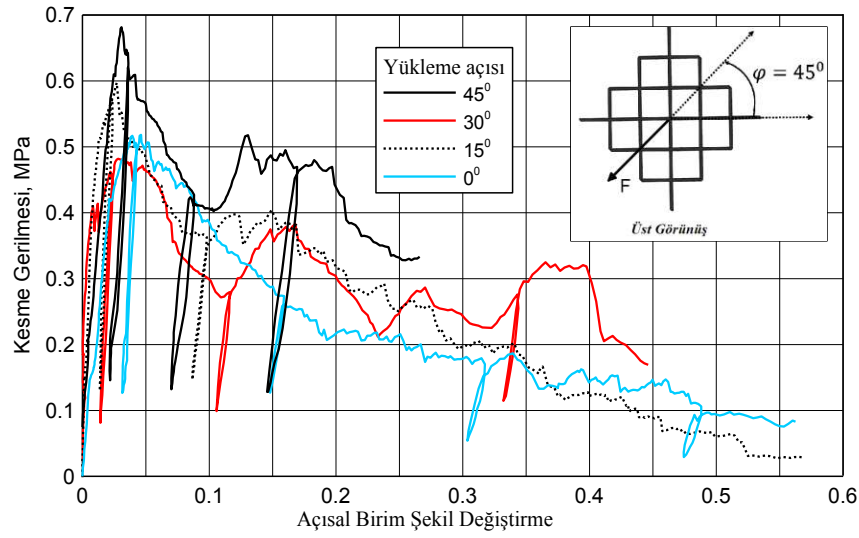


Şekil 3.14. Çekme test sonuçlarının karşılaştırılması ve deformasyon mekanizmasının gelişimi

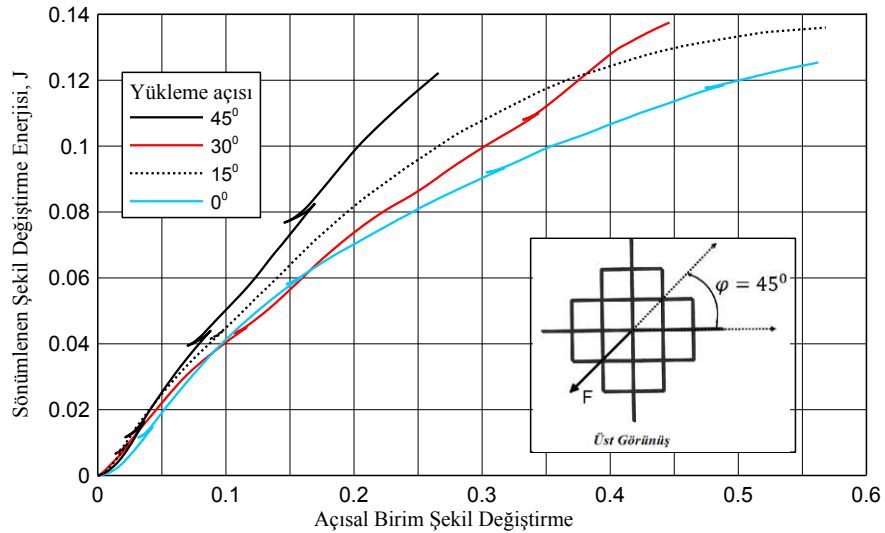
3.4. Kesme Yüğü Açısının BCC Yapıların Davranışına Etkisi

Saf kesme yüklemesine maruz kalan numunelerin mekanik davranışına yükleme açısının etkisini görmek için dört çeşit yükleme açısında kesme testleri gerçekleştirilmiştir. Kesme açısı Şekil 3.15'te tanımlanmaktadır. Bu tanıma göre bir önceki bölümde gerçekleştirilen saf kesme testleri $\psi=45^\circ$ 'lik yükleme açısı için gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple numunenin döndürülmesi durumunda sonuçların nasıl değiştiğini görmek için kesme açısı değiştirilmiştir. 0, 15, 30 ve 45° 'lik yükleme açılara maruz kalan 2.5 mm hücre boyutuna sahip BCC mikro kafes blokların kesme gerilmesi-açısal birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.15a'da verilmiştir. Görüldüğü üzere tüm numuneler için gerilme davranışı klasik kesme davranışına benzerdir. Yani başlangıçta bir pik gerilme değerinden sonra mikro tellerin kopmaya başlamasıyla yük taşıma kapasitelerini kaybetmektedir. Yükleme açısı düştükçe lokal değişimler ihmal edilirse, genel olarak gerilme eğrileri daha

düşük gerilme değerlerine sahiptir. En büyük gerilme değeri 45° 'lik yükleme açısında elde edilmektedir. Daha net bir fikir elde edinebilmek için Şekil 3.15b'de her bir numunenin şekil değiştirme enerjisi eğrileri, açısız şekil değiştirme değerlerine göre verilmektedir. Aynı miktar açısız şekil değişimi değerlerinde en yüksek enerji sönümlenme 45° 'de elde edilmekte iken 0° 'de en düşük enerji sönümlenme gerçekleşmektedir. Görüldüğü üzere BCC kafes yapısı için kesme yüklemesinde en iyi performans birim hücrenin yan yüzeylerine dik doğrultuda yani 45° 'lik yüklem açısında elde edilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.15. Farklı yükleme açılarında gerçekleştirilen kesme testlerinin sonuçları; a) Kesme gerilmesi, b) Sönümlenen şekil değiştirme enerjisi değerlerinin açısız birim şekil değiştirmeye göre değişimleri ($L=2.5$ mm)

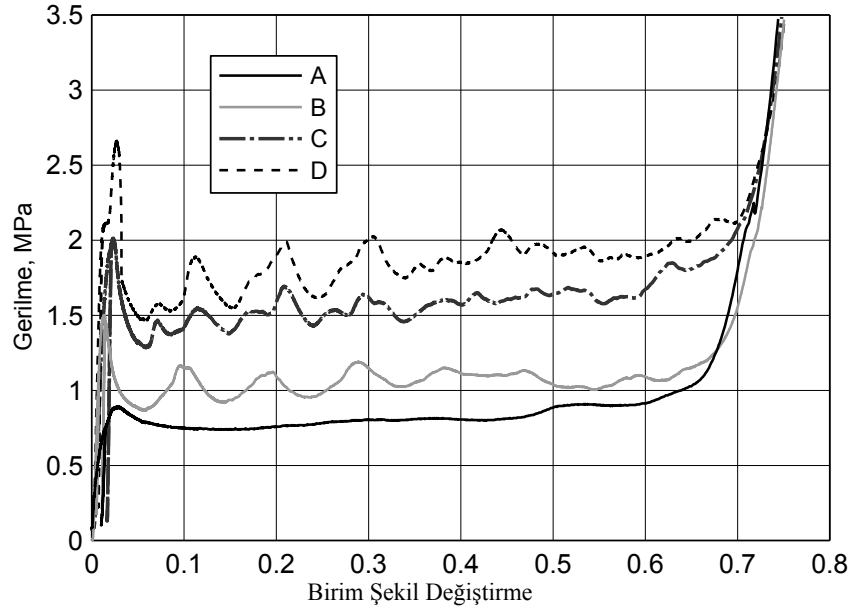
3.5. BBCZ Yapılarda Dikey Mikro Tellerin Mekanik Davranışa Katkısının İncelenmesi

BBCZ mikro kafeslerin bası testleri incelenirken, dikey mikro tellerin kafesin davranışını domino ettiği belirlenmişti. Bu bölümde dikey mikro tellerin BCCZ yapıların mekanik davranışına katkısı deneysel olarak araştırılmaktadır. Bu sebeple Tablo 3.4’de tanımlandığı gibi dört tip BCCZ mikro kafes modeli üretildi. Bu mikro kafeslerde dikey mikro teller eğik mikro tellerden farklı lazer parametreleri kullanılarak üretim işlemi gerçekleştirildi. Dikey mikro teller için kullanılan lazer gücü değerleri tabloda verilmektedir. Tüm BCCZ mikro kafesler için eğik mikro teller 90 W lazer gücü ve 1000 μ s lazer nüfus etme süre değerleri kullanılarak aynı olarak üretildi. Dikey teller için kullanılan lazer nüfus süresi de 1000 μ s olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde üretilen dört tip BCCZ kafes numunesine ait fiziksel özellikler ve elde edilen sonuçlar Tablo 3.4’de özetlenmektedir. Tabloda B ile adlandırılan numunenin tüm mikro telleri aynı lazer parametreleriyle üretilmiştir. Karşılaştırmalarda bu numune referans alınacaktır. Tablodan da görüldüğü üzere dikey mikro telleri daha yüksek lazer gücüyle üretilen kafesin kütlelerinde, dikey mikro tellerin çapının artışına paralel olarak azda olsa bir artış meydana gelmektedir. Örneğin D numunesinde A numunesine göre yalnızca % 4 kütle artışı meydana gelmektedir. Ayrıca dikkat çeken bir diğer nokta yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerlerinin, beklenenin aksine izafi yoğunluk arttıkça artış göstermesidir. Yani dikey tellerin çapı arttıkça kararlı çökme bölgesinin uzunluğunda bir artış olmaktadır. Bu durum kafes yapının enerji sönümleme kapasitesini arttırmaktadır.

Tablo 3.4. Dikey mikro telleri açısından farklı tip BCCZ kafes numunelerinin üretim parametreleri ve basma test sonuçlarının özeti

Numune No	Lazer Gücü (Dikey mikro tel için), (W)	Numune Kütlesi (gr)	İzafi yoğunluk	Başlangıç Elastisite Modülü (MPa)	Başlangıç Çökme Gerilmesi, (MPa)	Yoğunlaşma Birim Şekil Değiştirme, ϵ_y
A	58	2.5	0.0391	150.24	0.89	0.6
B	90	2.4	0.0375	402.26	1.50	0.624
C	115	2.6	0.0407	470.01	2.01	0.67
D	145	2.6	0.0407	532.17	2.66	0.7

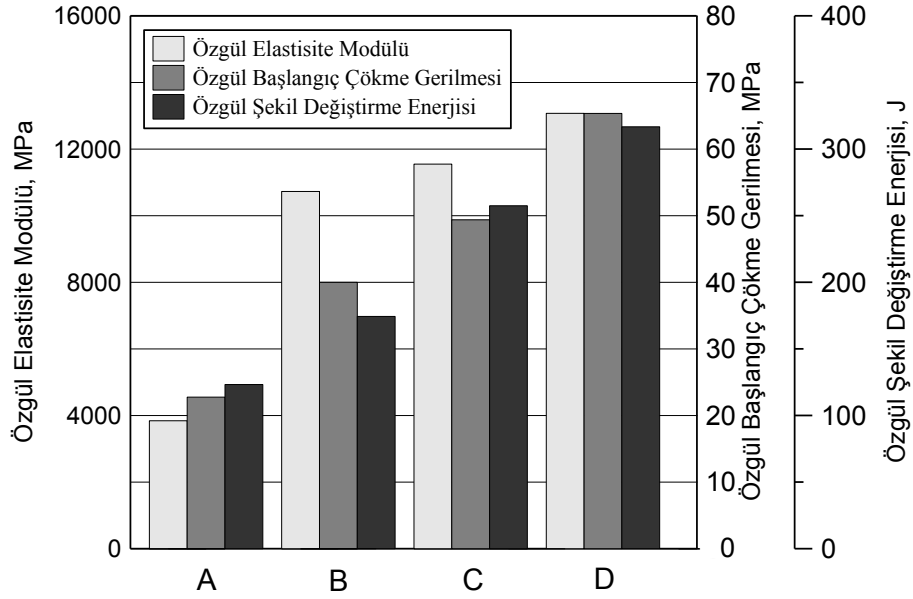
Dört tip BCCZ numunenin basma testlerinden elde edilen gerilmenin birim şekil değiştirmelere göre değişimlerinin karşılaştırıldığı eğriler Şekil 3.16’da görülmektedir. Numuneler genel olarak bölüm 3.1’de bahsedilen klasik BCCZ mikro kafes yapısının mekanik davranışını göstermektedir. Burada yalnızca A numunesi diğerlerinden farklı bir davranış sergilemektedir. Başlangıçta bir pik gerilme değerinden sonra neredeyse sabit bir kararlı çökme bölgesine sahip olmaktadır. Bu davranış dikey mikro tellerin eğik mikro tellere göre mukavemetinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.16’da görüldüğü gibi dikey mikro tellerin mukavemeti arttıkça BCCZ kafes yapısının gerilme eğrisi ciddi miktarda gerilme artışı yönünde öteleme yapmaktadır. Ayrıca Tablo 3.4’de görüleceği gibi yoğunlaşma daha geç oluşmaktadır.



Şekil 3.16. Dikey mikro telleri farklı lazer gücüyle üretilen BCCZ kafes yapılarının basma davranışlarının karşılaştırılması (L=2.5 mm)

Daha sağlıklı karşılaştırmaların yapılabilmesi ve elde edilen iyileştirmenin değerlendirilmesi açısından, özgül mekanik özelliklerin karşılaştırıldığı sütun grafikler her bir numune için Şekil 3.17’de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere gösterilen tüm özgül parametreler dikey mikro tellere bağlı olarak artış göstermektedir. Örneğin D numunesinin özgül elastisite modülü referans numune olan B’ye göre % 25 artmıştır. Aynı şekilde özgül başlangıç çökme gerilmesi ve özgül şekil değiştirme enerjisi değerleri de sırasıyla % 63 ve % 80 değerlerinde artışlar göstermiştir. En büyük artış özgül şekil

değiştirme enerjisinde ortaya çıkmaktadır. Sonuçlar göstermektedir ki BCCZ kafes yapılarda dikey mikro teller yapının mekanik davranışında çok önemli bir rol oynamaktadır. Öyle ki, dikey mikro teller üretilirken lazer gücünü değiştirerek kafes bloğun kütleğinde yalnızca % 8'lük bir artışla birlikte, özgül şekil değiştirme enerjisinde % 80 oranında iyileştirme yapmak mümkün olmaktadır.



Şekil 3.17. Dikey mikro telleri farklı lazer gücü ile üretilen BCCZ kafes yapıların özgül elastisite, özgül başlangıç çökme gerilmesi ve özgül şekil değiştirme enerji değerlerinin karşılaştırılması

3.6. Lazer Ergitme Yöntemiyle Üretilen Mikro Tellerin Statik ve Dinamik Çekme Test Sonuçları

Burada Bölüm 2.1.4'de detayları verilen yöntemler kullanılarak elde edilen, mikro tellere ait statik ve dinamik test sonuçları gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri şeklinde sunulacaktır.

3.6.1. Mikro Tellerin Statik Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Eğrileri

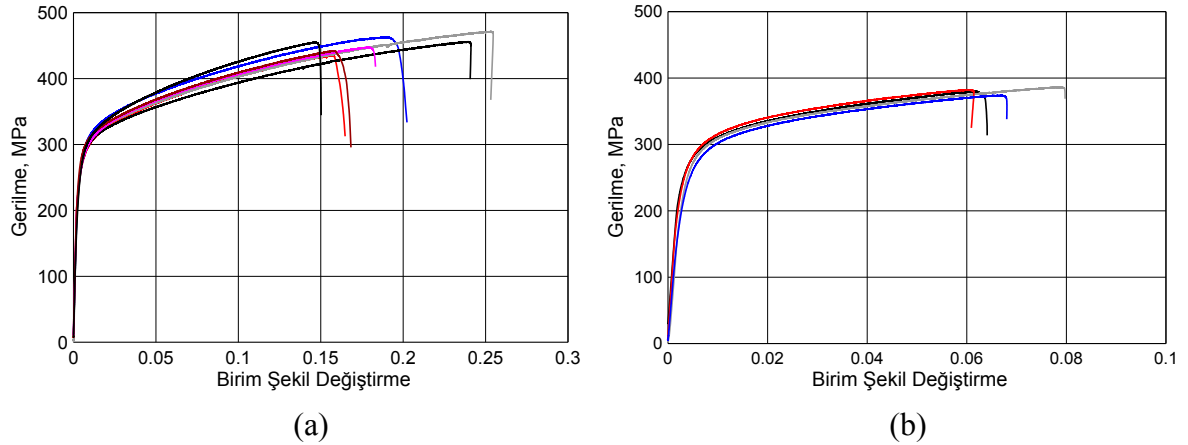
Farklı lazer parametreleri ile üretilen mikro tellerin statik çekme testlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 3.18'de verilmiştir. Şekilde iki farklı lazer parametresi ile üretilen mikro tellerin çekme test sonuçları mevcuttur. Bunlar, 90 W lazer gücü ve 1000 μ s lazer nüfus süresi (90Wx1000 μ s) ile 140 W lazer gücü ve 500 μ s lazer nüfus süreleridir

(140Wx500 μ s). Gerilme değerleri ölçülen çeki kuvvetinin mikro telin kesit alanına bölünmesiyle elde edilmiştir. Mikro telin çapını belirlemek için, mikro tellerle birlikte bir kenarı 20 mm olan BCC kafes bloklar üretildi ve üretilen blokların izafi yoğunlukları eşitlik (2.12)'de yerine konularak teorik ortalama çap hesabı gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda belirlenen teorik mikro tel çapı 207 $\pm$ 10 μ m şeklinde değişim göstermektedir ve bu çap değeri her iki lazer parametresiyle üretilen teller için aynı olmaktadır. Bu durum Tsopanos vd. (2010) tarafından yapılan çalışma ile açıklanabilir. Onlar bu iki farklı lazer parametrelerini kullanarak aynı izafi yoğunluğa ve mukavemet özelliklerine sahip kafes yapılar üretmişlerdir. Şekil 3.18'den görüldüğü üzere her iki lazer parametresiyle üretilen mikro tellerden elde edilen eğriler, kopma uzaması değerleri hariç, iyi bir tekrarlılığa sahiptir. 90Wx1000 μ s lazer parametresiyle üretilen mikro tellerin kopma gerilmesi 450 MPa olurken 140Wx500 μ s üretilen mikro tellerde 380 MPa kopma gerilmesi elde edilmiştir. Bu durum kullanılan lazer ergitme makinesinin güncel durumundan kaynaklanmaktadır. Normalde her iki mikro tel grubunun benzer gerilme davranışına sahip olacağı, 0.06 birim şekil değiştirme değerine kadar olan gerilme eğrilerinin neredeyse aynı eğilime sahip olmasından kolayca anlaşılmaktadır.

Mikro tellerin içerdığı yüksek oranda kusurlar ve çentik etkileri sebebiyle gerilme eğrilerindeki tekrarlanabilirlik kopma uzaması değerlerinde elde edilememiştir. 90Wx1000 μ s lazer parametreleri için (Şekil 3.18a) 0.15 ile 0.25 değerleri arasında değişen kopma uzaması değerleri elde edilmektedir. Elastisite modülü gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin lineer kısmının eğiminden elde edilmiştir. Bunun sonucunda elde edilen testlere göre elastisite modülü değerinin 90 ve 108 GPa değerleri arasında değiştiiği belirlenmiştir. Böylece ortalama elastisite modülünün 97 $\pm$ 10 GPa olduğu söylenebilir. Ayrıca % 0.2 birim şekil değiştirme değerine karşılık gelen akma gerilmesinin de 260 MPa olduğu bulundu. Ölçülen değerler Literatürdeki değerlerle karşılaştırılırsa, elastisite modülü, Tsapanos ve arkadaşları tarafından belirlenen 140 GPa değerinden % 30 daha düşüktür. Akma gerilmesi ise 316L paslanmaz çeliğinin akma gerilmesi değeriyle hemen hemen aynı olarak elde edilmiştir. Örneğın, Langdon ve Schear (2004) 316L saç metal numunelerden 235 MPa akma gerilmesi elde etmişlerdir.

Elde edilen elastisite modülü ve akma gerilmesi değerlerinden özetle şu çıkarılabilir ki, lazer ergitme yöntemiyle üretilen mikro tellerin akma gerilmesi, ana malzemenin akma gerilmesine çok yakın iken elastisite modülü, mikro tellerin içerdiiği yüksek dereceli yapısal kusurlardan dolayı yarı yarıya düşüş göstermektedir. Bu sonuçlar, Tsopanos vd.

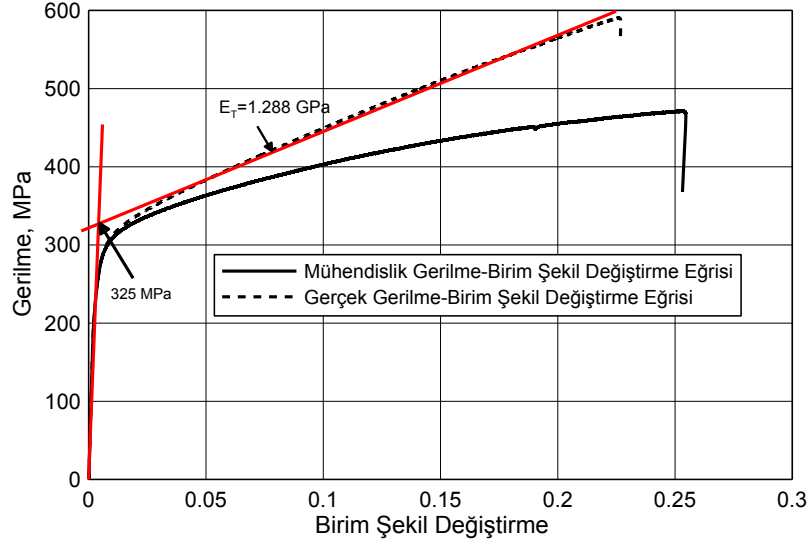
(2010) tarafından elde edilen sonuçlardan oldukça farklı çıkmaktadır. Onlar akma gerilmesi için yalnızca 145 MPa değerini belirlemişlerdi ve bu durumun lazer işlemi sonucunda malzemenin içyapısındaki değişikliklerden ve yapısal kusurlardan (mikro tellerin içinde oluşması muhtemel boşluklar ve iyi ergimemiş tabakaların birbirine tamamiyle yapışmama problemleri gibi) kaynaklandığını düşünmüşlerdir. Ayrıca, burada kullanılan mikro teller dikey olarak üretilmiştir. Kafes yapılarda mevcut mikro tellerin çoğu eğik pozisyona sahiptir. Shen (2009) tarafından yapılan analizde 45^0 'de eğimle üretilen mikro tellerin çapının % 5 daha küçük olduğuna elektron mikroskobu sayesinde karar vermiştir. Bu durumda yukarıda hesaplanan elastisite modülünün eğik üretilen mikro teller için % 10 civarında daha düşük olma ihtimali söz konusudur. Shen (2009)'in iki boyutlu resimler üzerinden bu karara varması sebebiyle, sonucun ne kadar sağlıklı olduğuna karar verilememiştir. Bu sebeple, bu çalışma boyunca tüm mikro teller için aynı elastisite modülü değeri kullanılacaktır. Yani üretim açısının etkisi ihmal edilmektedir.



Şekil 3.18. Farklı lazer parametreleriyle üretilen mikro tellerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; a) 90 W lazer gücü ve 1000 μ s lazer nüfus süresi, b) 140 W lazer gücü ve 500 μ s lazer nüfus süresi

Şekil 3.19'da gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir. Bu eğri; $\sigma_{ger} = \sigma_{müh}(1+e)$ ve $\epsilon = \ln(1+e)$ ifadeleri kullanılarak hesaplanmıştır. Burada "e" mühendislik birim şekil değiştirme değerini göstermektedir. Ayrıca, teorik hesaplamalarda elastik-plastik bölgenin hesaba katılması zor olduğundan, Şekil 3.19'da görüldüğü gibi bir elastik-lineer plastik malzeme davranışı yaklaşımı uygulanmıştır. Elastik-lineer plastik eğrisinin akma gerilmesi yaklaşık 325 MPa ve lineer plastik bölgenin eğiminden

hesaplanan tanjant modülü ise 1.288 GPa olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu model değerler teorik ve sayısal çalışmalarda kolaylık sağlamaktadır.



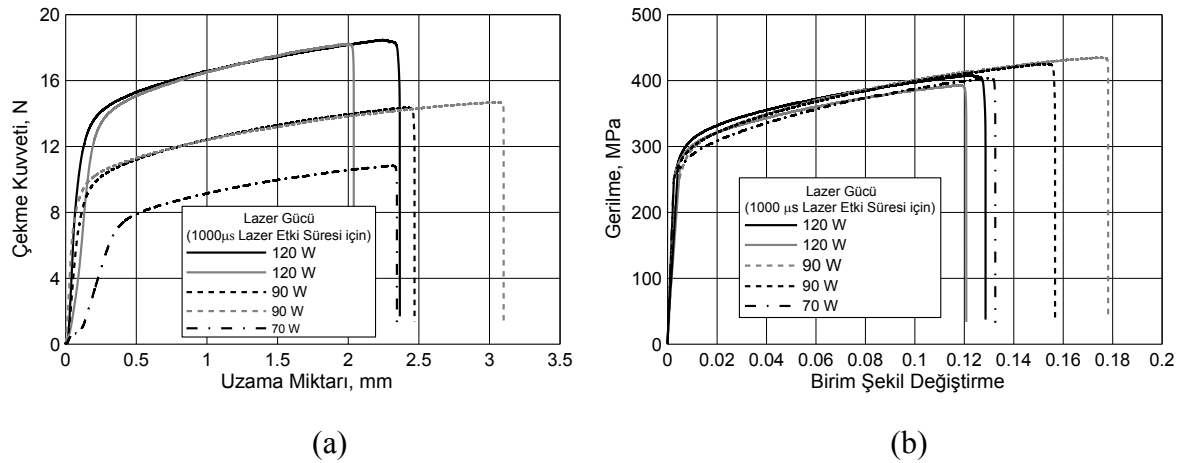
Şekil 3.19. Gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ve elastik lineer plastik davranış yaklaşımı

Lazer gücünün değişiminin mikro telin çekme davranışına etkilerini görmek için lazer nüfus süresi 1000 μ s olmak üzere 70, 90 ve 120 W lazer gücü parametreleri kullanılarak üç tip mikro tel üretilmiştir. Şekil 3.20'de bu mikro tellere ait çekme kuvvetinin uzama ile değişimleri ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılmaları verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere lazer gücü arttıkça mikro telin karşıladığı çekme kuvveti değerleri daha yüksek olmaktadır. Lazer gücünün artışıyla, mikro tozların üzerine giden lazer enerjisi daha fazla olmakta ve bunun sonucunda daha fazla toz ergimektedir. Bundan dolayı da üretilen mikro tellerin çapı daha büyük olmaktadır. Doğal olarak çapı daha büyük olan mikro teller daha yüksek çekme kuvvetini taşımaktadır.

Şekil 3.20b'de verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin belirlenmesi için en büyük sorun mikro tellerin çapının belirlenmesi idi. Bu sorun Tsopanos vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada, 2.5 mm hücre boyutuna sahip BCC kafes blokların izafi yoğunluğunun lazer parametreleriyle değişimini gösteren grafik kullanılarak çözülmüştür. Grafikten, bu çalışmada kullanılan lazer parametrelerinin her biri için ortaya çıkan izafi yoğunluk değerleri okundu. Okunan izafi yoğunluk değerleri eşitlik (2.12)'de kullanılarak

teorik ortalama tel çapları hesaplanmıştır. Elde edilen teorik tel çapları Tablo 3.5’de verilmiştir.

Şekil 3.20b’de oluşturulan gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde hesaplanan teorik tel çapları kullanılmıştır. Ayrıca bu testler yapılırken Clip Gauge kullanılmadığından dolayı elastik bölgenin eğimi düşük çıkmaktadır. Bu sebeple bu bölgeye, elastisite modülü 97 GPa olacak şekilde bir düzeltme (compliance) uygulandı. Elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerine bakıldığında tüm eğriler birbirine çok yakın cevaplar vermektedir. Bu durum lazer gücü ile malzemenin akma gerilmesi davranışının değişmediği sonucunu ortaya koymaktadır. Çıkan sonuçlar, lazer gücü ile gerilme değerlerinin değiştiğini ifade eden Tsopanos vd. (2010)’un çalışmalarıyla çelişmektedir. Ayrıca kolayca anlaşılabilir ki, lazer gücü çok düşük düzeylerde uygulanırsa, yetersiz ergime sebebiyle katmanlar arasında yapışma yeterince olmayabileceğinden dolayı gerilme eğrilerinde ciddi düşüşler meydana gelebilir.



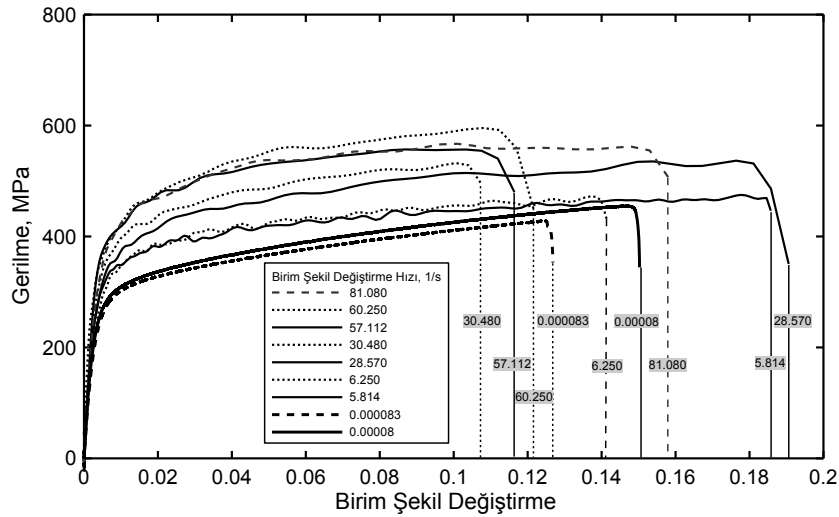
Şekil 3.20. Farklı lazer gücü ile üretilen mikro tellerin çekme test sonuçlarının karşılaştırılması; a) Çekme kuvveti-uzama eğrileri, b) Gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Tablo 3.5. Farklı lazer gücü ile üretilen mikro tellerin teorik çapları (Lazer nüfus süresi sabit ve 1000 μ s)

Lazer Gücü (W)	70	90	120
İzafi yoğunluk, Tsopanos vd. (2010)	0.0279	0.0373	0.0514
Teorik tel çapı, μ m; Eşitlik (2.12)	179	207	243

3.6.2. Mikro Tellerin Dinamik Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Eğrileri

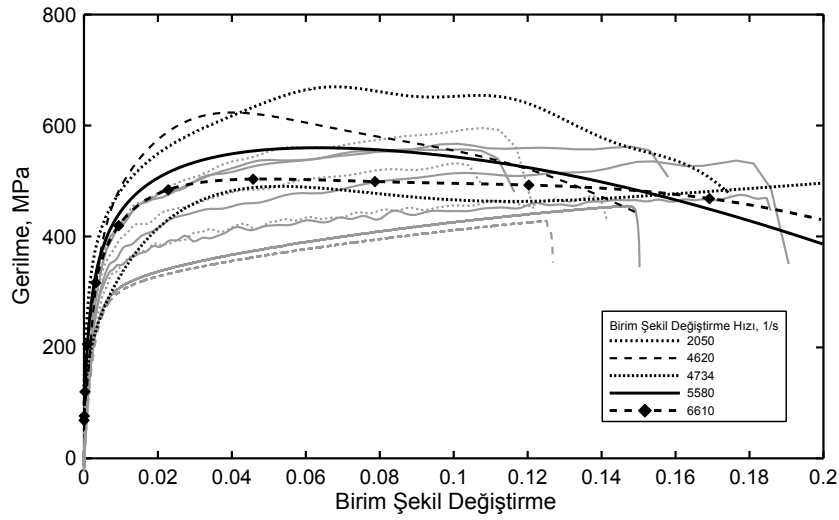
90Wx1000 μ s lazer parametreleriyle üretilen mikro tellerin nispeten düşük çekme veya birim şekil değiştirme hızlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.21’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere birim şekil değiştirme hızı arttıkça gerilmelerde ciddi bir artış meydana gelmektedir. Birim şekil değiştirme hızının belli bir değerinden sonra (57.112 s⁻¹) gerilmeler artış göstermemektedir. Ayrıca birim şekil değiştirme hızı arttıkça gerilme eğrilerinin plastik kısımlarının eğimlerinde azalma meydana gelmektedir. Bu testler için maksimum birim şekil değiştirme hızı 80 s⁻¹ olarak elde edilebilmiştir. Bilindiği gibi hidrolik test cihazları en iyi sonuçları 200 s⁻¹ birim şekil değiştirme hızlarına kadar vermektedir (Vahapoğlu, 2010; Meyers, 1994). Bu durum birim şekil değiştirme hızı arttıkça, Şekil 2.21’deki gerilme eğrilerinde salınımlar oluşmasından zaten belli olmaktadır. Önceki bölümden de hatırlanacağı üzere kopma uzamaları burada büyük bir aralıkta belli bir eğilime sahip olmaksızın gerçekleşmektedir. Elde edilen sonuçlar kopma uzamaları hariç, Langdon ve Schleyer (2004) tarafından 316L sac numunelerle gerçekleştirilen test sonuçlarına oldukça yakın cevaplar vermektedir. Onlar 118 s⁻¹ birim şekil değiştirme hızına kadar çıkmışlardır ve bu hızlarda gerilmelerde önemli bir değişim gözlemlenmemiştir.



Şekil 3.21. Düşük birim şekil değiştirme hızlarında mikro tellerin gerilme-birim şekil değiştirme davranışı

Hopkinson çekme testinden elde edilen gerilme eğrilerinin birim şekil değiştirmeye göre değişim eğrileri düşük hızlı çekme testleriyle karşılaştırmalı olarak Şekil 3.22’de

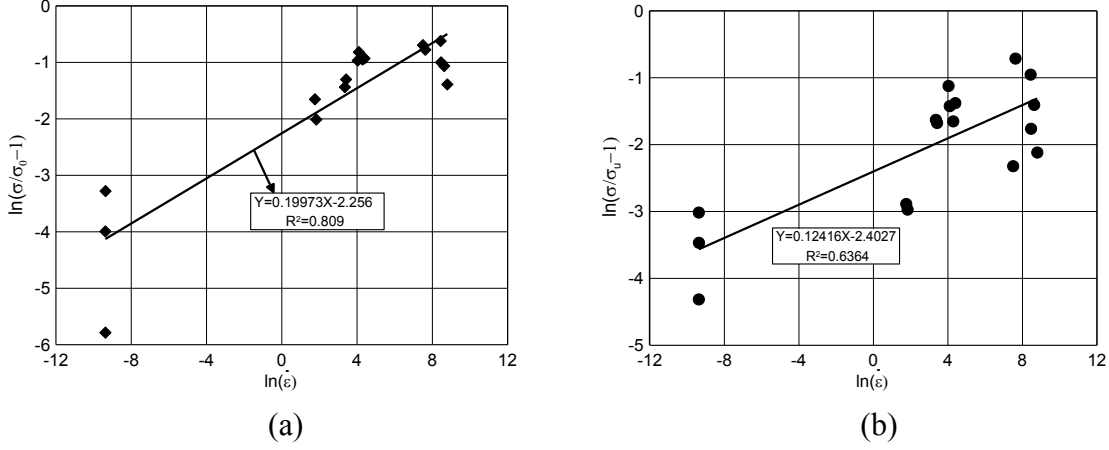
verilmektedir. Hopkinson çekme testlerinden elde edilen birim şekil değiştirme hızları, hidrolik çekme test cihazından elde edilenden oldukça yüksektir. Görüldüğü üzere Hopkinson çekme testlerinden elde edilen gerilme eğrilerinin genel karakteristiği, başlangıçta bir maksimuma ulaştıktan sonra gerilme gevşemesi gösterme yönündedir. Birim şekil değiştirme hızları çok yükseğe çıktıkça gerilme değerleri düşmektedir. Yani birim şekil değiştirme yumuşaması görülmektedir. Bu durumun yüksek hızlı testlerde adiyabatik deformasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.22. Hopkinson testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin hidrolik test cihazında gerçekleştirilen test sonuçlarıyla karşılaştırılması

Eşitlik (2.4) kullanılarak mikro tellerin dinamik çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme hızı değerlerine eğri uydurulmuştur. “q ve D” Cowper-Symonds sabitlerini deneysel olarak belirlemek için, eşitlik (2.4) hem elde edilen akma gerilmeleri (σ_0) hem de maksimum çekme gerilmeleri (σ_u) açısından düzenlenerek, ayrı ayrı “ $\ln(\sigma/\sigma_0-1)$ ” ve “ $\ln(\sigma/\sigma_u-1)$ ” ifadeleri elde edilmiştir. Şekil 3.23’de bu iki ifadenin deneysel veriler kullanılarak birim şekil değiştirme hızının doğal logaritmasına ($\ln \dot{\epsilon}$) göre değişimleri görülmektedir. Her iki grafiğe, şekilden görüldüğü üzere lineer eğri uydurularak hem akma değerleri hem de maksimum çekme gerilme değerleri açısından Cowper-Symonds katsayıları ayrı ayrı elde edilmiştir. Grafiklerde “ R^2 ” uydurulan eğrinin ne derecede verileri temsil ettiğini gösterir ve “1” değerine ne kadar yakın ise o kadar iyi bir eğri uydurmanın gerçekleştiğini gösterir. Buna göre akma gerilmesinden elde edilen verilere nispeten daha iyi bir eğri uydurulmaktadır (Şekil 3.23a). Maksimum çekme

gerilmesi değerleri çok daha dağınık bir dağılım gösterdiği için daha düşük bir R^2 değerine sahiptir.



Şekil 3.23. Cowper-Symonds katsayılarının deneysel verilerden elde edilebilmesi için deneysel verilere doğrusal eğri uydurulması; a) Akma gerilmelerine, b) Maksimum çekme gerilmelerine

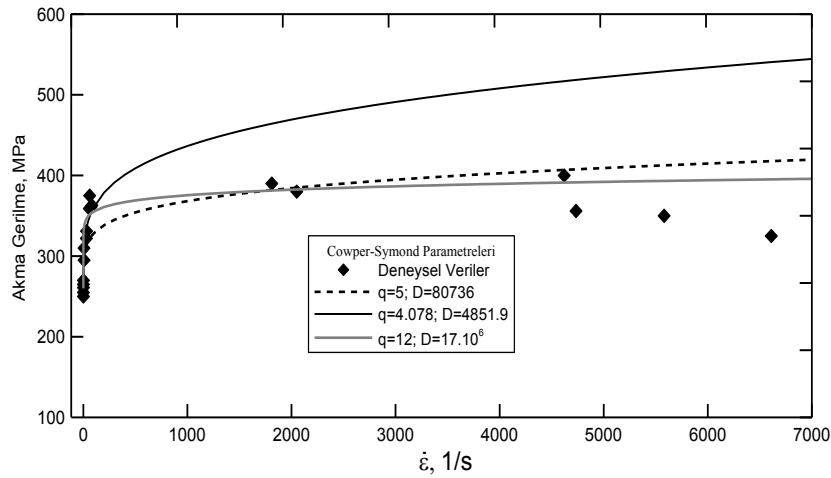
Eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen Cowper-Symonds sabitleri çeşitli durumlar için Tablo 3.6’da verilmiştir. Ayrıca tablo literatürde 316L paslanmaz çelik için (Saç numunelerden) elde edilen Cowper-Symonds sabitlerini de karşılaştırma amaçlı içermektedir. Görüldüğü gibi akma gerilmelerinin dikkate alındığı durum ikiye ayrılmıştır. Bunlardan Hopkinson çekme testlerinin sonuçlarının ihmal edildiği durumda elde edilen değerler ($q=4.078$ ve $D=4851.9$) literatürde elde edilen verilere oldukça yakındır. Hopkinson test sonuçları ihmal edilince D katsayısı oldukça yükselmektedir. D katsayısının artışı birim şekil değiştirme hızına bağımlılığı azaltmaktadır. Maksimum çekme gerilmesinde hesaplanan sabit değerler ise oldukça yüksektir ve bu durum birim şekil değiştirme hızına bağımlılığın çok düşük düzeylerde olduğunu ifade etmektedir.

Tablo 3.6’da verilen Cowper-Symonds katsayıları ışığı altında eşitlik (2.4)’ün deneysel verileri ne kadar karşıladığının görülmesi açısından Şekil 2.24’deki karşılaştırma grafiği hazırlanmıştır. Grafik akma gerilmesi değerlerinin birim şekil değiştirme hızına bağımlılığını göstermektedir. Hopkinson test sonuçlarının ihmal edildiği durumda hesaplanan sabitlerle ($q=4.078$ ve $D=4851.9$) elde edilen eğri düşük birim şekil değiştirme hızları için çok iyi bir tahmin yaparken yüksek birim şekil değiştirme hızlarında gerilme değerlerini oldukça yüksek hesaplamaktadır. Hopkinson test sonuçlarının ilave edildiği durumda hesaplanan sabitlerle ($q=5$ ve $D=80736$) elde edilen eğri ise yüksek birim şekil değiştirme

hızlarında deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar vermekle birlikte, düşük birim şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerlerini tam olarak karşılayamamaktadır. Bu sebeple, katsayılar deneme yanılma ile değiştirilerek deneysel verileri iyi bir oranda karşılayan sabitler ($q=12$ ve $D=17.10^6$) olarak elde edilmiştir. Bu sabitlerle elde edilen eğri, görüldüğü üzere deneysel değerlere oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Sonuç olarak elde edilen sabitler birim şekil değiştirme hızına göre dinamik testlerde kullanılabilir. Örneğin, 100 s^{-1} birim şekil değiştirme hızından düşük teorik ve sayısal çalışmalarda “ $q=4.078$ ve $D=4851.9$ ” sabitleri kullanılabilirken, yüksek birim şekil değiştirme hızlarında hem “ $q=5$ ve $D=80736$ ” hem de $q=12$ ve $D=17.10^6$ sabitlerinin kullanımı deneysel sonuçlara uyumlu sonuçlar vermektedir.

Tablo 3.6. Mikro teller için deneysel olarak elde edilen Cowper-Symonds sabitlerinin literatürde var olanlarla karşılaştırılması

Kaynak	$D\text{ (s}^{-1}\text{)}$	q	Açıklama
Langdon ve Shcleyer (2004)	429-2721	4.1-5.8	
Burgan (2001)	240	4.74	
Deneysel (Akma geril.)	4851.9	4.078	Hopkinson Bar sonuçları ilave edilmeden
Deneysel (Akma geril.)	80736.69	5.0075	Tüm deneysel verilerle
Deneysel (Mak. Çekme Geril.)	252.10^6	8.054	Tüm deneysel verilerle Maksimum çekme gerilmesi için
Önerilen	17.10^6	12	Tahminler sonucu



Şekil 3.24. Elde edilen Cowper-Symonds sabitleriyle elde edilen akma gerilmesinin birim şekil değiştirme hızına göre değişimini gösteren eğrilerin deneysel verilerle karşılaştırılması

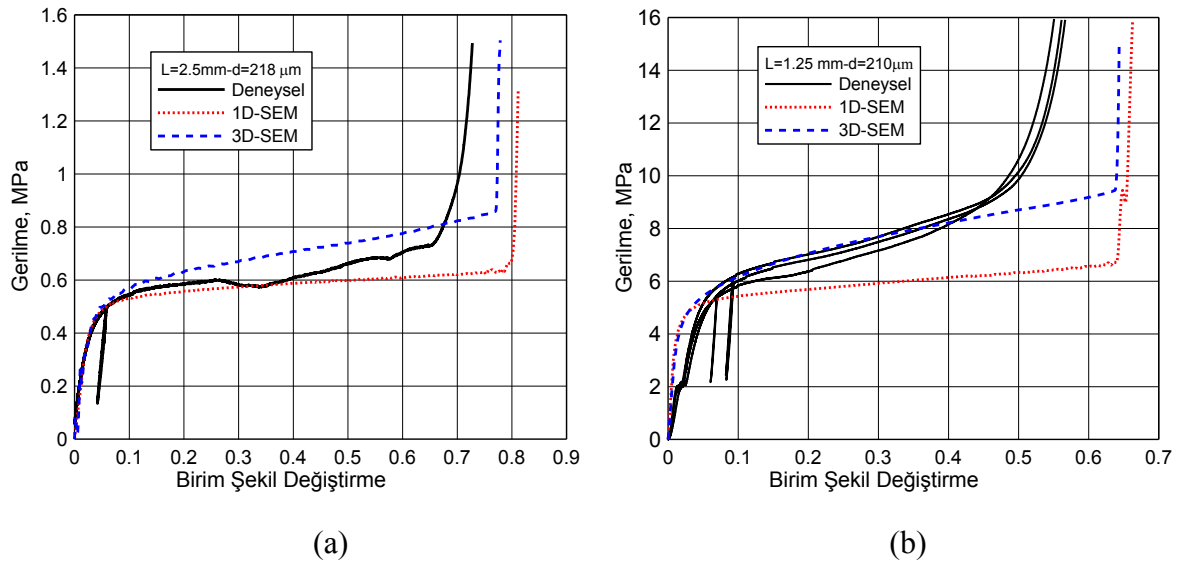
3.7. Sonlu Elemanlar Modellerinin Geçerliliğinin Araştırılması

Bu bölümde mikro kafes yapıların sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modelleme çalışmaları sunulacaktır. Modellemeler hem serbest yüzeyli hem de sınırlandırılmış numune testleri için, her üç tip mikro kafes yapı için gerçekleştirilmiştir.

3.7.1. Serbest Yüzeyli Basma Testleri

Hem üç boyutlu hem de bir boyutlu elemanlarla oluşturulan sonlu elemanlar modellerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin deneysel 2.5 mm ve 1.25 mm hücre boyutlarına sahip mikro kafes yapıların cevapları ile karşılaştırıldığı grafikler Şekil 3.25’de verilmiştir. 2.5 mm hücre boyutu için her iki sonlu elemanlar yaklaşımı da oldukça iyi bir şekilde başlangıç yükleme ve çökme gerilmesini tahmin etmektedir (Şekil 3.25a). Fark kararlı çökme bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Bu bölge için, 3D-SEM gerilme değerlerini nispeten yüksek hesaplarırken gerilme eğrisinin eğimini ise oldukça iyi tahmin edebilmektedir. 1D-SEM kullanılarak elde edilen eğri ise kararlı çökme bölgesinde deneysel sonuca göre daha düşük eğime sahiptir. Yoğunlaşma birim şekil değiştirme açısından ise her iki modelde deneysel sonuçlardan daha yüksek değere sahiptir. Bu durum daha öncede bahsedildiği gibi mikro tellerin değişken çap değerleri ve üzerlerinde ihtiva ettiği yarı ergimiş mikro tozlar sebebiyle, deformasyon esnasında mikro tellerin erkenden birbiriyle temasından kaynaklanmaktadır. 1.25 mm hücre boyutu için elde edilen sonuçlar Şekil 3.25b’de görüldüğü üzere deneysel sonuçlardan biraz farklılık arz etmektedir. Her iki modelin de deneysel lineer elastik bölgede boşaltma eğrilerinin eğimlerini ve plastik çökme gerilmesi değerlerini oldukça iyi tahmin ettiği söylenebilir. 3D-SEM kararlı plastik çökme bölgesini mükemmel şekilde temsil ederken, 1D-SEM ise oldukça farklı hesaplamaktadır. Bu durumun 1D-SEM’nin mikro tellerin kesişim noktalarının geometrilerini gerçeğe uygun temsil edememesinden kaynaklanmaktadır. 1.25 mm hücre boyutu içinde yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerleri, 2.5 mm hücre boyutu için bahsedilen nedenlerden ötürü deneysellerden % 40 civarında daha yüksek çıkmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile deneysel sonuçlar arasında ortaya çıkan farkların nedenlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için, 1.25 mm hücre boyutuna sahip bir mikro kafese ait detaylı bir resim (% 30 sıkıştırılmış) Şekil 3.26’da verilmiştir. Resim, en başta, mikro tellerin geometrisinin değişken çaplar ve yarı ergimiş mikro tozlar içermesi nedeniyle ne

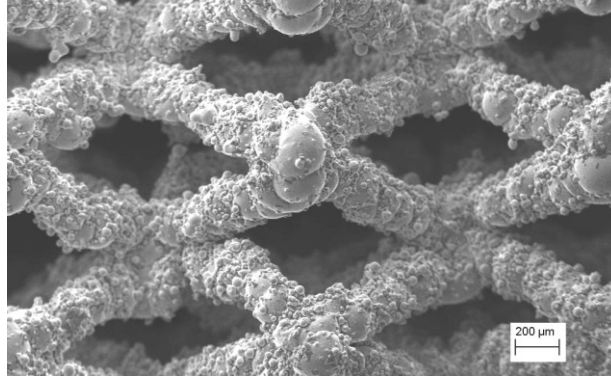
derece karmaşık ve kusurlu olduğunu göstermektedir. Bu nedenle mikro tellerin kesişim bölgeleri genelde oldukça karmaşık geometriye sahiptir. Mikro tellerin eğilmesi esnasında, kesişim noktalarının çevresindeki mikro tozlar ve mikro çıkıntılar birbirleriyle temasa girmeye başlar ve mikro telin eğilmesine karşı bir direnç oluşturur. Yani maksimum eğilme gerilmesinin olduğu kesitin, mikro telin kesişim noktasından daha ileride oluşmasına yol açarlar. Bu durumda, mikro telin efektif uzunluğu deformasyonla birlikte daha fazla (eğilme momentinin etkin olduğu moment kolu) azalır. Bu da kararlı çökme bölgesinde gerilmelerin artmasına sebep olur. Efektif uzunluğun azalışının küçük hücreli kafes yapılar için çok daha önemli olacağı aşıkardır. 1.25 mm hücre boyutuna sahip mikro kafes yapının davranışını temsil eden eğrinin kararlı çökme bölgesinin eğiminin 2.5 mm hücre yapısına sahip kafes yapıdan çok daha yüksek olması bu duruma en güzel örnek teşkil etmektedir (Şekil 3.25). Sonuç olarak, uygulanan sonlu elemanlar modelleriyle BCC kafes yapıların başlangıç elastisite ve çökme gerilmelerini gerçeğe oldukça yakın tahmin etmek mümkün iken yoğunlaşma ve kararlı çökme bölgelerinin tahminlerinde büyük farklar ortaya çıkabilmektedir.



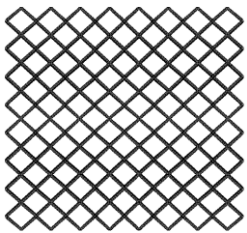
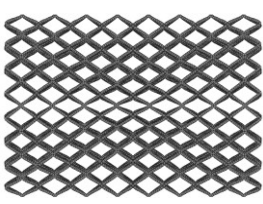
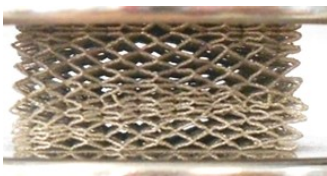
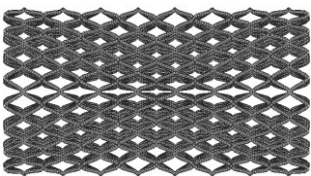
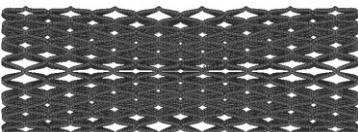
Şekil 3.25. Sonlu elemanlar modelleriyle deneysel testlerden elde edilen sonuçların BCC mikro kafes yapılar için karşılaştırılması; a) $L=2.5 \text{ mm}$, b) $L=1.25 \text{ mm}$

Şekil 3.27 ve 3.28 1D-SEM ve deneysel deformasyon modlarını farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki karşılaştırma resimlerini içermektedir. Şekilden de görüleceği üzere, 1D-SEM ile her iki hücre boyutu içinde deneysel deformasyon modlarına yakın

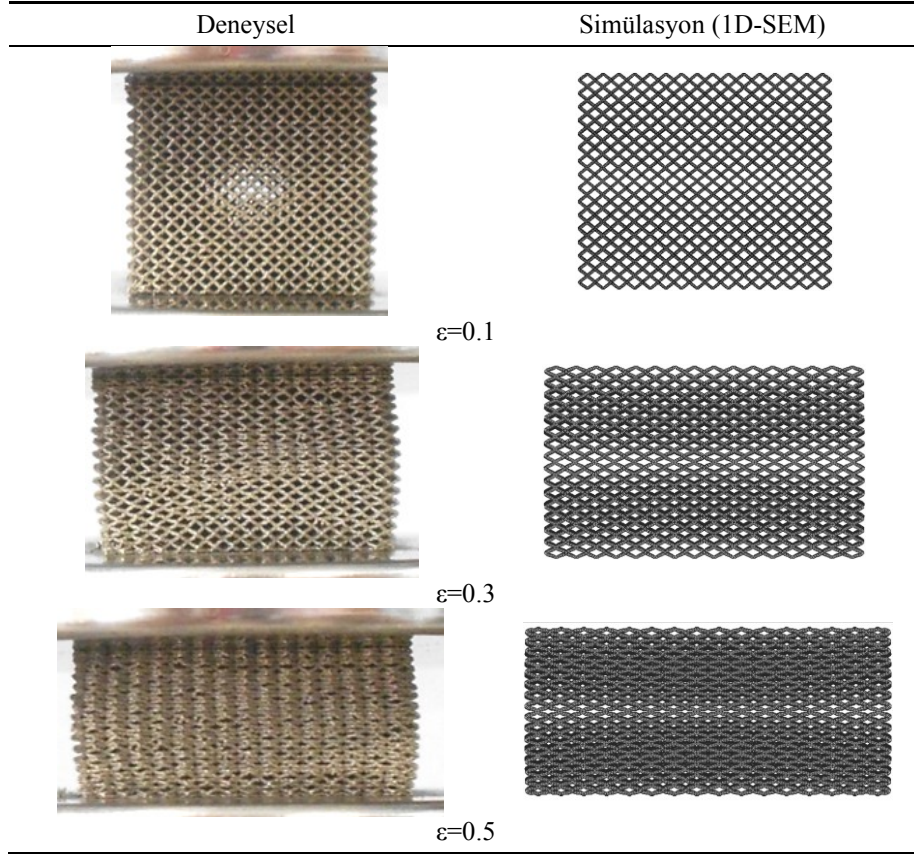
tahminler elde edilebilmektedir. Ayrıca 0.1 birim şekil değiştirme değerinde bloğun ortasında ortaya çıkmaya başlayan deformasyon lokalleşmesi sayısal modellerde de elde edilebilmektedir. Fark edileceği üzere, gerçek mikro kafesler sayısal modellerden daha düşük birim şekil değiştirmelerde yoğunlaşma göstermektedir ($\varepsilon=0.6$ değeri için).



Şekil 3.26. % 30 oranında sıkıştırılmış 1.25 mm hücre boyutlu mikro kafes yapının detaylı görünüşü

Deneyisel	Simülasyon (1D-SEM)
	
	
	
	
	$\varepsilon=0.6$

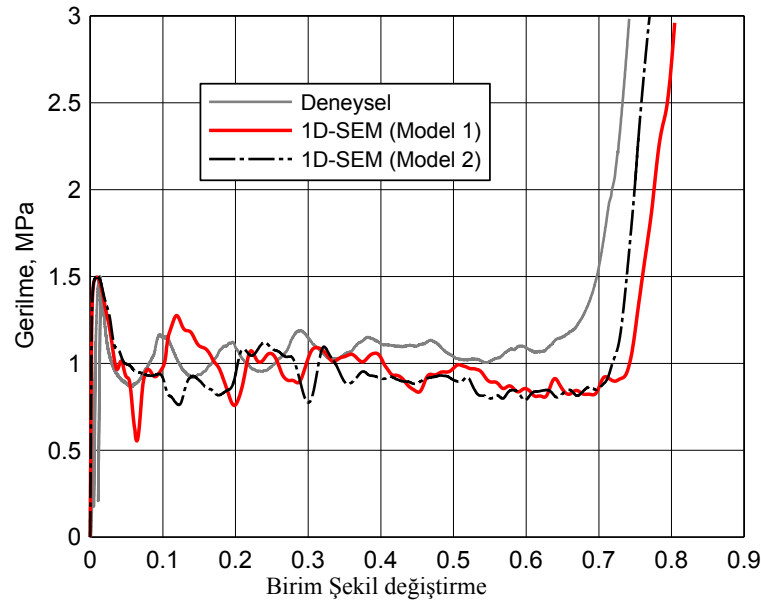
Şekil 3.27. Sonlu elemanlar modelinde elde edilen deformasyon modlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması ($L=2.5$ mm)



Şekil 3.28. Sonlu elemanlar modelinde elde edilen deformasyon modlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (L=1.25 mm)

Serbest yüzeyli BCCZ kafes yapıların sonlu elemanlar modelleri ile deneysel testlerden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve deformasyon modları, sırasıyla Şekil 3.29 ve 3.30’da verilmiştir. Bu şekilde deneysel veriler iki sayısal model ile elde edilen iki benzetin sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. İki farklı sayısal model hazırlanmasının nedeni deneylerde ortaya çıkan kesme bandı şeklindeki deformasyon modunun sonuçlara etkisini ortaya çıkarmaktır. Bu amaçla, deneylerde yüklemenin başında 45⁰’lık kesme bandı şeklindeki ortaya çıkan deformasyon modunu elde edebilmek için birinci modelde (Model 1) Şekil 2.23’te gösterilen kusur modlarından üçüncüsü kullanılmıştır. Deneme testleriyle kesme bandı şeklinde çökmenin başlayacağı modu verecek “ξ” değeri 1 mm olarak bulunmuştur. Bu değer belirlenirken çökme gerilmesi ve elastisite modülünün, kusursuz modele göre önemli derecede etkilenmemesine dikkate edilmiştir. Model 2 ise Mod III kusur modeli hariç Model 1 ile aynı özelliklere sahip sayısal modeldir.

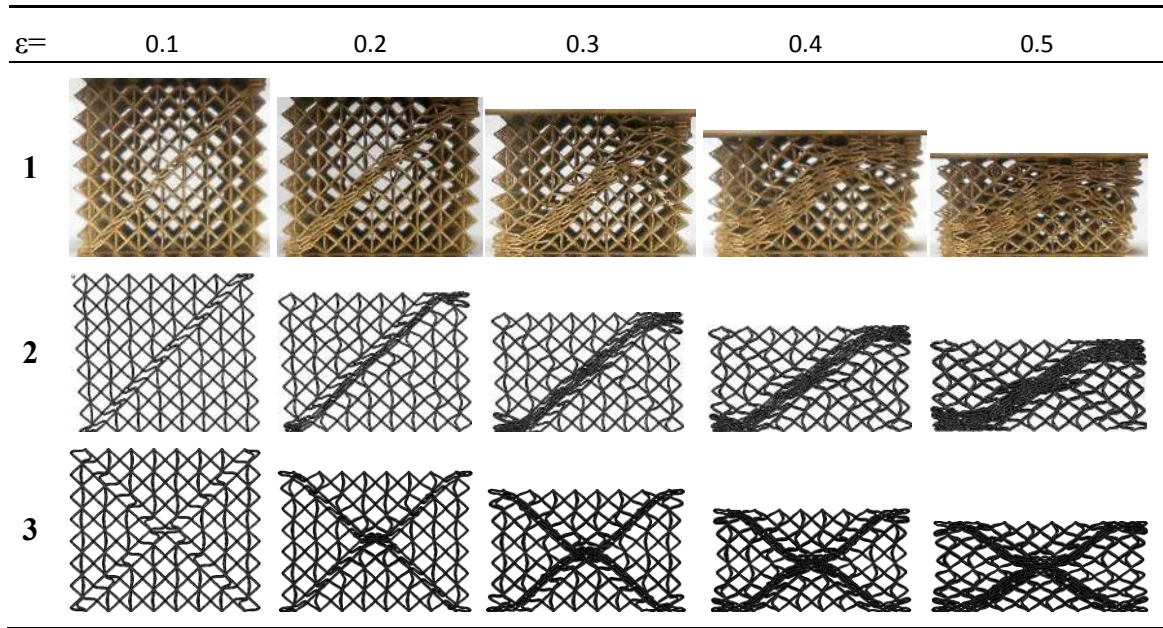
Sonuçlar açısından bakıldığında, her iki sayısal model birbirine yakın cevaplar vermelerinin yanında, deneysel gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini de oldukça iyi bir şekilde temsil ettikleri görülmektedir (Şekil 3.29). Sayısal modeller başlangıç deneysel çökme gerilmesini tamamiyle yakalamaktadırlar. Sayısal modellerle elde edilen davranış yalnızca yoğunlaşma bölgesinin başlangıcında deneysel veriden farklılık göstermektedir. Deformasyon oluşumuna bakılırsa, Model 1 mükemmel şekilde deneysel deformasyon modlarını yakalamaktadır (Şekil 3.30). Deformasyon modu, deneysel moda benzer şekilde 45° 'lik kesme bandı şeklinde 0.1 birim şekil değiştirme değerinde başlayıp diyagonal şekilde gelişim göstermektedir. Model 2 ise diğerlerinden farklı olarak her iki köşe boyunca uzanan ve bloğun ortasında kesişen iki kesme bandına sahiptir. Bu farklı deformasyona gelişimine rağmen, Model 2 lokal farklar hariç Model 1'e benzer gerilme davranışı vermektedir. Bu sonuçlar gösterir ki deformasyon modu lokal farklar dışında BCCZ kafes yapının sonucuna önemli bir etkiye sahip olmamaktadır.



Şekil 3.29. Sonlu elemanlar modelleriyle deneysel sonuçların BCCZ mikro kafes yapı için karşılaştırılması (L=2.5 mm)

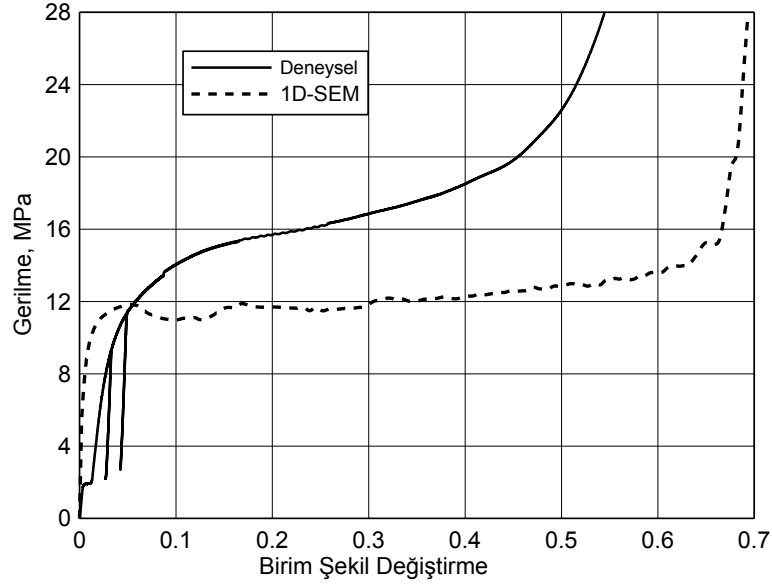
1.25 mm BCCZ mikro kafes bloğun sonlu elemanlar modelinden (1D-SEM) elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin deneysel olarak elde edilenle ile karşılaştırıldığı grafik Şekil 3.31'de verilmiştir. 1.25 mm hücre boyutu için sonlu elemanlar modeli deneyselde oldukça farklı sonuç vermektedir. Sonlu elemanlar modeli başlangıçta bir pik çökme gerilmesi gösterdikten sonra gerilmelerde çok az da olsa gevşeme

göstermektedir. Bu durum, sayısal modelde mikro yapıda burkulmaların oluştuğunu göstermektedir. Buna mukabil deneysel eğri çökme gerilmesinden sonra sürekli bir artış göstermektedir. Bu durumun önceki bölümlerde açıklandığı gibi küçük hücreli yapılarda mikro tellerin kesişim noktalarının karmaşık geometrisi ve toplanan mikro tozlar sebebiyle meydana geldiği düşünülmektedir. Bu etkiler daha fazla izafi yoğunluğa sahip BCCZ yapılarda daha da belirgin hal aldığı sonlu elemanlar sonucunun, deneysel sonuçlarla farkının daha fazla olmasından da anlaşılmaktadır. Fakat yine de sonlu elemanlar yaklaşımı çökme gerilmesini deneyselden % 20 farkla hesaplayabilmektedir.

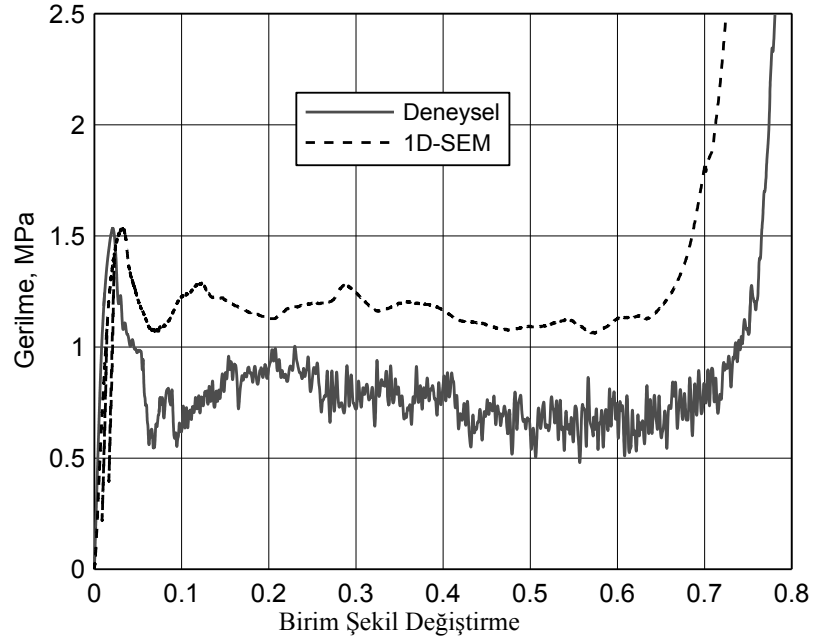


Şekil 3.30. 2.5 mm hücre boyutuna sahip BCCZ mikro kafeslerin sonlu elemanlar modelleriyle elde edilen deformasyon modlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (1-Deneysel; 2-Model 1; 3-Model 2)

Şekil 3.32, 2.5 mm hücre boyutuna sahip f_2 BCC kafes yapı için sonlu elemanlar ile deneysel gerilme eğrilerini birim şekil değiştirmelere göre karşılaştırmaktadır. Sonlu elemanlar modeli (1D-SEM), başlangıç çökme gerilmesini tahmin edebilmesine rağmen, kararlı çökme bölgesinde deneysel gerilme dağılımına göre oldukça düşük gerilme değerleri göstermektedir. Bu durumun artan izafi yoğunluğa ve f_2 BCC yapının Şekil 3.5’de görülebilen karmaşık çökme davranışından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan çalışmalarda deneysel davranışı tahmin edici bir model geliştirilememesi sebebiyle f_2 BCC mikro yapı için sayısal ve teorik modeller bu tez kapsamında daha fazla ele alınmamıştır.



Şekil 3.31. Hücre boyutu 1.25 mm olan BCCZ mikro kafes bloğun sonlu elemanlar ve deneysel gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 3.32. f_2 BCC mikro kafesi için sonlu elemanlar ve deneysel gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

3.7.2. Sınırlandırılmış Numune Testleri

Bu bölümde sınırlandırılmış numuneler kullanılarak gerçekleştirilen testlerle ilgili (basma ve kesme) olarak bir boyutlu elemanların kullanıldığı sonlu elemanlar modelleme

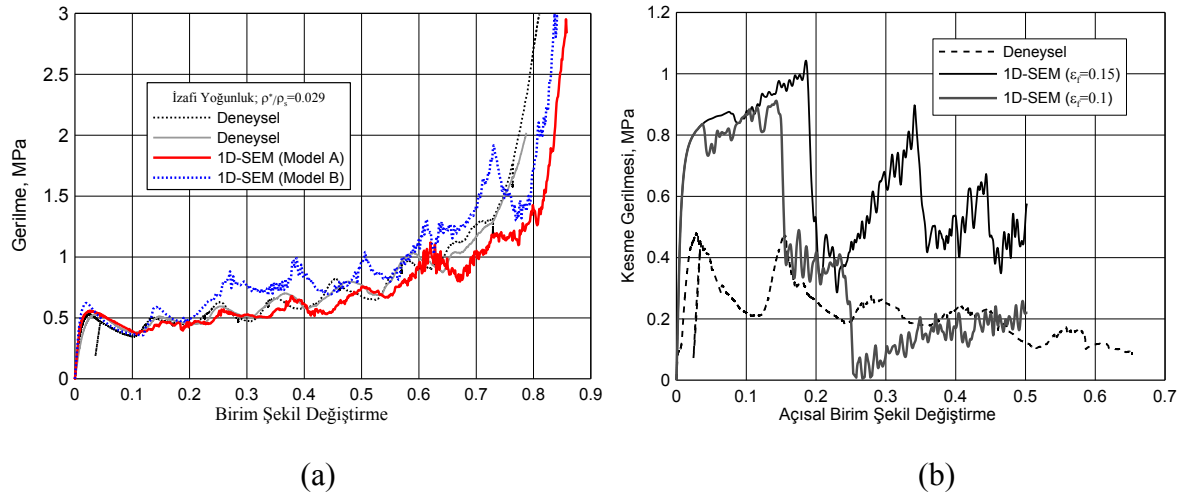
çalışmaları sunulacaktır. Simülasyonlar yalnızca 2.5 mm hücre boyutuna sahip BCC mikro kafes yapılarla sınırlandırılmıştır. Numunelerin yapıştırıcıdan arındırılmış kısmının kalınlığı 17.5 mm olduğundan sayısal modeller buna göre hazırlanmıştır. Burada iki farklı sonlu elemanlar model hazırlanmıştır. Bu modellerden birinde, önceki sonlu elemanlar modellerin de kısıtlanan, mikro tellerin kesişim bölgesi içindeki düğüm noktalarının dönme serbestlik dereceleri serbest bırakılmıştır (Model A). İkinci modelde ise bu dönme serbestlik derecesi koşulu kesişim bölgesi içindeki düğüm noktalarına önceki sonlu elemanlar modeline benzer şekilde uygulanmıştır (Model B).

Şekil 3.33'te sınırlandırılmış numune testleri için sonlu elemanlar ve deneysel sonuçların basma ve kesme testleri açısından karşılaştırılması verilmektedir. Görüldüğü üzere kesişim noktalarında dönme sınır şartı uygulanmayan model deneysel sonuçlarla ilgili neredeyse aynı sonucu vermektedir (Model B). Tüm gerilme eğrisi boyunca pik gerilmeler ve oluşumlar neredeyse birebir örtüşmektedir. Yalnızca yoğunlaşma bölgesinde bir fark ortaya çıkmaktadır. Sonlu elemanlar model biraz daha geç bir şekilde yoğunlaşma göstermektedir. Model B ise gerilmelerin pik değerlerinde diğer modele göre biraz daha yüksek pik gerilme değerlerine sahip olmaktadır. Fakat yine de deneysel pik değerlerin oluşum yerlerini iyi bir şekilde tahmin etmektedir. İki sayısal model arasındaki pik gerilmelerdeki fark, düğüm noktalarında dönme olduğunu göstermektedir. Bunun sonucunda, kesişim bölgesi içindeki düğüm noktaları dönmeye serbest olan Model A'daki gerilme değerleri Model B'den daha düşük değer almaktadır. Çıkan sonuçlar gerçek numunede de kesişim noktalarında mikro tellerdeki burkulmalar esnasında dönme olduğunu göstermektedir. Mikro tellerin bağlantı noktalarındaki dönmelerin burkulma yükünü belli bir derecede düşüreceği kolayca anlaşılabilir.

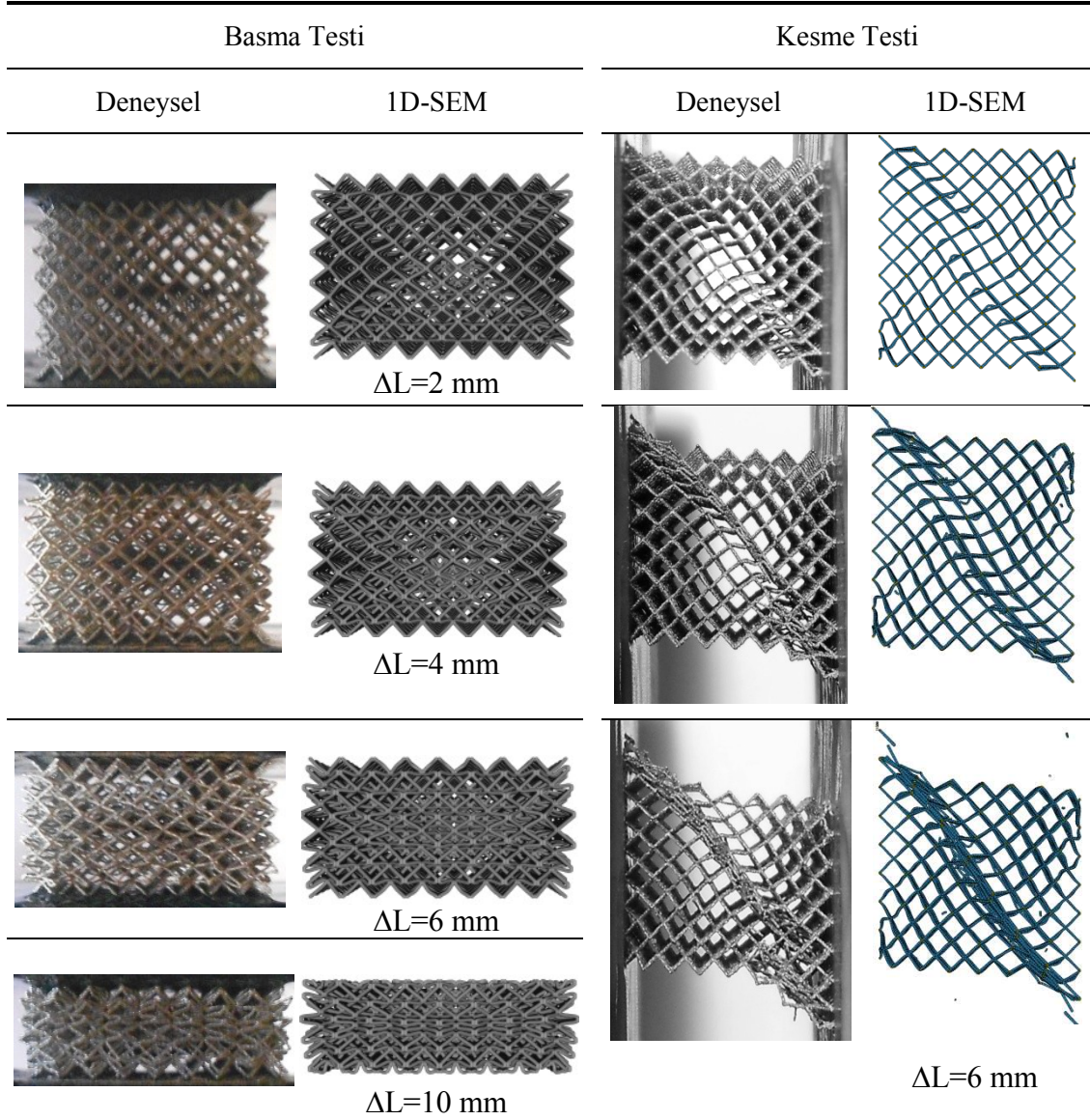
Kesme testleri açısından ise basma testlerine göre çok farklı bir sonuç elde edilmektedir (Şekil 3.33.b). Kesme testlerinde sonlu elemanlar modeli deneysel sonuçtan çok çok farklı bir davranış sergilemektedir. Sonlu elemanlar modellerinde gerilme değerleri 0.9 MPa seviyelerine çıktıktan sonra ani düşüşler gösterirken deneysel sonuç yalnızca 0.5 MPa gerilme değerinde keskin bir düşüş göstermektedir. Bölüm 3.3'ten hatırlanacağı üzere yüklemenin başında köşelerde bulunan mikro teller içerdikleri mikro çentiklerin etkisiyle kopmaya maruz kalmaktaydı. Bu durum deneysel gerilme davranışını olumsuz etkilemektedir. Bu çok karmaşık kopma yüklemesini modellemek için iki tip kopma birim uzamasını içeren model oluşturulmuştur. Bunlar Şekil 3.33b'de görüldüğü üzere $\varepsilon_f=0.1$ ve $\varepsilon_f=0.15$ kopma birim uzama değerlerini içeren modellerdir. Ancak her iki

model de deneysel davranışı yakalamaktan çok uzak sonuçlar ürettiği şekilden görülmektedir. Kopma birim uzamasının düşük alınması çökme gerilmesini çok fazla etkilememekle birlikte yalnızca genel bir gerilme düşüşüne sebep olmaktadır. Görüldüğü üzere bir boyutlu elemanların kullanıldığı modellerle kesme davranışının tahmin edilebilmesi çok zordur. Bundan dolayı çok daha gerçeğe uygun sayısal modellerin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca kullanılacak modellerde birim kopma uzaması değeri yapı içerisinde her bir eleman için sabit olmamalıdır.

Deformasyon şekilleri açısından hem basma hem de kesme modelleri deneysel deformasyon modellerine benzer davranış göstermektedir (Şekil 3.34). Basma testleri açısından bakılırsa, sonlu elemanlar modelinde de deneyselle benzer şekilde kafes bloğun merkezinde çökme başlıyor (2 mm çekme mesafesi). Kesme yükleme durumunda da sayısal model deneysel modele benzer şekilde köşeleri boyunca diyagonal kesme deformasyon davranışı göstermektedir. Fakat bu tam kesme bandı oluşumu, 4 mm kesme yükleme resimlerinden de görüldü gibi deneyselden daha geç oluşmaktadır. Bu durum köşelerdeki mikro tellerin, gerçek numunedeki kadar erken kopmamalarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.33. BCC mikro kafes yapı için sonlu elemanlar ve deneysel sonuçların sınırlandırılmış numune testleri için birim şekil değiştirmelere bağlı olarak karşılaştırılması; a) Basma yükleme, b) Kesme yükleme



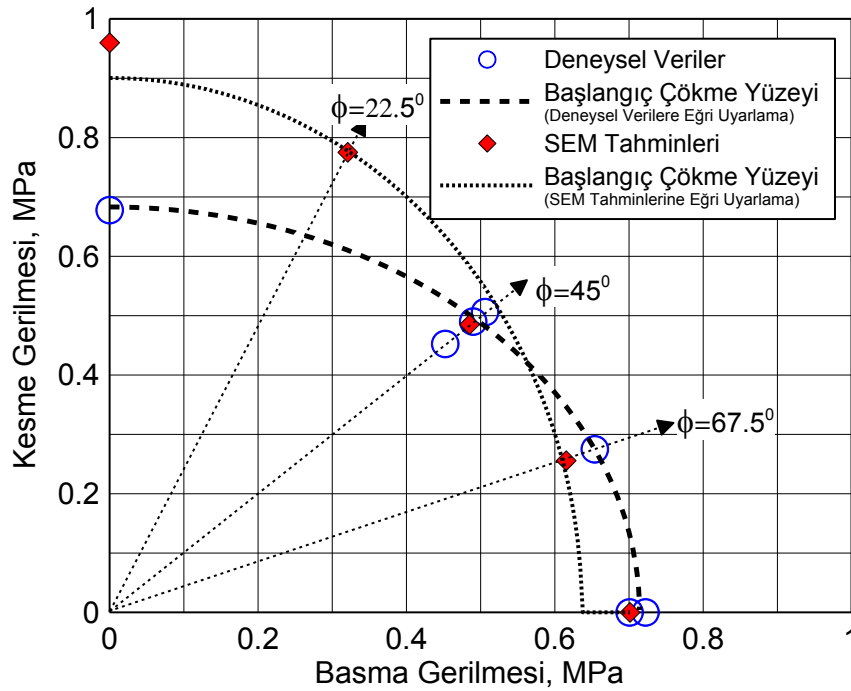
Şekil 3.34. Basma ve kesme yüklemesi için deneysel ve sonlu elemanlar modellerine ait deformasyon modlarının karşılaştırılması

3.8. BCC Kafes Yapılarda Bileşik Mukavemet Davranışının İncelenmesi ve Çökme Yüzeyleri

Bu bölümde BCC mikro kafes yapıların çökme yüzeyleri ve bileşik mukavemet davranışları incelenecektir. Bu sebeple 2.5 mm hücre boyutuna sahip BCC mikro kafes malzemeler için Şekil 3.35'deki gibi bir çökme yüzeyini gösteren, sonlu elemanlar (1D-SEM) tahminlerini de içeren bir grafik hazırlanmıştır. Kesme testlerinden yalnızca diyagonal kesme deformasyon moduna sahip testin sonucu kullanılmıştır. Diğer modlar istenmeyen ve enerji sönümlemesi düşük deformasyon mekanizmaları olduğundan ihmal edilmiştir. Sonlu elemanlar modelleri 90° , 67.5° ve 45° kuvvet açılarında gerilmeleri

oldukça iyi tahmin etmektedir. Fakat saf kesme yüklemesi ve 22.5° kuvvet açısındaki bileşik yükleme durumlarında deneylerden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu farkların oluşma nedenlerinden daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Çökme yüzeyi eğrisini elde etmek için deneysel veri noktalarına “ $f_0(\sigma, \tau) = (\sigma/\sigma_0)^2 + (\tau/\tau_0)^2 - 1$ ” şeklinde bir eğri uyduruldu. Bu eğri eliptik bir yapıda olup çökme yüzeyini en iyi şekilde temsil edeceği düşünüldüğünden tercih edilmiştir. Eğri uydurma prosedürü sonunda basma ve saf kesme durumlarına ait gerilme değerleri sırasıyla, $\sigma_0 = 0.714$ MPa ve $\tau_0 = 0.683$ MPa şeklinde belirlenmiştir. Bu değerlerle çizilen çökme yüzeyi Şekil 3.25’de görülmektedir. Elde edilen çökme yüzeyi hemen hemen dairesel bir forma sahiptir. Yani kesme ve yüklemde gerilme değerleri aynı çıkmaktadır.

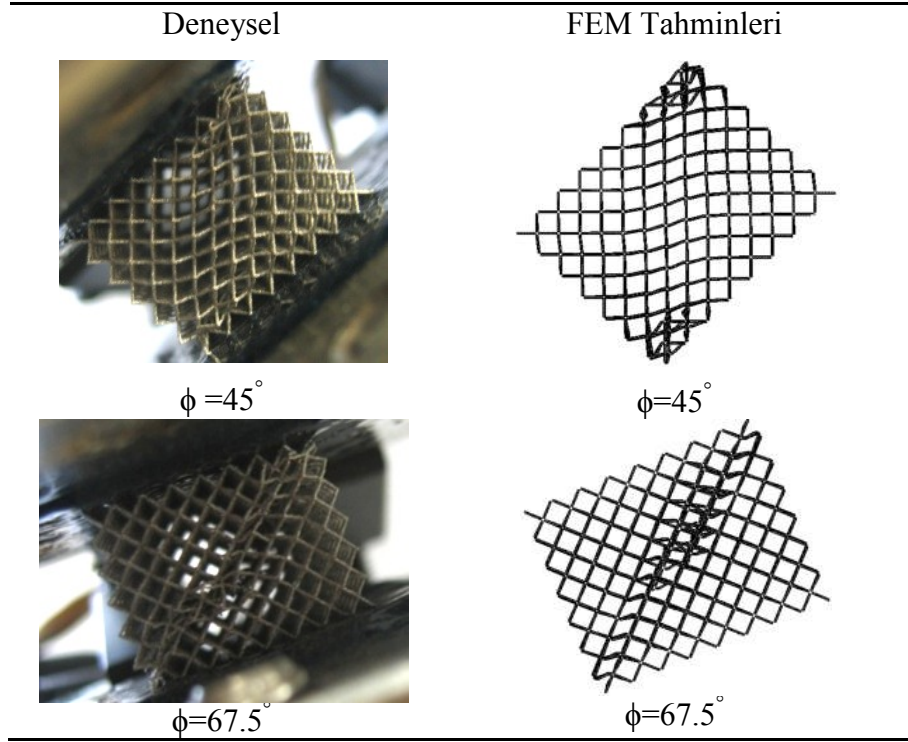
Sonlu elemanlar tahminlerine benzer bir eğri uydurulunca, çökme yüzeyi eliptik bir hal almaktadır (Şekil 3.35). Saf kesme gerilmesi 0.9 MPa iken basma gerilmesi 0.65 MPa şeklinde oluşmaktadır. Bu durum daha öncede belirtildiği gibi sonlu elemanlar modellerinin kesme davranışını tam olarak tahmin edememesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.35. BCC mikro kafes yapıların çökme yüzeyleri (L=2.5 mm)

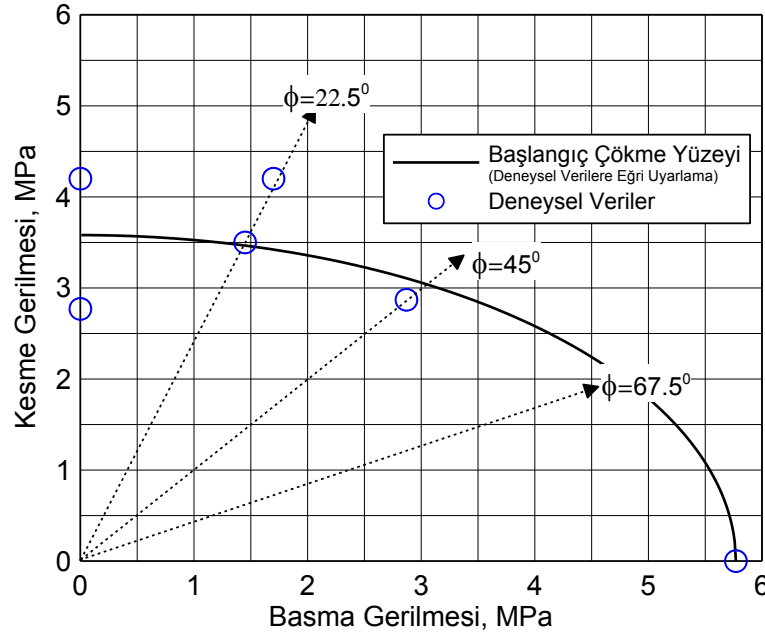
Bileşik yükleme durumlarında elde edilen sayısal deformasyon mekanizmalarının (67.5° ve 45° kuvvet açıları) deneyselle karşılaştırılmaları Şekil 3.36’da verilmiştir. Her iki sayısal deformasyon mekanizması başlangıcı deneysel sonuçlara oldukça benzer şekilde

gelişim göstermektedir. 45° kuvvet açısında hem deneysel hem de sayısal modelde zıt köşelerdeki mikro tellerde burkulma oluşmakta ve ayrıca kafes gövdesi genel olarak bir “s” şeklinde deformasyona maruz kalmaktadır. 67.5° kuvvet açısında ise hem sayısal modelde hem de gerçek numunede diyagonal kesme bandı şeklinde bir deformasyon mekanizması meydana gelmektedir.



Şekil 3.36. Bileşik yükleme durumlarında elde edilen sayısal ve deneysel çökme mekanizmalarının karşılaştırılması

1.25 mm hücre boyutuna sahip BCC mikro kafes yapılar için elde edilen çökme yüzeyinin genel davranışı 2.5 mm hücre boyutu için elde edilenden farklı olmaktadır (Şekil 3.37). 1.25 mm hücre boyutlu BCC kafes yapılarda tam diyagonal kesme mekanizması elde edilemediğinden burada elde edilen tüm kesme ve bileşik yükleme testlerinin sonuçları kullanılmıştır. Deneysel verilere eliptik eğri uydurma sonucunda, saf kesme gerilmesi 3.6 MPa iken basma gerilmesi 5.7 MPa şeklinde oluşmaktadır. Görüldüğü gibi saf kesme ve basma gerilmeleri arasında ciddi bir fark oluşmaktadır. Çökme yüzeyi eliptik bir hal almaktadır. Yani kuvvet açısı azaldıkça 1.25 mm hücre boyutuna sahip BCC kafes yapıların mukavemeti azalmaktadır. Bu durum 2.5 mm hücre boyutuna sahip kafes yapılarda geçerli değildir.

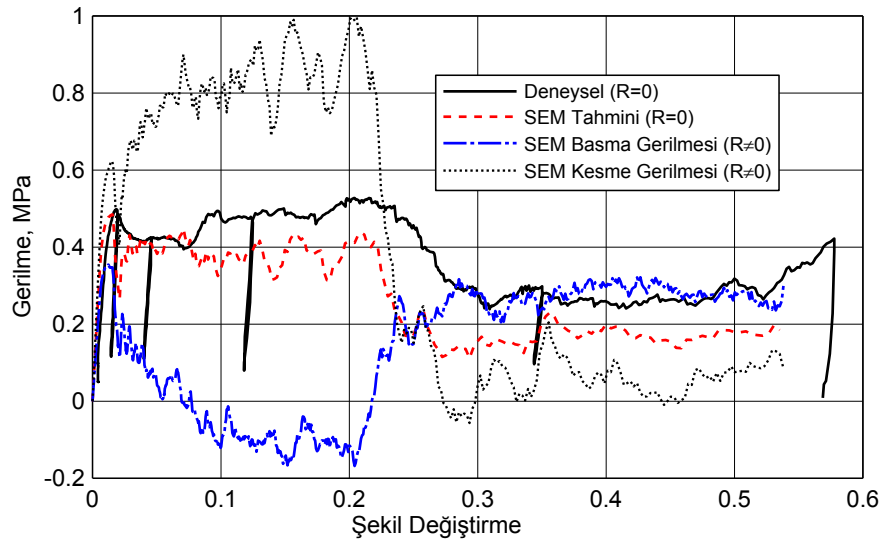


Şekil 3.37. BCC mikro kafes yapıların çökme yüzeyleri (L=1.25 mm)

3.9. Bileşik Yükleme Durumunda Yatay Reaksiyon Kuvvetinin Öneminin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi

Hatırlanacağı üzere bileşik yükleme testlerinde oluşan basma ve kesme gerilmelerinin hesabında eşitlik (2.1) ve eşitlik (2.2) kullanılmıştı. Deneysel test cihazının yatay reaksiyon kuvvetini ölçme kabiliyetine sahip olmamasından dolayı, bu eşitlikler kullanılırken yatay reaksiyon kuvvetinin (R) bileşeni ihmal edildi. Kolayca anlaşılabileceği üzere 45° kuvvet açısında hem kesme hem de basma gerilmesi eşitlik (2.1) ve (2.2)'ye göre, yatay reaksiyon kuvveti ihmal edilirse aynı çıkmaktadır. Yatay reaksiyon kuvvetinin bileşik yükleme durumunda gerilme değerlerine etkisini incelemek için Doyoyo ve Mohr (2002) yatay reaksiyon kuvvetini ölçen bir yük hücresi sisteme ekleyerek modifiye edilmiş bir Arcan test cihazı kullanmışlardır. Köpük malzemeler için gerçekleştirilen testler sonucunda, örneğin 45° kuvvet açısında kesme ve basma gerilmeleri için farklı cevaplar elde etmişlerdir. Bu sebeple reaksiyon kuvvetinin etkisini sayısal olarak görmek için 45° kuvvet açısında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonuçlarından Şekil 3.38'deki eğriler hazırlanmıştır. Öncelikle yatay reaksiyon kuvvetini içermediği durumda sayısal modelin geçerliliği deneysel sonuçla sağlandı. Aynı zamanda deneysel sonuç da yatay reaksiyon kuvvetini içermemektedir. Görüldüğü gibi sayısal model deneysel sonuçları hem başlangıç pik gerilme değerleri hem de gerilme dağılımı açısından oldukça iyi bir şekilde karşılamaktadır. Böylece geçerliliği sağlanan sonlu elemanlar çözümü kullanılarak, yatay

reaksiyon kuvvetinin ilave edildiği kesme ve basma gerilmesi dağılımları hesaplanılmıştır. Şekil 3.38'den görüldüğü gibi hesaplanan kesme ve basma gerilme dağılımı, yatay reaksiyon kuvvetinin ihmal edildiği gerilme dağılımından oldukça farklıdır. Basma gerilmesi 0.36 MPa başlangıç değerinden sonra hızla düşmekte ve negatif değerler almakta iken, kesme gerilmesi 0.61 MPa değerinde bir pik yapmasına rağmen hızla artışa devam etmektedir. 0.2 birim şekil değiştirmeden sonra kesme gerilmesi hızla düşmekte ve sıfıra yakın değerlere ulaşmaktadır. Buna mukabil basma gerilmesinde artış olmaktadır. Sonuç olarak, yapılan sayısal analiz göstermektedir ki, yatay reaksiyon kuvveti hesaplanılan basma ve kesme gerilmelerinin dağılımlarında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca dikkat edilirse, yatay reaksiyon kuvvetinin etkisini içeren kesme ve basma gerilme eğrilerinin ortalaması, yatay reaksiyon kuvvetinin etkisini içermeyen gerilme dağılımına neredeyse eşittir. Bu durum pik gerilme değerlerinden de kolayca anlaşılabılır. Kesme ve basma gerilmesinin pik değer ortalaması 0.46 MPa (Kesme için 0.61 MPa ve basma için 0.36 MPa) olmaktadır ve buna mukabil yatay reaksiyon kuvvetinin etkisini içermeyen eğrinin başlangıç pik değeri 0.46 MPa civarındadır. Kolayca anlaşılabacağı üzere, kesme için 0.61 MPa ve basma için 0.36 MPa değerleri Şekil 3.35'de 45° için yerine konulursa yalnızca noktanın yerini çökme eğrisi üzerinde öteleyecektir. Çökme eğrisinin şeklinde herhangi bir şekilde değiştirmeyecektir. Bu sebeple yatay reaksiyon kuvveti olmaksızın hesaplanan gerilme değerleri çökme yüzeyinin şekli hakkında ön bilgi vermesi açısından kullanılabilir.



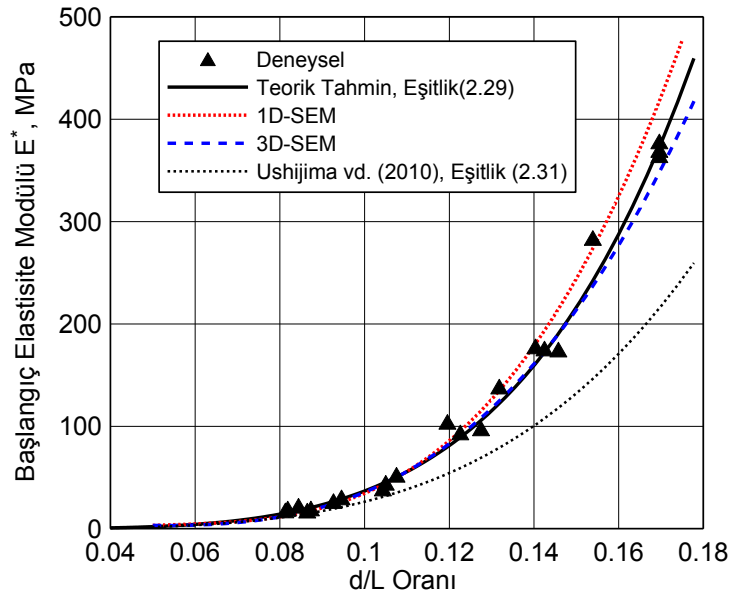
Şekil 3.38. Arcan testi esnasında oluşan yatay reaksiyon kuvvetinin etkisini gösteren eğriler (kuvvet açısı $\phi = 45^\circ$)

3.10. Kafes Yapılar için Sayısal, Teorik ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Bu bölümde hem BCC hem de BCCZ mikro kafes yapılar için sonlu elemanlar modellerinden ve teorik bağıntılardan elde edilen başlangıç elastisite modülü ve çökme gerilme değerlerinin, d/L oranına göre değişimleri verilecektir.

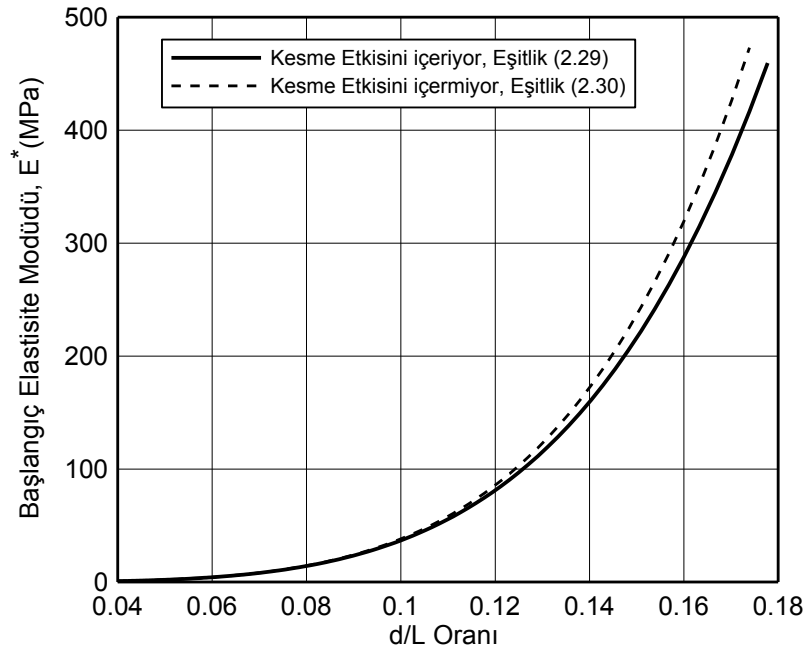
3.10.1. BCC Kafes Yapılar

Başlangıç elastisite modülü açısından BCC kafes yapılara ait deneysel, sayısal ve teorik sonuçların d/L oranına göre değişimleri Şekil 3.39’da görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, teorik ve her iki sonlu elamanlar modeli tahminleri d/L oranının her bir aralığı için deneysel sonuçlarla gayet uyumludur. Bu çalışmada geliştirilen teorik eşitlik (2.29)’un cevabı, tüm hücre boyutları için mikro kafeslerin deneysel sonuçlarını tamamıyla tahmin ederken, Ushijima vd. (2010) tarafından geliştirilen eşitlik (2.31) ise yalnızca $d/L < 0.1$ aralığında iyi sonuçlar verebilmektedir. $d/L > 0.1$ değerleri için Ushijima vd. (2010) deneysel sonuçlardan çok farklı tahminlere ulaşmaktadır. Örneğin $d/L = 0.16$ değerinde, Ushijima vd. (2010) deneylerden yaklaşık % 56 daha düşük elastisite modülü tahmini gerçekleştirmektedir. Bu ciddi farkın mikro tellerin kesişim bölgelerinin etkilerinin dikkate alınmamasından kaynaklandığı aşikardır.



Şekil 3.39. BCC mikro kafes yapılar için deneysel, teorik ve sayısal başlangıç elastisite modülü değerlerinin d/L oranına göre değişimi

Eşitlik (2.29), hatırlanacağı üzere kesme etkilerini içermektedir. Bu aşamada kesme etkilerinin elastisite modülünün hesabında ne derece etkin olduğunun görülmesi için, eşitlik (2.29) ve kesme teriminin ihmal edilerek elde edilen eşitlik (2.30)'un cevaplarının karşılaştırılmasına yönelik Şekil 3.40'da görülen grafik hazırlanmıştır. Açıkçası, grafikten kesme etkilerinin elastisite modülü değerlerinin tahminlerinde önemli bir rol oynamadığı görülmektedir. Örneğin $d/L=0.16$ oranında her iki eşitlik arasında yalnızca % 3-4 civarında fark oluşmaktadır. Bu sebeple BCC mikro kafeslerin elastisite modülü hesabında kesme etkilerinin ihmal edilmesi çok önemli bir hataya yol açmamaktadır.



Şekil 3.40. BCC mikro kafes yapılar için teorik ifadelerde dikkate alınan kesme teriminin etkisini gösteren eğriler

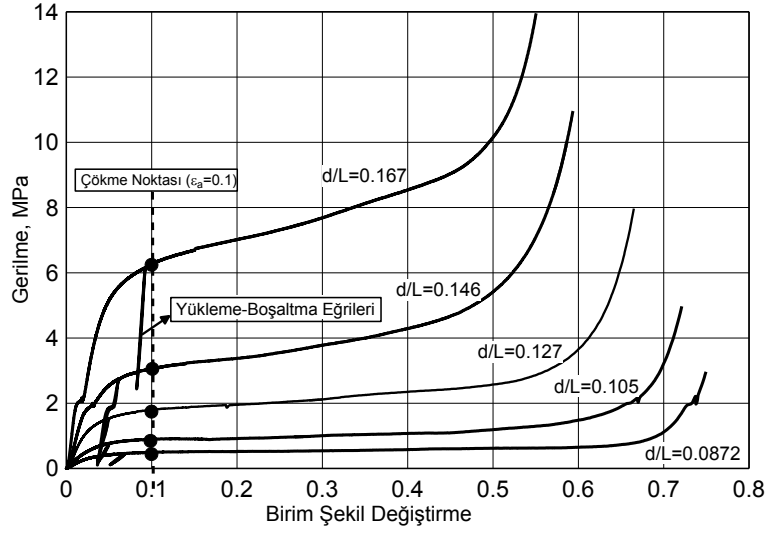
Bölüm 2.3'ten hatırlanacağı üzere teorik başlangıç çökme gerilmelerinin hesaplanabilmesi için eşitlik (2.44)'deki " β " katsayısının bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca " β " katsayısının hesaplanabilmesi için en başta eşitlik (2.51)'de mevcut olan " ϵ_a " değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Hatırlanacağı üzere " ϵ_a " bir kiriş kesitinde dış fiberlerde oluşan birim şekil değiştirme değerini (birim uzama) göstermektedir ki bu da lineer plastik malzemeler için kesitte oluşan maksimum birim şekil değiştirme değeridir. Bu çalışmada " ϵ_a " değerinin belirlenmesinde deneysel basma testlerinden yararlanılmıştır. Bu amaçla Şekil 3.41'de farklı hücre boyutuna sahip (d/L ile ifade edilmiş) BCC mikro kafes yapıların basma davranışlarının karşılaştırılması grafik

formda verilmiştir. Dikkat edilirse tüm kafes yapıların başlangıç çökmeleri hemen hemen aynı birim şekil değiştirme değerinde meydana gelmektedir. Bu değerde, grafikten de görüleceği üzere yaklaşık 0.1 civarındadır. Bu sebeple bu çalışmada, BCC kafes yapıların başlangıç plastik çökme gerilmelerinin teorik olarak elde edilmesine yönelik, çökme noktasında mikro tellerde eğilme esnasında kesitte oluşan maksimum birim şekil değiştirme değerinin, ϵ_a birim şekil değiştirme değerine eşit olduğu kabulü yapılmıştır. Yani mikro telin kesitinde oluşan maksimum birim şekil değiştirme değerinin 0.1 olması durumunda kafes bloğun çökmesinin gerçekleşmekte olduğu farz edilmiştir. “ $\epsilon_a = 0.1$ ” değeri ve eşitlik (2.51) kullanılarak eşitlik (2.49)’dan plastik çökme momenti;

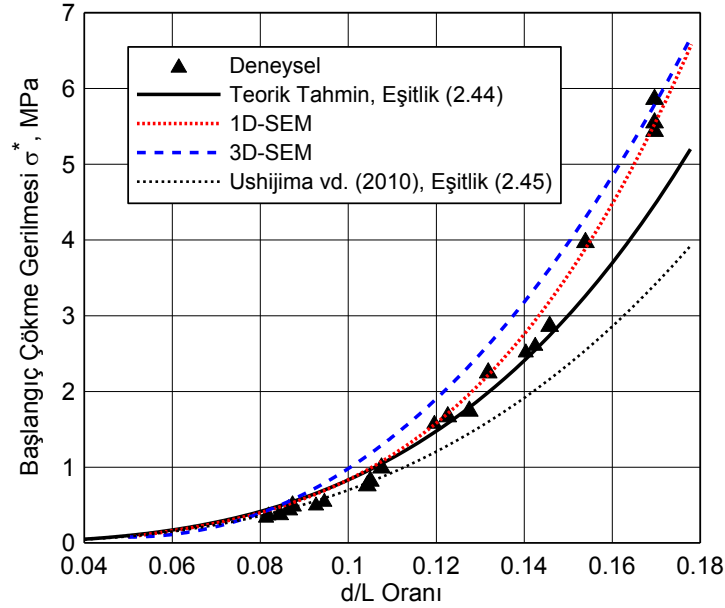
$$M_o = 0.212\sigma_o d^3 \quad (3.1)$$

şeklinde elde edilir. Böylelikle, “ $\beta=0.212\cong 4/19$ ” şeklinde elde edilir. Eğer “ $\epsilon_a = 0.075$ ” şeklinde bir seçim yapılmış olsaydı “ β ” değerinde yalnızca % 5’lik bir fark oluşacaktı. Bu sebeple “ ϵ_a ” için 0.075-0.1 arasındaki herhangi bir değer seçimi önemli bir fark yapmayacaktır.

Şekil 3.42 BCC mikro kafes yapılar için elde edilen deneysel, sayısal ve teorik çökme gerilmesi değerlerinin d/L oranına göre değişimlerini içermektedir. Görüldüğü gibi hem 1D-SEM hem de 3D-SEM tahminleri deneysel değerlere oldukça yakın olmaktadır. Teorik tahminler ise d/L<0.14 değerlerine kadar tatmin edici cevaplar verirken, bu değer üstündeki d/L oranı değerlerinde deneyselden biraz düşük değerler vermektedir. Örneğin d/L=0.16 değeri için eşitlik (2.44) deneysel sonuçlardan yaklaşık % 18 daha düşük değer tahmin etmektedir. Buna karşılık Ushijima vd. (2010) tarafından geliştirilen eşitlik (2.45)’den her bir d/L aralığında daha iyi sonuç vermektedir. Eşitlik (2.45) için “ $\sigma_0=370$ MPa” olarak alınmıştır. Bu değer, Ushijima vd. (2010) tarafından belirlenen % 5’lik birim şekil değiştirme değerine karşılık gelen gerime değeridir ve Şekil 3.19 vasıtasıyla hesaplanmıştır.



Şekil 3.41. Farklı hücre boyutuna sahip BCC kafes yapıların deneysel basma sonuçlarının karşılaştırılması ve birim çökme şekil değiştirme değerinin belirlenmesi (ϵ_a)



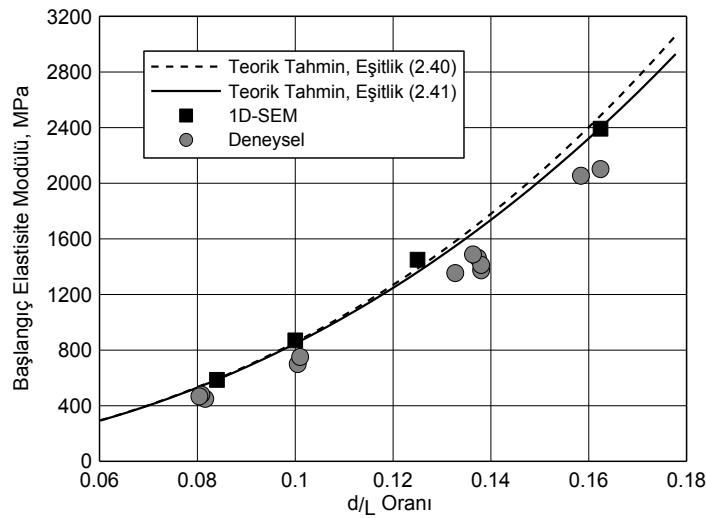
Şekil 3.42. BCC mikro kafes yapısı için deneysel, teorik ve sayısal başlangıç çökme gerilmelerinin d/L oranına göre değişimi

3.10.2. BCCZ Kafes Yapılar

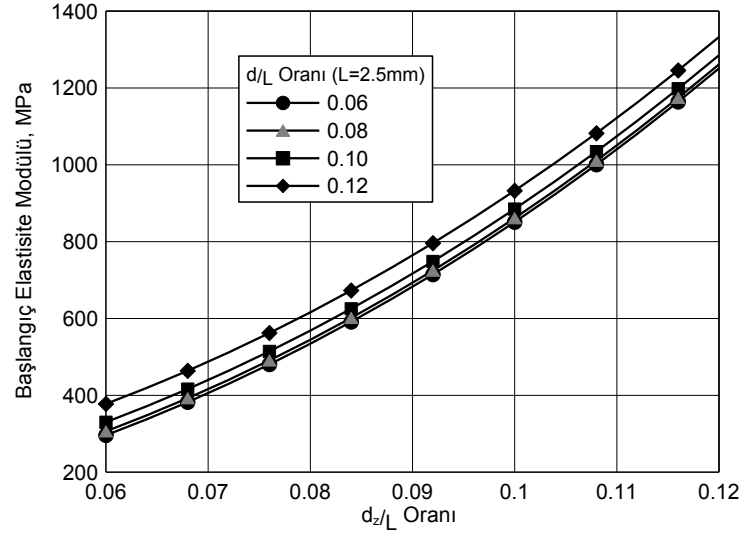
BCCZ mikro kafes yapılar için elde edilen sayısal ve teorik başlangıç elastisite modülü değerlerinin d/L oranına göre değişimleri deneysel verilerle karşılaştırmaları olarak Şekil 3.44'te verilmiştir. Hem sayısal (1D-SEM) hem de teorik sonuçlar deneysel verilerden tüm d/L değerleri için yaklaşık % 10 daha fazla tahmin değerlerine sahip

olmasına rağmen, genelde iyi bir yaklaşım sağlamaktadırlar. Eşitlik (2.40) ve eşitlik (2.41)'nin teorik tahminleri arasında önemli bir fark bulunmamaktadır. Bu durum eğik mikro tellerin BCCZ yapının başlangıç elastisite modülü üzerinde önemli bir etkisi bulunmadığını göstermektedir. Bu sebeple, daha basit formda olan ve eğik mikro tellerin katkısının ihmal edildiği eşitlik (2.41), teorik başlangıç elastisite modülünün tahmini için yeterli olduğu söylenebilir.

BCCZ mikro kafes yapılarda dikey mikro tellerin çapının, kafes yapının elastisite modülü üzerindeki etkisini göstermek için Şekil 3.46'daki gibi bir grafik verilmiştir. Grafik 2.5 mm hücre boyutuna sahip kafes yapı için düzenlenmiş olup, d_z/L oranı değerlerine göre elastisite modülünün değişimleri bir kaç farklı d/L değeri için çizilmiştir. Eğrilerden anlaşıldığı üzere aynı d/L oranı için elastisite modülü d_z/L oranına göre hızlı bir artış göstermektedir. Yani dikey mikro tellerin artışıyla elastisite modülünde ciddi artış meydana gelmektedir. Ters düşünlüğünde ise, aynı d_z/L oranında d/L değeri arttıkça önemsiz derecede bir artış gözlemlenilmektedir. Örneğin, $d/L=0.12$ sabit değeri için d_z/L oranının 0.06-0.12 değerleri aralığında elastisite modülünde yaklaşık üç kat artış meydana gelmektedir. Ters durumda $d_z/L=0.12$ sabit değerinde d/L oranının 0.06-0.12 değerleri aralığında elastisite modülünde yalnızca % 5'lik bir artış meydana gelmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, BCCZ kafes yapıların mekanik davranışları çok büyük ağırlıkta dikey mikro teller tarafından domino edilir. Ayrıca elde edilen sonuç Bölüm 3.5'teki sonuçları onaylar niteliktedir.



Şekil 3.43. BCCZ mikro kafes yapıların deneysel, sayısal ve teorik başlangıç elastisite modüllerinin d/L oranına göre değişimleri

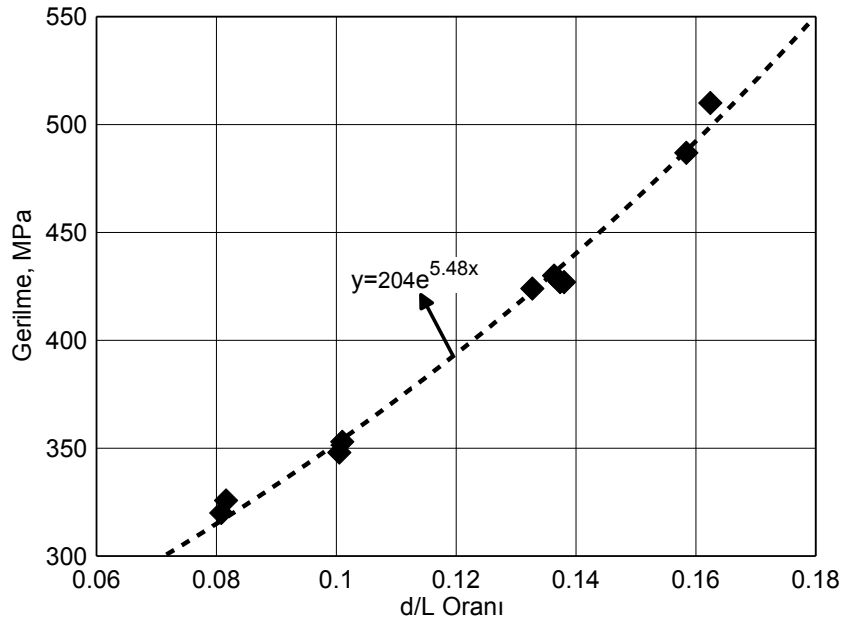


Şekil 3.44. BCCZ mikro kafes yapılarda dikey mikro tellerin çaplarının eğik mikro tellerinkine göre farklı olması durumlarında başlangıç elastisite modülünün değişimi

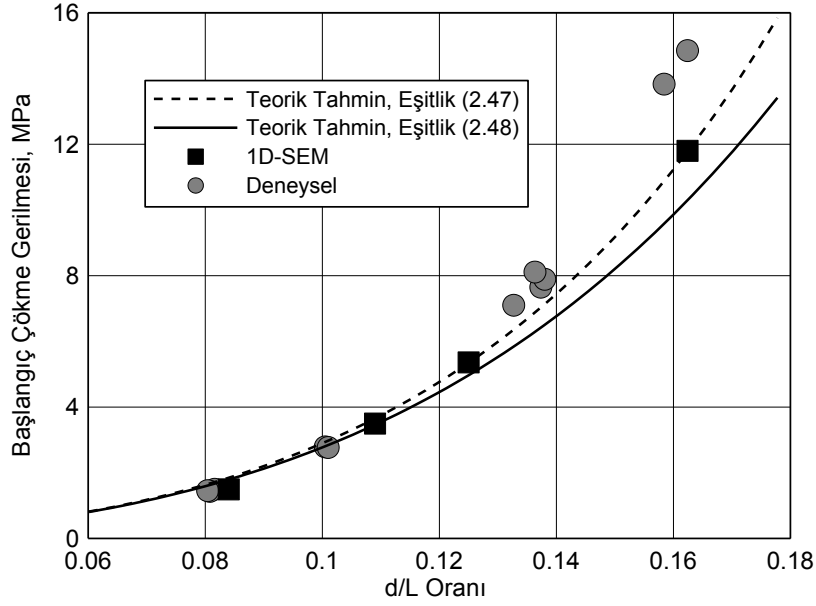
Bölüm 2.4.4'ten hatırlanacağı üzere BCCZ kafes yapıların başlangıç çökme gerilme değerlerini tahmin etmek için geliştirilen eşitlikler " σ_f " ile tanımlanan bir gerilme ifadesini içermektedir. Bu gerilme ifadesi dikey mikro tellerin plastik şekil değiştirme pekleşmesi etkisini içeren çökme anındaki gerilme değeridir. Bu gerilme değerinin belirlenmesinde de BCC mikro yapılardaki gibi deneysel sonuçlardan faydalanılacaktır.

Şekil 3.3'te BCCZ mikro kafes yapıların deneysel basma testlerinden elde edilen sonuçlara göre başlangıç çökme gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirme değerleri hücre boyutuna göre farklılık göstermekteydi. Yani BCC mikro yapılardaki gibi tüm hücre boyları için hemen hemen aynı birim şekil değiştirme değerinde (Şekil 3.41) çökme olmamaktadır. Burada da BCCZ mikro kafes tellerin çökmesinin, dikey mikro tellerdeki plastik birim uzama değerinin BCCZ kafes yapının çökmesinin başladığı birim şekil değiştirme değerine eşit olduğunda başlayacağı kabulü yapılmıştır. " σ_f " gerilmesini tanımlamak için ise belirlenen birim şekil değiştirme değerlerine karşılık gelen gerilme değerleri, mikro tellerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinden (Şekil 3.19) okunmuştur. Okunan gerilme değerleri, daha öncede belirtildiği gibi " σ_f " değerine karşılık gelmektedir. Gerilmelerin d/L oranına göre değişimleri Şekil 3.45 verilmiştir. Görüldüğü gibi " σ_f " gerilme değerleri hücre boyutuna göre değişmektedir. Bu sebeple şekilde gösterildiği gibi " σ_f " değerlerinin d/L oranına göre değişimlerini temsil eden en iyi ifade üssel fonksiyon kullanılarak elde edilmiş oldu.

“ σ_f ” ifadesi eşitlik (2.47) ve (2.48) denklemlerinde yerine konularak elde edilen başlangıç çökme gerilmelerinin d/L oranına göre değişimleri sayısal (1D-SEM) ve deneysel sonuçları da içerecek biçimde Şekil 3.46’daki gibi verilmiştir. Sonlu elemanlar, teorik tahminler ve deneysel sonuçlar $d/L < 0.14$ değerleri için tam olarak uyumludur. d/L oranı arttıkça hem sonlu elemanlar hem de teorik tahminler deneysel verilerden daha düşük değerler vermektedir. Örneğin $d/L=0.16$ değerinde sonlu elemanlar ve teorik tahminler deneysel veriden % 23 civarında daha düşük olmaktadır. Daha önceden bahsedildiği gibi bu fark, mikro tellerin kesişim bölgesindeki ergimemiş mikro tozlar ve değişken çaplar nedeniyle mikro telin efektif boyunun kısalmasına bağlı olarak meydana gelen gerçek numunelerdeki mukavemet artışından kaynaklanır. İlave olarak, Şekil 3.46 eğik mikro tellerin etkisinin ihmal edildiği eşitlik (2.48)’den elde edilen eğriyi de içermektedir. Görüldüğü gibi d/L oranı arttıkça eğik mikro tellerin çökme gerilmesi üzerindeki etkisi artmaktadır. Dikkat edilirse, Şekil 3.43 ve Şekil 3.46’dan eğik mikro telleri çökme gerilmesine olan etkisi elastisite modülüne olan etkiden daha fazla olduğu kolayca görülmektedir.



Şekil 3.45. BBCZ mikro yapıların deneysel testlerinden elde edilen başlangıç çökme gerilmesi değerlerinin d/L oranına göre değişimi

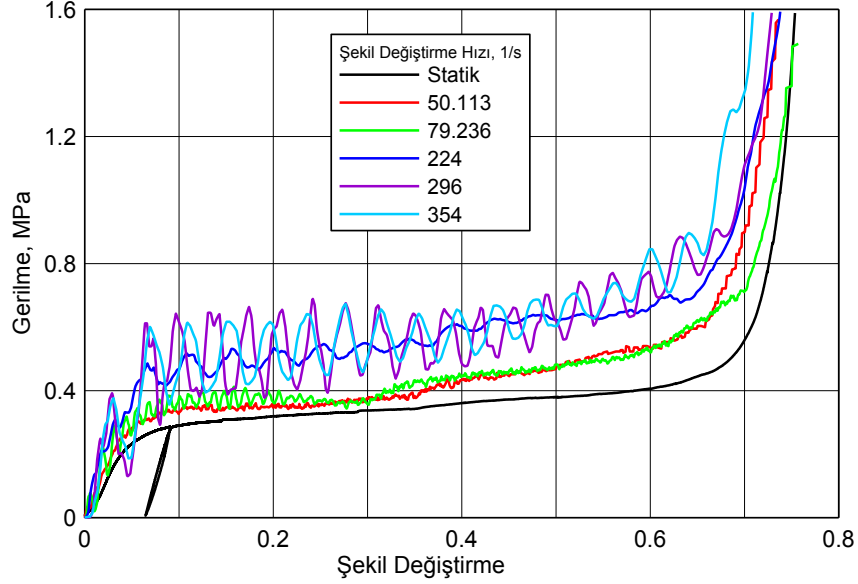


Şekil 3.46. BCCZ mikro yapılar için deneysel, sayısal ve teorik başlangıç çökme gerilmesi değerlerinin d/L oranına göre değişimleri

3.11. Mikro Kafes Yapıların Dinamik Basma Test Sonuçları

Bu bölümde düşme testi ile elde edilen sonuçlar irdelenecektir. Düşme testlerinde 2.5 mm hücre boyutuna sahip BCC ve BCCZ mikro kafes numuneler kullanıldı. Kullanılan numune ölçüleri $12.5 \times 12.5 \times 12.5 \text{ mm}^3$ şeklinde idi. Düşme kütlesi toplamda 0.700 kg civarında ayarlandı. Şekil 3.47 çeşitli şekil değiştirme hızlarında BCC mikro kafes numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini içermektedir. Görüldüğü üzere şekil değiştirme hızı arttıkça eğrilerde şiddetli salınmalar meydana gelmektedir. Bu salınmaların düşme kütlesi üzerinde meydana gelen elastik dalgalar sebebiyle gerçekleştiği düşünülmektedir. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi yük hücresi darbe kütlesi ve ilave ağırlık arasına monte edilmektedir. Darbe kütesinin numuneye ilk teması anında ortaya çıkan elastik dalga, darbe kütlesi ve ilave kütle arasında yük hücresi üzerinde çok kısa sürelerde gidip gelmektedir. Bu durumda yük hücresinin ölçtüğü değerleri etkilemektedir. Darbe hızı arttıkça elastik dalganın genliği artmakta ve bunun sonucunda gerilme eğrisi bundan daha şiddetli şekilde etkilenmektedir. Şekil değiştirme hızları 79.236 ve 354 s^{-1} değerlerinde elde edilen gerilme eğrilerindeki salınmalar buna örnektir. Bu sebepten dolayı konvansiyonel düşme testleri belli bir darbe hızından sonra güvenilir sonuçlar verememektedir. Buna dayanarak bu çalışmada da sonuçlar nispeten düşük şekil değiştirme hızlarıyla sınırlandırılmıştır. BCCZ yapılar çok düşük birim şekil değiştirme

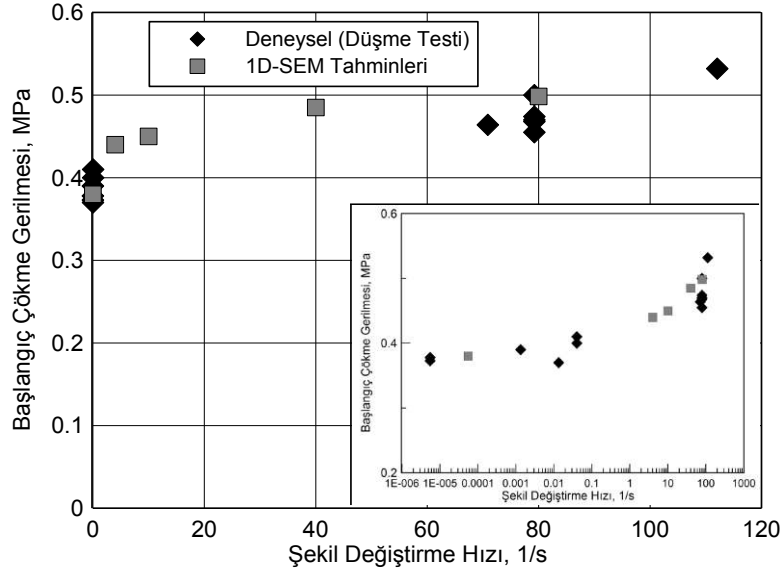
hızında çökme gerilmesi gösterdiği için, BCC yapılara göre daha yüksek şekil değiştirme hızındaki değerleri dikkate alınmıştır.



Şekil 3.47. BCC mikro kafes yapılar için düşme testlerinden elde edilen farklı şekil değiştirme hızlarına ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (L=2.5 mm)

Her iki numune tipi için düşme testlerinin sonuçlarından elde edilen başlangıç çökme gerilme değerlerinin şekil değiştirme hızına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.48 ve 3.49’da verilmiştir. Şekiller, yoruma yardımcı olabileceği düşüncesi ile logaritmik eksenli küçük boyutlu grafikler de içermektedir. İlave olarak, elde edilen sonlu elemanlar (1D-FEM) tahminleri şekillere ilave edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde tel çapı 0.2 mm olarak alınmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar modellerinde birim şekil değiştirme hızı bağımlılığı $D=17.10^6$ ve $q=12$ (Tablo 3.6) katsayı değerleriyle tanımlanmıştır. Şekillerden görüldüğü üzere, düşük şekil değiştirme hızlarında hem BCC hem de BCCZ mikro kafes yapılar şekil değişim hızı bağımlılığı göstermektedir. Örneğin BCC kafes yapısı 80 s^{-1} şekil değiştirme hızında statik çökme gerilmesine göre yaklaşık % 26 daha yüksek çökme gerilmesi değeri göstermektedir (Şekil 3.48). Aynı şekil değiştirme hızında BCCZ kafes yapısı statik çökme gerilmesi değerine göre % 24 civarında daha yüksek çökme gerilmesi değerine sahiptir. Anlaşılabacağı üzere her iki kafes tipide benzer şekil değiştirme hızına sahiptir. Burada dikkati çeken bir nokta; BCCZ kafes yapısında 80 s^{-1} şekil değiştirme hızından daha büyük şekil değiştirme hızlarında çökme gerilmesi değerlerinde artış bir miktar daha devam

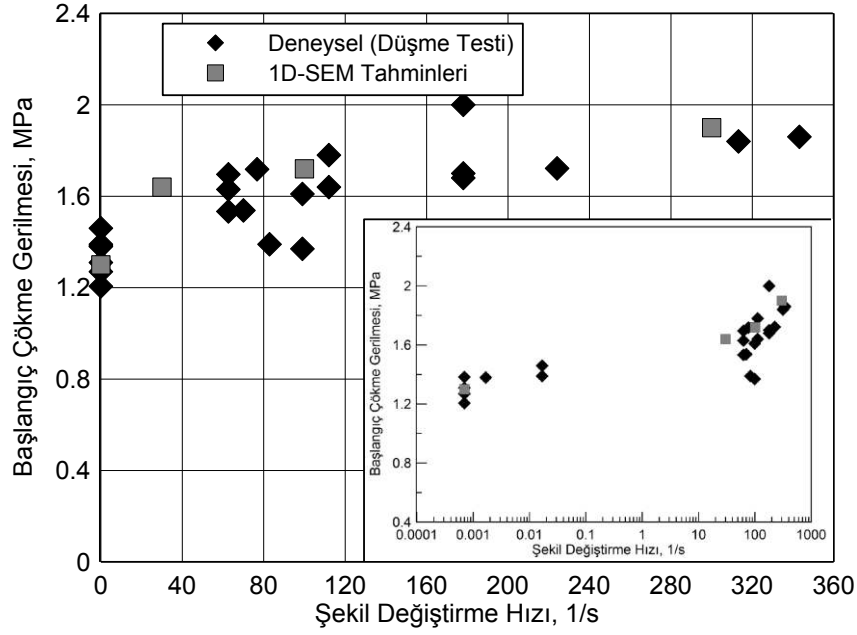
etmektedir. Hatırlanacağı üzere mikro tellerin birim şekil değiştirme hızına bağlılığı yaklaşık 80 s^{-1} şekil değiştirme hızı değerinden sonra çok düşük kalmaktaydı. Bu sebeple BCCZ kafes yapıdaki şekil değiştirme hızına bağlı artışın dinamik etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yani, darbe hızı arttıkça mikro tellerin mikro ataleti burkulmaya karşı direnç oluşturmaktadır. Kolayca anlaşılabilir ki, darbe hızı arttıkça, şekil değiştirme hızı etkisinden ziyade mikro atalet etkileri sebebiyle mikro kafeslerin gerilme değerlerinde artış olmaktadır. Sonlu elemanlar tahminleri deneysel sonuçları ortalama değerler açısından iyi bir şekilde temsil etmektedir. Görüldüğü gibi sonlu elemanlar tahminleri şekil değiştirme hızıyla hızlı bir artış göstermekte ve sonra artış hızında bir azalma meydana gelmektedir.



Şekil 3.48. BCC mikro kafes yapıların düşme test sonuçları için deneysel ve sayısal başlangıç çökme gerilmesi değerlerinin şekil değiştirme hızına göre değişimi ($L=2.5 \text{ mm}$)

3.12. Sayısal Parametrik Çalışmalar

Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal kusurların statik basma davranışına etkisinin belirlenmesi, kafes blokların sınır tabaka etkilerine bağlılığının araştırılması ve kafes yapılarda dalga yayılımının incelenmesi gibi bir takım parametrik çalışmalar yapılacaktır. Bu çalışmalarda önceki bölümlerde sayısal olarak geçerliliği sağlanmış sayısal modeller kullanılmıştır. Yapılan parametrik çalışmalar aşağıda ayrı ayrı başlıklar altında verilmiştir.



Şekil 3.49. BCCZ mikro kafes yapıların düşme test sonuçları için deneysel ve sayısal başlangıç çökme gerilmesi değerlerinin şekil değiştirme hızına göre değişimi ($L=2.5$ mm)

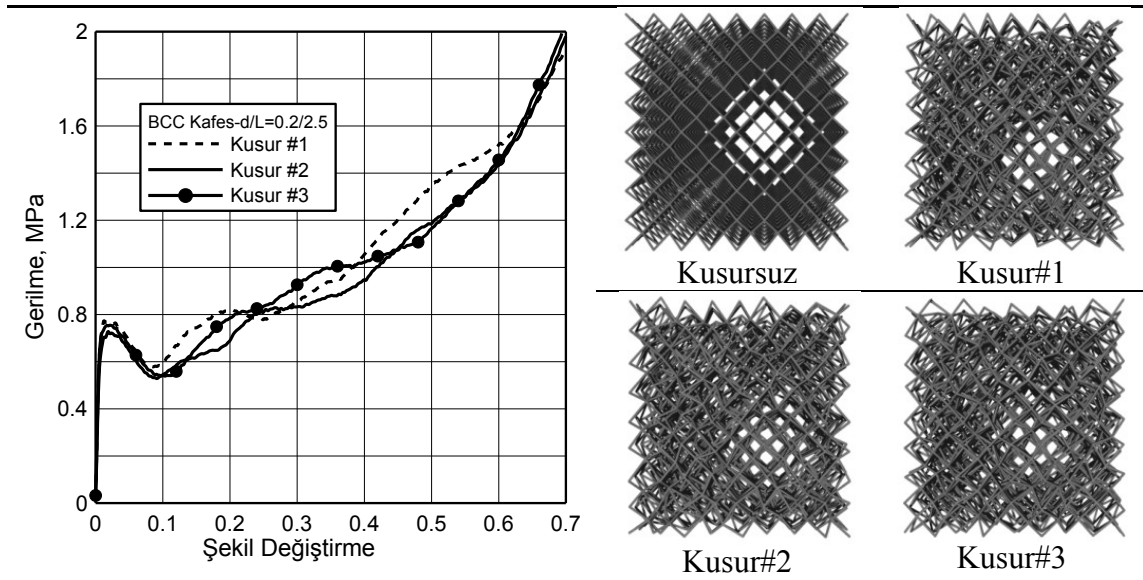
3.12.1. Yapısal Kusurlu Modellerin Basma ve Kesme Davranışları

Yapısal kusurların etkisinin incelendiği modeller yalnızca 2.5 mm hücre boyutuna sahip BCC kafes yapılar için hazırlanmıştır. Modellerin hazırlanışıyla ilgili detaylı bilgi Bölüm 2.4.4'te verilmiştir. Bu çalışmalar sınırlandırılmış numune testleri için tasarlanmıştır ve " $l_z = 2.5$ mm" olarak seçilmiş ve bu bölge içindeki tüm düğüm noktalarının serbestlik dereceleri uygun şekilde sınırlandırılmıştır.

İlk olarak, aynı şiddette ($\Delta=L/8$) kusurların farklı desenlere sahip olması durumunda, yani farklı kusur tipleri (geometrik olarak) arasındaki fark incelenmiştir. Şekil 3.50 üç tip kusura haiz BCC kafeslerin basma davranışlarını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi üç tip kusur için gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde bazı lokal değişimler dışında önemli farklar ortaya çıkmamaktadır. Bu sebeple, en azından çalışılan kusur modellerinde, aynı şiddete sahip farklı kusur tiplerinin gerilme davranışlarında çok önemli farklar oluşmadığı söylenebilir.

Yukarıdaki sonuçtan farklı kusur desenlerinin sonuca önemli bir etkisi bulunmadığından, kusur#2 deseni referans alınarak bu kısımda kusur şiddetinin mekanik davranışlara etkisi irdelenmektedir. Elde edilen sonuçlarla ilgili Şekil 3.51'de hem basma hem de kesme simülasyonlarına ait eğriler verilmektedir. Görüldüğü gibi basma

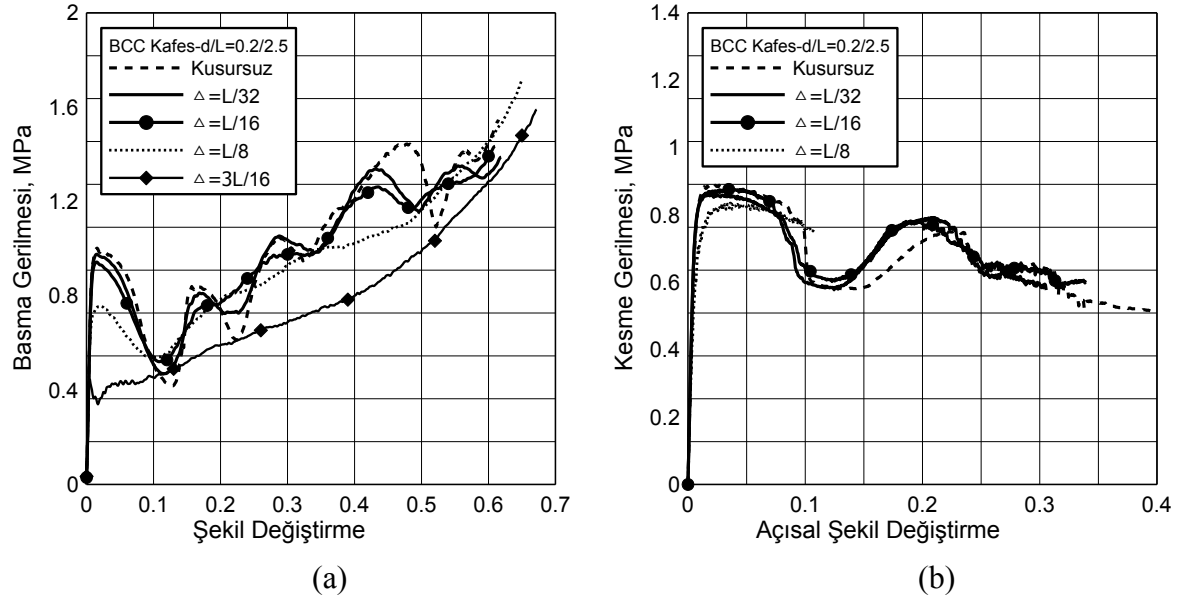
simülasyonlarında kusur şiddeti arttıkça başlangıç çökme davranışı ve gerilme eğrisinin genel davranışında kusursuz yapıya göre önemli farklar ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.52a). Yinede $L/32$ ve $L/16$ kusur şiddetine sahip kafeslerde önemli bir davranış farkı gözükmemektedir. Ancak farklar $L/8$ kusur şiddetinde ortaya çıkmaktadır. $3L/16$ değerinde ise yapının basma mekanik davranışı tamamıyla değişmektedir. Yani başlangıçta bir pik gerilme değeri artık ortaya çıkmamaktadır. Bu durum yapı içerisinde eğilme mekanizmasının etkin olduğunun bir göstergesidir. Kesme davranışları açısından kusurlara karşı yapının, gerilme davranışı basma davranışından daha az hassasiyete sahip olduğu gözükmemektedir (Şekil 3.51b). $L/8$ kusur şiddetinde bile kusursuz yapıya göre önemli bir fark söz konusu olmamaktadır.



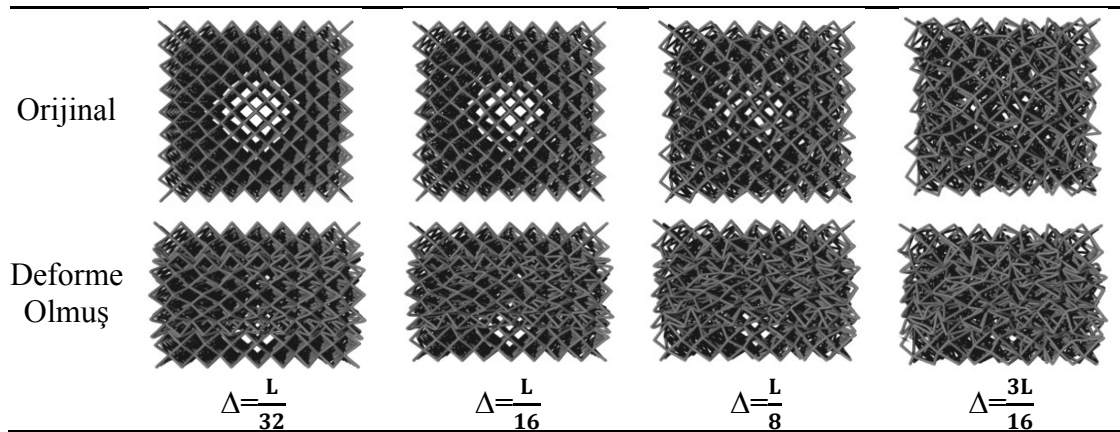
Şekil 3.50. Farklı kusur tiplerinin (desenlerinin) basma davranışlarının karşılaştırılması

Basma davranışlarına ait deformasyon mekanizmaları, orijinal yapı ile birlikte Şekil 3.52’de gözükmemektedir. Kusur şiddeti arttıkça yapı karmaşık bir desene bürünmektedir. Bu durumun yapının deformasyon mekanizmasını etkileyeceği aşikârdır. Bu durum, deforme olmuş bloklardan kolayca anlaşılmaktadır. Örneğin $L/32$ kusur şiddetinde yapı çökme açısından belirli lokalleşmeler göstermektedir. Fakat yüksek kusur şiddeti içeren yapılarda herhangi bir lokalleşme söz konusu olmamaktadır ($3L/16$). Hem basma hem de kesme simülasyonlarından elde edilen sonuçların bir özeti Tablo 3.7’de sunulmuştur. Tablo değerlerinin incelenmesinden görüleceği üzere elastisite ve kayma modülleri kusur şiddetine önemli bir hassasiyet göstermemektedir. Buna karşın basma ve kesme gerilme

değerlerinde kusur şiddetinde ciddi artışlar olduğu durumlarda önemli düşüşler görülmektedir. Sonuç olarak her iki yükleme tipi içinde BCC kafes yapısı düşük şiddetli yapısal kusurlara önemli bir hassasiyet göstermemektedir. Ancak kusur şiddetinde aşırı artışlar olursa hem basma hem de kesme yüklemesinde kusursuz yapılara göre önemli farkların ortaya çıkması olasıdır.



Şekil 3.51. Aynı desene sahip farklı şiddetteki kusurların BCC kafes yapıların davranışlarına etkisinin karşılaştırılması; a) Basma, b) Kesme



Şekil 3.52. Farklı şiddette kusurlara sahip BCC kafes yapıların deforme olmuş ve olmamış hallerinin karşılaştırılması

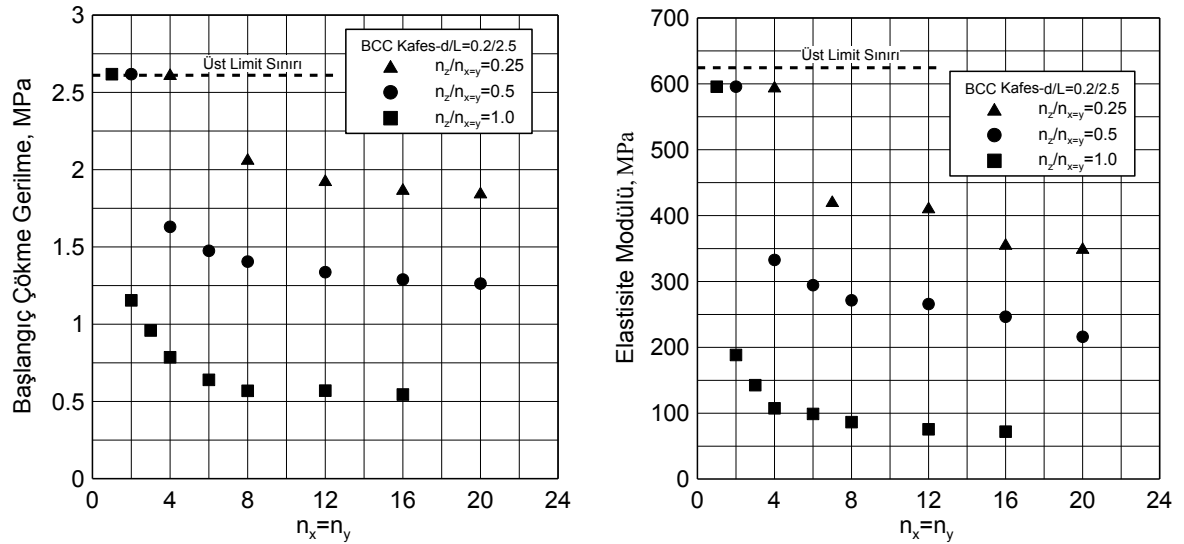
Tablo 3.7. Kusurlu modellerin basma ve kesme simülasyonlarından elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması (MPa)

Parametre	Kusursuz	$\Delta=\frac{L}{32}$	$\Delta=\frac{L}{16}$	$\Delta=\frac{L}{8}$	$\Delta=\frac{3L}{16}$
Başlangıç Çökme Gerilmesi, σ	1.0	0.976	0.943	0.754	0.445
Elastisite Modülü	133.27	130	128.4451	133.32	131.099
Başlangıç Kesme Gerilmesi, τ	0.888	0.859	0.873	0.830	-
Kayma Modülü	133.728	149	148.78	118.728	-

3.12.2. Sınır Tabaka Etkileri

Deneysel bölümlerde BCC mikro kafes yapıların serbest yüzeyli ve sınırlandırılmış numune testleri arasında mekanik davranışlar açısından önemli farklar oluşmakta olduğu belirlenmişti. Bu farklar sınırlandırılmış numunelerde sınır yüzeylerindeki hücrelerin yapıstırıcı bir madde ile serbestlik derecelerinin sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır. Buna karşın bu bölümde 2.5 mm hücre boyutuna sahip BCC kafes blokların mekanik davranışlarının, sınır tabaka etkilerine ve numune boyutuna bağlılığının derecesini anlamaya yönelik sayısal bir çalışma gerçekleştirilecektir. Bunun için çizgi elemanlarla oluşturulan BCC kafes bloklar, Şekil 2.13c’de gösterildiği gibi bir kenarı boyunca çeşitli sayıda birim hücre içerecek şekilde hazırlandı. Burada “ $n_x=n_y$ ” yani x ve y doğrultularındaki hücre sayıları eşit alındı. “ n_z ” ise yükleme yönündeki birim hücre sayısını göstermektedir. Modelin yükleme yönünde alt ve üst yüzeylerindeki düğüm noktalarına sınırlandırılmış numune testinin modellenmesine olanak sağlayan sınır şartları Bölüm 2.4.1’de bahsedildiği gibi uygulanmıştır. “ $n_z/n_{x=y}$ ” oranı için 0.25, 0.5 ve 1.0 değerlerinde sayısal blok modelleri oluşturulmuştur. Sayısal simülasyonlar sonucunda elde edilen başlangıç çökme gerilmesi ve elastisite modülünün numune boyutuna ve sınır tabaka etkilerine bağlılıkları Şekil 3.53’teki grafikler yardımıyla ifade edilmeye çalışılmıştır. Görüldüğü üzere her bir “ $n_z/n_{x=y}$ ” oranı için başlangıçtaki hem gerilme hem de elastisite modülü değerleri, “ $n_x=n_y$ ” değeri arttıkça hızla düşmektedir. Bu düşüş “ $n_x=n_y$ ” hücre sayılarındaki artışla birlikte yavaşlamaktadır ve “ $n_x=n_y=8$ ” değerinden sonra önemli bir değişim göstermemektedir. Bu eğilim her bir “ $n_z/n_{x=y}$ ” oranı için geçerli olmaktadır. Bu

durum şunu göstermektedir ki; sonuçları sınır tabaka etkilerinden kurtarmak için yükleme yönündeki hücre sayısı ne olursa olsun yanal yöndeki hücre sayısı en az sekiz olmalıdır. Ayrıca grafiklerden anlaşılacağı üzere her bir “ $n_z/n_{x=y}$ ” oranında elde edilen ilk değerler, yükleme yönünde bir tane hücre bulunan kafes bloklara aittir. Bu sebeple bu bloklarda sınır tabaka şartından dolayı mikro teller, yalnızca eksenel yüklemeye ve bunun sonucunda burkulma mekanizmasına maruz kalırlar. Bu da hem gerilmenin hem de elastisite modülünün diğer bloklara göre nispeten yüksek çıkmasına sebep olmaktadır. Eğer yükleme yönünde hücre sayısı artarsa bu durumda sınır tabaka etkileri azalacak ve doğal olarak kafes blok içerisinde burkulmanın yanında sınır etkilerinden uzak bazı hücrelerde eğilme mekanizması etkin olacaktır. Kolayca anlaşılacağı üzere, eğer “ $n_z/n_{x=y} > 1$ ” şeklinde seçilirse, kafes blok en azından başlangıç çökme mekanizması açısından sınır tabaka etkilerinden tamamen kurtulacaktır. Bu durumda, deformasyon sınır bölgelerine yaklaşıncaya kadar, kafes blok serbest yüzeyli bir numune gibi mekanik basma davranışı gösterecektir. Bu koşula uyan numunelerde eğilme mekanizması etkin olmakla birlikte, bu numuneler en düşük çökme gerilmesi ve elastisite modülüne sahip olacaktır.



Şekil 3.53. BCC kafes bloklar için sınır tabaka etkilerinin incelenmesi; a) Başlangıç çökme gerilmesi, b) Elastisite modülü açısından

3.12.3. Kafes Yapıların Yüksek Hızlı Darbe Davranışı

Bu kısımda BCC mikro kafes yapıların yüksek hızlı darbe davranışı ve dalga yayılımı genel hatlarıyla sayısal olarak incelenmektedir. Bu amaçlar iki farklı hücre

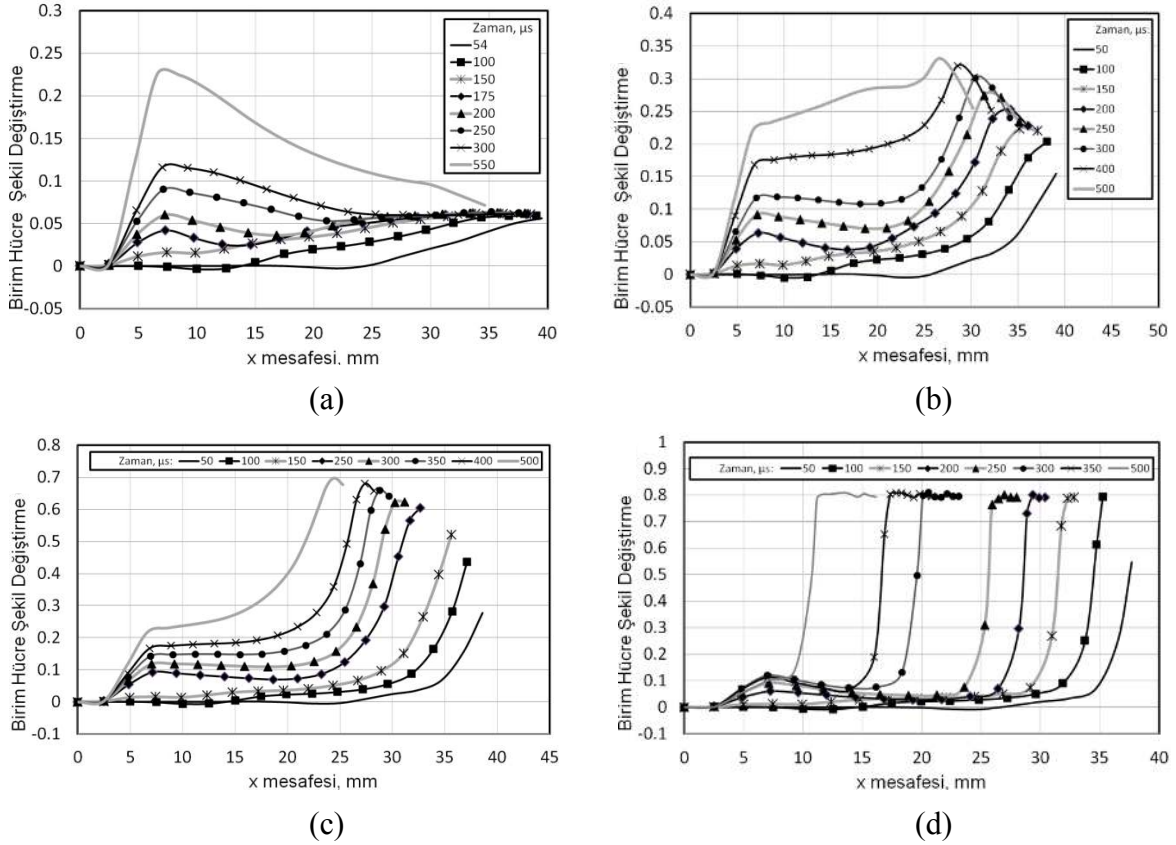
boyutuna sahip (2.5 ve 1.25 mm) kafes modelleri hazırlanmıştır. Dalga yayılımı kafes blok uzunluğu boyunca oluşturulan ve Şekil 2.25'te gösterildiği gibi birim hücre şekil değiştirme (BHŞD) profilleri yardımıyla irdelenmektedir.

Şekil 3.54'de 2.5 mm hücre boyutuna sahip mikro kafes yapılarında farklı darbe hızlarında kafes blok boyunca oluşan çeşitli zaman adımlarına ait birim hücre şekil değiştirme profilleri görülmektedir. Görüldüğü gibi darbe hızı arttıkça profiller değişmekle birlikte, birim hücre şekil değiştirme değerleri de farklılık göstermektedir. Örneğin, 10 m/s darbe hızı için, 54 μ s anında 0.05 birim hücre şekil değiştirme genliğinde bir bası dalgası oluşmakta ve 100 ile 150 μ s zaman adımlarında numune boyunca ilerlemektedir. Bu dalganın elastik bir dalga olduğu kolayca anlaşılabilir. Bilindiği gibi iki cisim birbiri ile teması esnasında ilk önce bir elastik dalga yayılımı meydana gelir (Meyers, 1994). 175, 200 ve 250 μ s zaman adımlarında bası dalgası sabit uca ulaşmakta ve doğal olarak uçtan geriye yansımaktadır. Uçtaki sabit sınır koşulları nedeniyle, gelen bası dalgası yine bası dalgası olarak yansıdığından, gelen ve giden dalga üst üste binmektedir. Bu durum Şekil 3.54a'dan kolayca görülmektedir. Bu sebeple 250 μ s anında sabit uca yakın hücrelerde birim hücre şekil değiştirme değerleri gelen bası dalgasının genliğinin (birim şekil değiştirme değeri açısından) iki katına ulaşmaktadır ($\epsilon=0.1$). Bu değer, BCC kafes yapının statik başlangıç çökme gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirme değerinin üzerinde bir değerdir. Yani sabit uçta dalganın genliği başlangıç çökme BHŞD değerinin üzerindedir. Bu sebeple, ilk kalıcı veya plastik çökme sabit uçta meydana gelmektedir. Sıkıştırma devam ettikçe, şekilden de görüldüğü gibi sabit uçta BHŞD değerleri ciddi oranda artmaktadır (550 μ s anında) ve ters yönde dalga yayılarak tüm kafes boyunca birim hücrelerdeki BHŞD değerlerini arttırmaktadır ve buna paralel yapının tümünde plastik çökmeler meydana gelmektedir.

Şekil 3.54b'de verilen 20 m/s darbe hızı için durum 10 m/s darbe hızındaki durumdan biraz daha farklıdır. Görüldüğü gibi 250 μ s anında, 10 m/s darbe hızına benzer şekilde, 0.05 civarında BHŞD genliğine sahip gelen bası dalgası sabit uçtan yansımakta ve bu bölgede dalga genliğinin iki katına çıkmasıyla kalıcı çökme başlamaktadır. 10 m/s darbe hızından farklı olarak, darbe hızının şiddeti ile ilgili olarak darbe ucundan bir plastik dalga yayılımının başlaması söz konusudur. Darbe ile birlikte darbe ucundaki hücrelerde BHŞD değeri hızla artış göstermektedir. 300 μ s anında 0.3 değerine ulaşmaktadır ki bu değer statik dalga genliğinden oldukça yüksektir. Ayrıca bilindiği üzere plastik dalga hızı elastik dalga hızından oldukça düşüktür. Bu sebeple elastik dalga sabit uçta yansımakta iken

plastik dalga profili henüz olgunluğa ulaşmaktadır (250μ). Bu esnada sabit uçtan ortaya çıkan plastik dalga ile gelen plastik dalga birbirine doğru hareket etmekte ve 400 ve 500 μ s anlarında Şekil 3.54b’de görüldüğü üzere çakışmaktadır. Böylece tüm yapı boyunca üniform plastik veya kalıcı deformasyon oluşmaktadır. 30 m/s darbe hızında durum diğerlerine göre daha da farklı düzeyde gerçekleşmektedir (Şekil 3.54c). Görüldüğü gibi hem 10 m/s hem de 20 m/s darbe hızlarına benzer şekilde elastik dala yayılımı ve sabit uçtan plastik dalga yansıması meydana gelmesinin yanında darbe ucundan yüksek bir genlikte bir dalga oluşmaktadır. Bu dalganın genliği elastik dalga sabit uca ulaşmadan, 0.6 BHŞD değerine varmaktadır. Sabit uçtan yansıyan plastik dalganın bu dalga ile kesişme anına kadar genliği 0.7 BHŞD değerine ulaşmaktadır. Bu değer 2.5 mm hücre boyutuna sahip BCC kafes yapının statik yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerine çok yakındır. Bu durum kafes yapıda şok dalgası başlangıcına işaret olmaktadır. Eğer bir hücre malzeme yeterince yüksek hızda bir darbeye maruz kalırsa, bir şok deformasyonu (disturbance) yayılmaya başlar ve bu bölgenin arkasında kalan gölgede hücreler çöker. Bu bölge içindeki yoğunluk başlangıç yoğunluğuna göre çok yüksek seviyelere ulaşır. Bu sebeple genelde şok yayılımının arkasındaki alanda birim hücre şekil değiştirme değerleri yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerleri civarında olmaktadır (Meyers, 1994; Lee, 2006b).

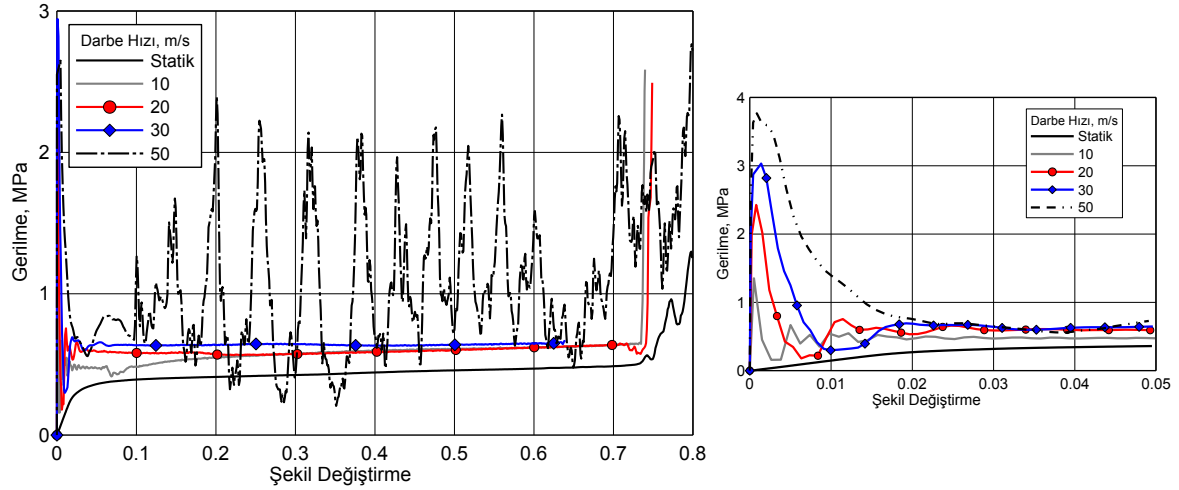
Şok yayılımı en net şekilde 50 m/s darbe hızına ait BHŞD profillerinde görülmektedir (Şekil 3.54d). Yine, darbenin başlangıcında düşük genlikli elastik dalga darbe ucundan yansımakta ve aynı anda darbe ucunda bir şok dalgası oluşmaktadır. Şok bölgesi içinde kalan darbe ucuna yakın hücrelerde BHŞD değerleri hızla yükselmekte ve 0.8 değerinde sabitlenmektedir. Bu değer darbe hızına bağlı en yüksek değer olmaktadır. Bu da şok bölge içinde gerilmelerin oldukça yüksek değerlere ulaştığının bir göstergesidir. Ayrıca, Şekil 3.54’ten görüldüğü gibi şok bölgesi çok keskin şekilde diğer bölgeden ayrılmaktadır. Elastik dalganın sabit uçtan yansımasından önce, şok bölgesi dışında kalan bölgelerde yalnızca elastik sınırdaki deformasyonlar oluşmaktadır (200 μ s). Bu mekanizma şok dalgasının ayırt edici bir özelliğidir.



Şekil 3.54. 2.5 mm hücre boyutuna sahip BCC kafes yapıların darbe yüklemesi esnasında uzunluk boyunca oluşan birim hücre şekil değiştirme profillerinin, a) 10, b) 20, c) 30, d) 50 m/s darbe hızları için çeşitli zaman adımlarında görünüşleri

Gerçekleştirilen testlerle ilgili gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.55’de sunulmaktadır. Bu eğriler darbe ucundaki kuvvet değişimlerinin kafes yapının kesit alanına bölünmesiyle elde edilmiştir. Gerilme eğrilerinden görüldüğü üzere dinamik yükleme hızı arttıkça pik ve kararlı çökme bölgesi gerilme değerlerinde artış olmaktadır. Dinamik gerilme eğrileri yüklemenin hemen başlangıcında pik yapmaktadır. Bu durum rijit duvarın darbe etkisiyle darbe ucuna yakın düğüm noktalarının gösterdiği mikro atalet etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kararlı çökme bölgesinde 30 m/s hıza kadar darbe hızlarında hıza bağlı gerilmelerde artış 0.2’lik birim şekil değiştirme değerine kadar gerçekleşmekte iken, bu değerden sonra hemen hemen aynı gerilme değerlerine sahip olmaktadır. Başlangıçtaki fark, darbe başlangıcında mikro tellerin deformasyona karşı uyguladığı mikro atalet ve şekil değiştirme pekleşmesi (strain hardening) etkilerinden kaynaklanmaktadır. Çökme başladıktan ve peşin sıra çökme mekanizmalarıyla birlikte mikro atalet etkileri önemini yitirmektedir. Bu bölgede mikro atalet etkilerinden ziyade yalnızca şekil değişimi pekleşmesi etkisi, statik mekanizmaya karşılık gerilme artışını

desteklemektedir. Hatırlanacağı üzere belli bir şekil değiştirme hızından sonra mikro kafes yapılarda gerilme değerleri artış göstermemekteydi. Bu sebeple, burada da darbe hızı arttıkça, kararlı çökme bölgesindeki gerilmelerde çok ciddi artışlar oluşmamaktadır. 50 m/s darbe hızı için gerilme eğrisi diğer yüklemelere göre farklı davranış sergilemektedir. Görüldüğü gibi, kararlı çökme bölgesinde, gerilmeler çok sayıda tepe ve vadiler göstermektedir. Bu durum şok dalgasından kaynaklanmaktadır. Şok bölgesi içinde tam yoğunlaşma sağlanmaktadır ve yoğunlaşan bölge içinde, yani rijit duvar ve şok sınırı arasında gidip gelen elastik dalgalar sebebiyle bu şekilde gerilme eğrisi elde edildiği düşünülmektedir. Yinede bir fikir için, 50 m/s darbe hızı için ortalama gerilme tanımı yapılabilir.



Şekil 3.55. Çeşitli darbe yüklemeleri altında 2.5 mm hücre boyutuna sahip kafes yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

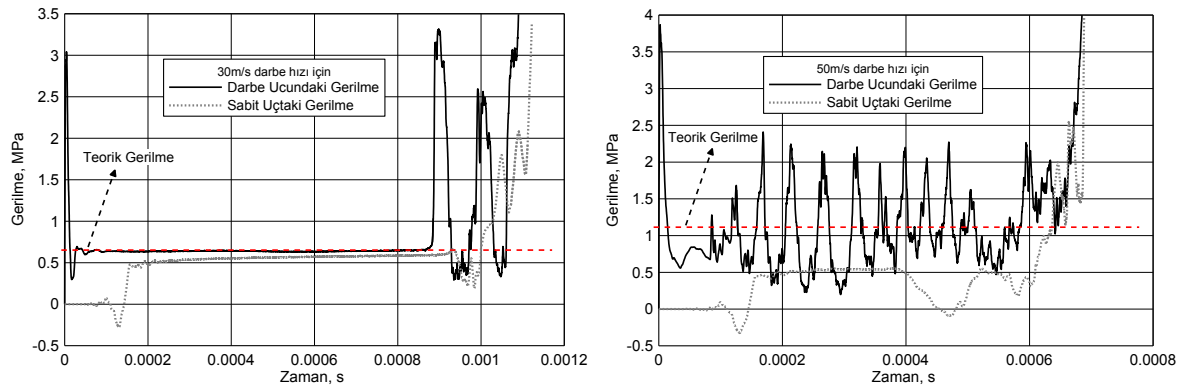
30 ve 50 m/s darbe hızlarında hem darbe ucundaki hem de sabit uçtaki gerilmelerin zamana göre değişimlerinin karşılaştırıldığı grafikler Şekil 3.56’da verilmiştir. Her iki darbe hızında da sabit ve darbe ucu arasında gerilme açısından ciddi farklar oluşmaktadır. Bu durum dalga yayılımından kaynaklanmaktadır. Statik yükleme durumlarında bilindiği üzere her iki uçtaki gerilmeler aynı olmaktadır. Her iki darbe hızında sabit uçlarda elde edilen gerilmelerin 0.5 MPa düzeylerinde kalması ilginç bir sonuçtur. Bu durum, Şekil 3.54’ten hatırlanacağı üzere aynı genlikteki ($\varepsilon=0.05$) elastik dalgaların sabit uca ulaşması ve benzer genlikte plastik çökmelerin (her bir darbe hızı için) gerçekleşmesi sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir. Bu grafiklerden yararlanılarak elastik dalga hızları kolayca hesaplanabilir. Hem 30 m/s hem de 50 m/s darbe hızları için (Şekil 3.56), elastik dalgaların

sabit uça ulaşma zamanı yaklaşık 150 μ s civarındadır. Numune boyunun 40 mm olduğu düşünülünce elastik dalga hızı yaklaşık 267 m/s şeklinde elde edilmektedir. Teorik dalga hızı, “ $C=\sqrt{E_{BCC}^*/\rho^*}$ ” bağıntısından elde edilebilmektedir. BCC kafes yapının teorik elastisite modülü $E_{BCC}^*=14.69$ MPa ve yoğunluğu ise $\rho^*=256$ kg/m³ (Eşitlik (2.12) veya (2.13) kullanılarak) civarındadır. Bu değerler vasıtasıyla elde edilen teorik elastik dalga hızı yaklaşık 240 m/s olarak elde edilmektedir. Bu değer sayısal elde elden dalga hızına yakın değerdedir.

Ayrıca grafiklerde teorik gerilme tahminleri de verilmektedir. Teorik gerilme, Reid ve Peng (1997) ve Ashby vd. (2000) tarafından geliştirilen,

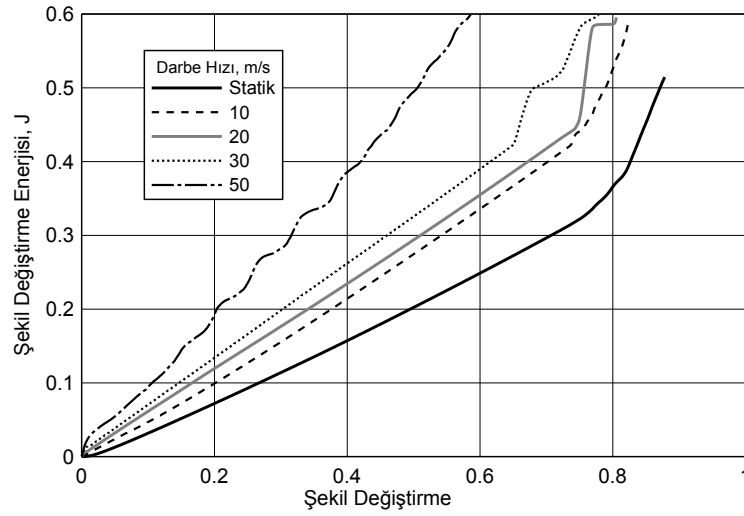
$$\sigma_d = \sigma^* + \rho^* \frac{V_0^2}{\varepsilon_y} \quad (3.2)$$

eşitliğiyle hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikte σ^* , statik çökme gerilmesini, V_0 , darbe cisminin hızı ve ε_y , yoğunlaşma birim şekil değiştirmeleri göstermektedir. Eşitliğin ikinci terimi hidrodinamik katkıyı temsil etmektedir. Yukarıdaki denklem, elastik bir özellik göstermeyen, sabit bir çökme gerilmesine haiz ve toplam hücre çökmesinin yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerinde gerçekleştiği, ideal bir köpük malzeme düşünülerek geliştirilmiştir. Ayrıca yanıl gerilmeler yani Poisson etkisi ihmal edilmiştir. $\sigma^*=0.38$ MPa (Şekil 3.55’den statik gerilme eğrisinden) ve $\varepsilon_y=0.73$ alınarak, hem 30 m/s hem de 50 m/s darbe hızları için teorik gerilme değerleri, Şekil 3.56’den da görüleceği üzere sayısal tahminlere oldukça yakın değer vermektedir. 50 m/s darbe hızı için teorik gerilme tahmini, ortalama gerilme gibi düşünülebilir.



Şekil 3.56. Darbe ve sabit uçlardan elde edilen gerilme-zaman eğrilerinin, a) 30 m/s ve b) 50 m/s hızları için karşılaştırılması

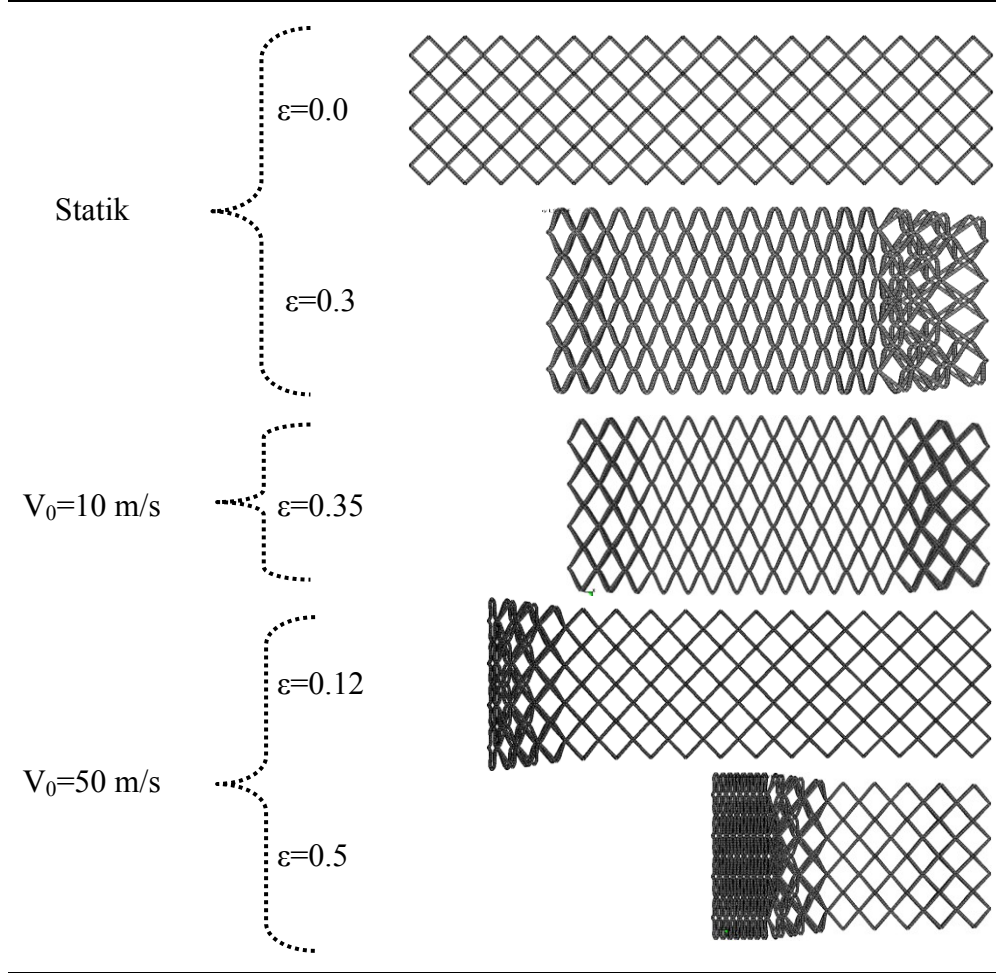
Şekil değişimi enerjileri açısından karşılaştırılırsa, darbe hızı arttıkça kafes malzemenin sönümlendiği şekil değiştirme enerjisinde (strain energy) ciddi artışlar görülmektedir (Şekil 3.57). Örneğin 0.6 birim şekil değiştirme değerinde en yüksek enerji sönümleme 50 m/s darbe hızında oluşmaktadır. En düşük şekil değiştirme enerjisi ise statik durumda ortaya çıkmaktadır. Bu durum hem malzemenin şekil değiştirme hızı bağımlılığı hem de mikro atalet etkilerden kaynaklanmaktadır. Mikro atalet etkiler şok dalganın etkin olduğu darbe hızında (50 m/s) çok etkin olmaktadır ve malzemenin enerji sönümlemesine ciddi katkı sağlamaktadır.



Şekil 3.57. Farklı darbe hızlarında numunenin sönümlendiği şekil değiştirme enerjisi değerlerinin karşılaştırılması (L=2.5 mm)

Şekil 3.58’de deformasyon gelişim mekanizmalarıyla ilgili örnekler sunulmaktadır. Statik yüklemde uçlar hariç tüm kafes boyunca tüm mikro teller aynı şekil değişimini gerçekleştirmektedir ($\epsilon=0.3$). Yani üniform bir çökme mekanizması etkindir. Uçlarda ise sınır şartlarının etkisiyle hücrelerde ya deformasyon gelişmemiş veya az gelişmektedir. Benzer durum 10 m/s darbe hızı için ortaya çıkmaktadır. Yapı boyunca üniform çökme mekanizması etkin olmaktadır. Bu durum dalga etkilerinin düşük düzeyde kaldığının kanıtı olmaktadır. En dikkat çekici deformasyon mekanizması 50 m/s darbe hızında ortaya çıkmaktadır. Görüldüğü gibi darbe ($\epsilon=0.12$) ile birlikte bir şok bölgesi oluşmakta ve numune boyunca yayılmaktadır. Şok bölgesinin arkasındaki hücrelerde ful yoğunlaşma (tamamıyla sıkışma) meydana gelmektedir ($\epsilon=0.5$). Şok bölgesinin önünde ise hücrelerde

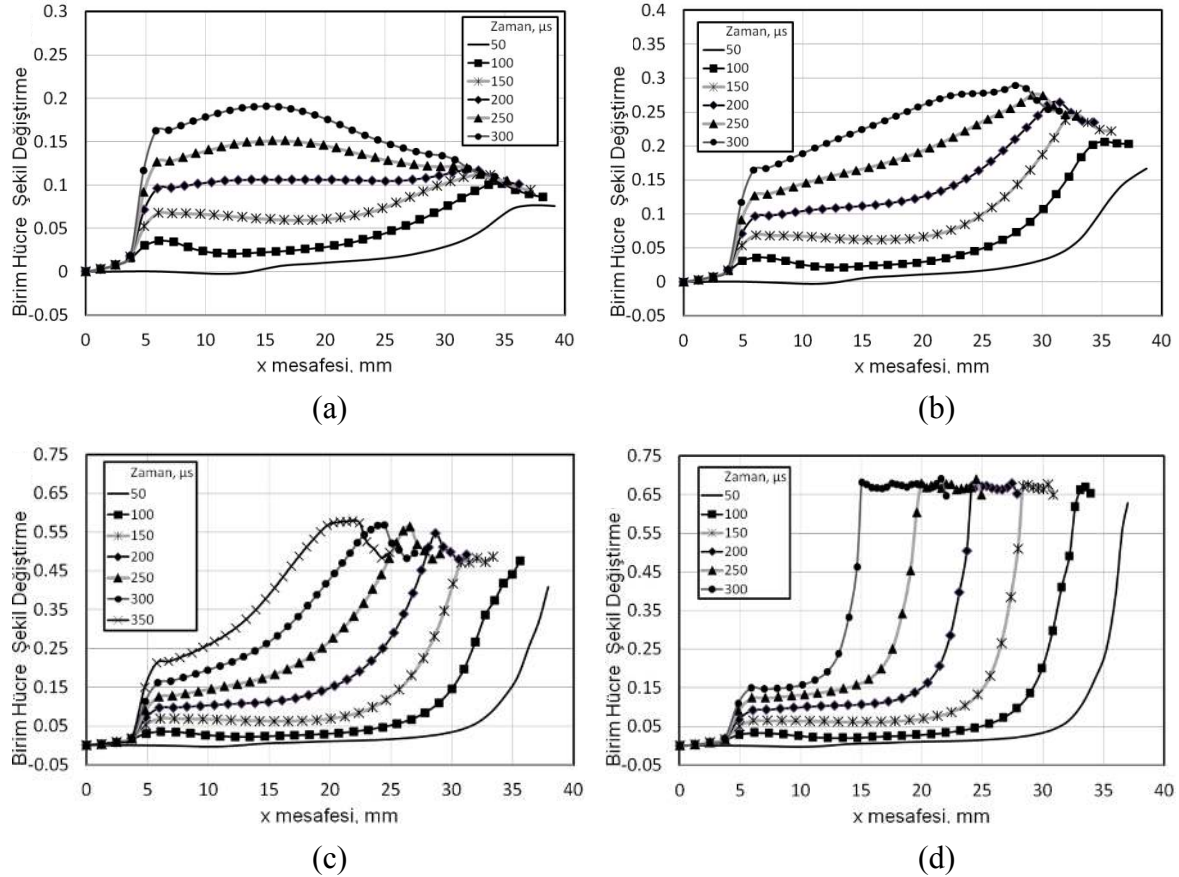
hemen hemen herhangi bir deformasyon emaresi ortaya çıkmamaktadır. Şok bölgesi keskin bir şekilde diğer bölgeden ayrılmaktadır.



Şekil 3.58. Farklı darbe hızlarında elde edilen deformasyon mekanizmalarının belirli birim şekil değiştirme değerlerindeki görünüşleri ($L=2.5$ mm)

Şekil 3.59'da 1.25 mm hücre boyutuna sahip BCC kafes yapılara ait çeşitli darbe hızlarında elde edilen birim hücre şekil değiştirme profillerine ait grafikler gözükmemektedir. Grafikler 2.5 mm hücre boyutuna benzer eğilimler sergilemektedir. Örneğin 20 m/s darbe hızı için darbe ucundan yaklaşık 0.025 BHŞD değerine sahip elastik bir dalga yayılımı başlamaktadır (50 μ s). Bu dalga 50 μ s zamanında sabit uçtan yansımakta ve BHŞD değeri plastik çökme değerinin üzerine çıkmaktadır. Bunun sonucu olarak sabit uçtan geriye plastik bir dalga yayılımı başlamaktadır. Numune sıkışmasıyla birlikte tüm kafes boyunca uniform bir BHŞD değerleri elde edilmektedir. Aynı durum 30 m/s darbe hızı içinde gerçekleşmektedir (Şekil 3.59b). Ayrıca hem 20 m/s hem de 30 m/s darbe hızlarında darbe

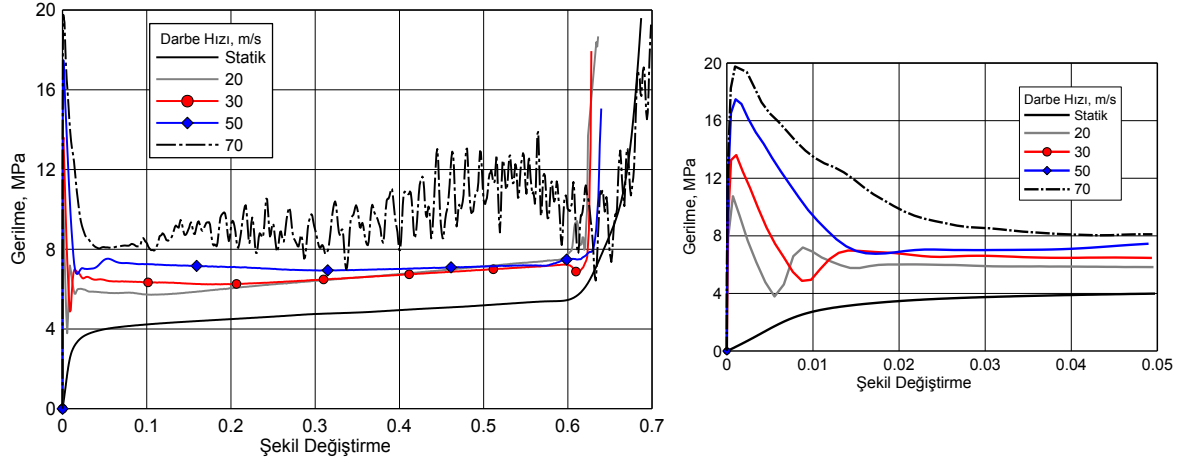
ucundan elastik dalga ile birlikte plastik dalga da yayılmaktadır. 30 m/s darbe hızında plastik çökmeler darbe ucundan başlarken, 20 m/s darbe hızında ise sabit uçtan başlamaktadır. 50 m/s darbe hızında, BHŞD değerleri darbe ucunda hızla yükselerek 0.55 civarına ulaşmaktadır (Şekil 3.59c). Bir şok dalgası başlangıcı meydana gelmektedir. 70 m/s darbe hızında tamamıyla bir şok dalgası olayı meydana gelmektedir.



Şekil 3.59. 1.25 mm hücre boyutuna sahip BCC kafes yapıların darbe yüklemesi esnasında uzunluk boyunca oluşan birim hücre şekil değiştirme profillerinin, a) 20, b) 30, c) 50, d) 70 m/s darbe hızları için çeşitli zaman adımlarında görünüşleri

1.25 mm hücre boyutu için elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.60'da verilmektedir. 2.5 mm hücre boyutuna sahip kafes yapıya benzer bir gerilme davranışları elde edilmektedir. Statik yükleme en düşük gerilme değerlerine sahiptir. Dinamik modeller ise başlangıçta mikro atalet etkiler sebebiyle pik gerilme değerlerine sahiptir. Yine burada, 0.2 birim şekil değiştirme değerlerine kadar darbe hızı arttıkça kararlı çökme bölgesi gerilme değerlerinde artış meydana gelirken, 0.2'den sonra dinamik modeller aynı gerilme şiddetlerine sahip olmaktadır. 70 m/s darbe hızında gerilme eğrisi

diğerlerine göre oldukça farklı davranış sergilerken, gerilme genliğinde de ciddi artışlar sergilemektedir. Bu durum daha öncede belirtildiği gibi yüksek mikro atalet etkileri ve yoğunlaşan şok bölgesi içinde hareket eden elastik dalgalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

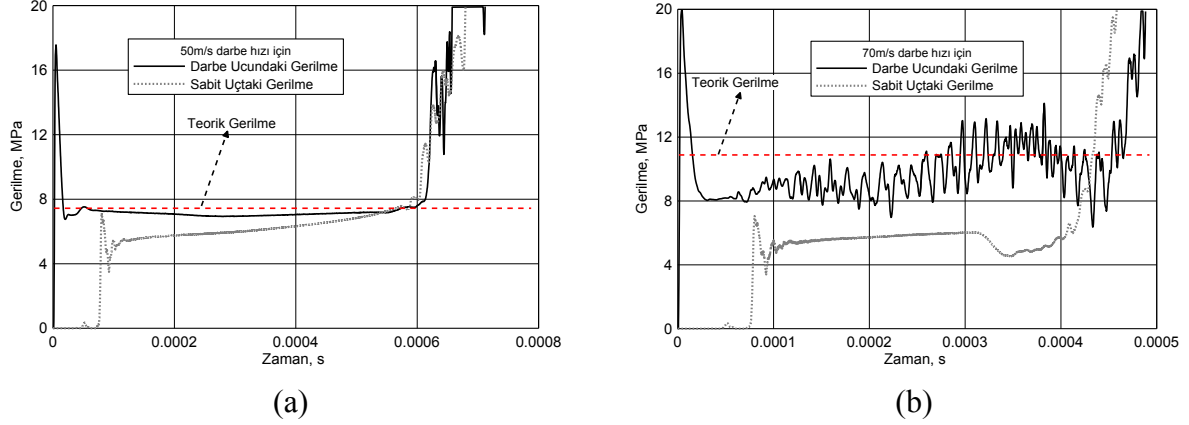


Şekil 3.60. Çeşitli darbe yüklemeleri altında 1.25 mm hücre boyutuna sahip kafes yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

50 m/s ve 70 m/s darbe hızlarında, darbe ucu ve sabit uçta elde edilen gerilmelerin zamanla değişimlerinin karşılaştırılması Şekil 3.61’de verilmiştir. Görüldüğü gibi darbe ucu ile sabit uçlar arasındaki gerilmelerde ciddi farklar söz konusudur. En başta sabit uçta yükleme yaklaşık 80 μ s geç başlamaktadır. Bunun numune boyunca dalgaının yayılımından ve 80 μ s sonra sabit uca varmasından ortaya çıktığı çok açıktır. Numune boyunun 40 mm olduğu düşünülürse, ortalama elastik dalga hızı yaklaşık 500 m/s olduğu basitçe hesaplanabilir. 1.25 mm hücre boyutuna sahip malzemenin kütle yoğunluğu ve başlangıç elastisite modülünün sırasıyla, 975 kg/m³ (eşitlik (2.12) kullanılarak) ve 300 MPa değerlerine sahip olduğu dikkate alınınca, teorik elastik dalga hızı 554.7 m/s olarak bulunur. Görüldüğü üzere buluna iki değer nispeten yakındır. Yine, kolayca fark edilebilir ki sabit uçtaki gerilmeler darbe hızından bağımsızdır ve genlikleri aynı çıkmaktadır.

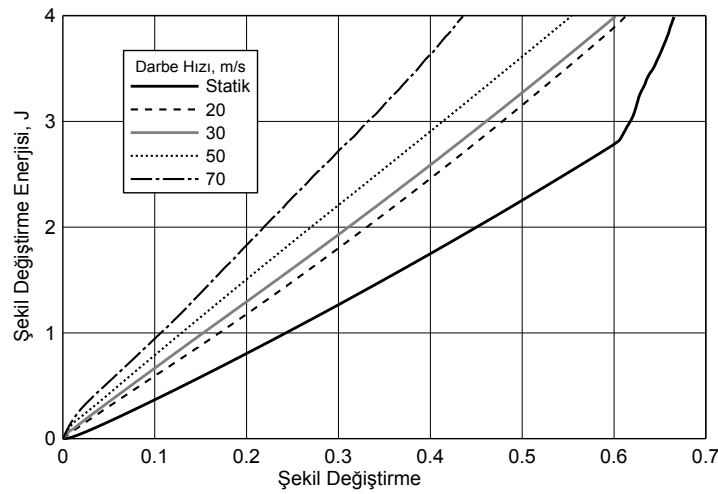
Teorik dinamik gerilmeler eşitlik (3.2) ile ifade edilen şok durumları için hesaplanabilir. 1.25 mm hücre boyutu için statik çökme gerilmesi, $\sigma^*=3.9$ MPa ve yoğunlaşma birim şekil değiştirme değeri, $\varepsilon_y=0.61$ olduğu Şekil 3.60’dan hesaplanabilir. Bu değerler eşitlik (3.1)’de hem 50 m/s hem de 70 m/s darbe hızları için yerine yazılarak dinamik ortalama gerilme değerleri elde edilmiş olur. Teorik gerilmeler Şekil 3.61’de

gözükmektedir. 50 m/s için teorik gerilme sayısal tahmin ile birebir uyum içerisinde. 70 m/s darbe hızı için ise teorik gerilme sayısal gerilme eğrisinin ortalamasından az da olsa yüksek çıkmaktadır.



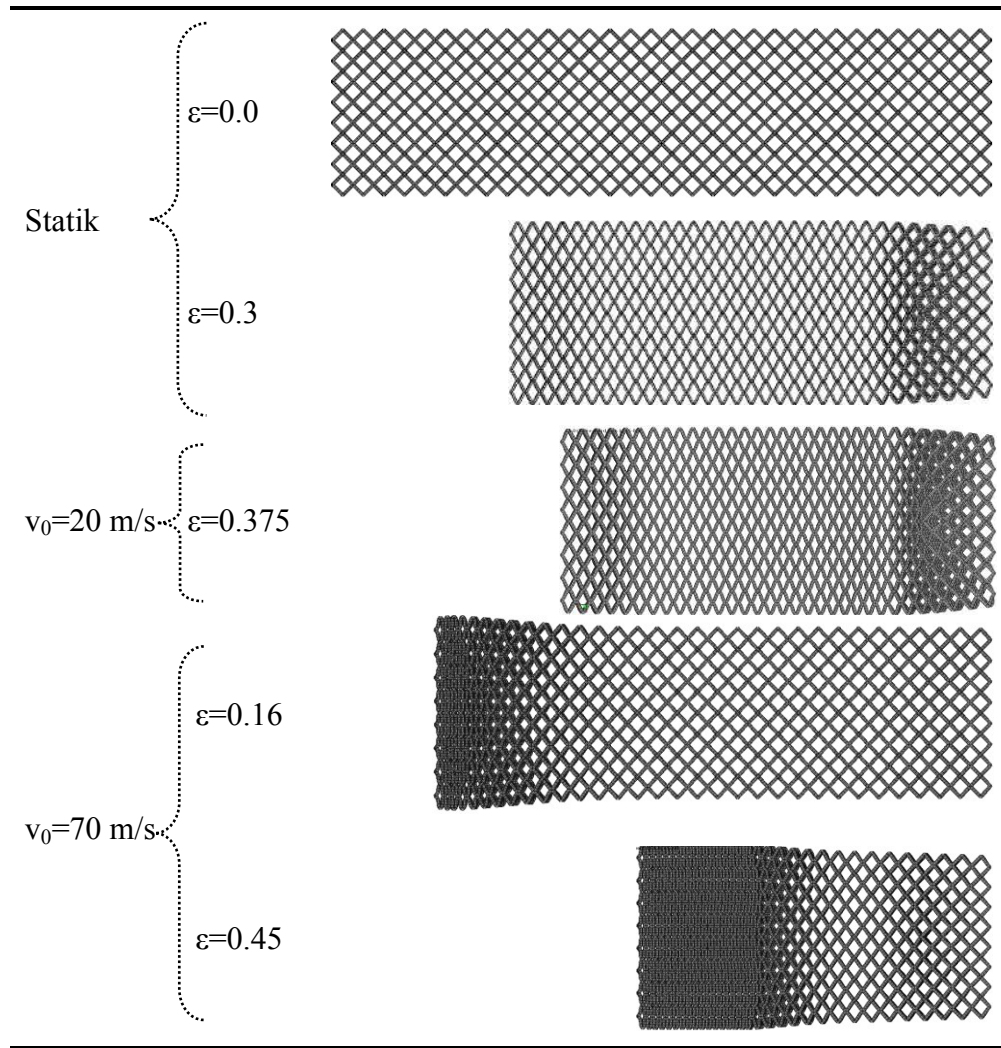
Şekil 3.61. Darbe ve sabit uçlardan elde edilen gerilme-zaman eğrilerinin, a) 50 m/s ve b) 70 m/s darbe hızları için karşılaştırılması

Farklı darbe hızları için elde edilen şekil değişim enerjilerinin karşılaştırılmaları Şekil 3.62’de verilmiştir. Görüldüğü gibi şekil değişim enerjileri darbe hızı ile artmaktadır. 20, 30 ve 50 m/s darbe hızlarında şekil değişim enerjileri birbirine yakın olmakta iken 70 m/s darbe hızında şekil değişim enerjisinde ciddi bir artış meydana gelmektedir. Bu tamamıyla mikro ataletlerin yapı içerisinde ciddi artışlar göstermesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.62. Farklı darbe hızlarında numunelerin sönümlediği şekil değişim enerjilerinin karşılaştırılması (L=1.25 mm)

1.25 mm hücre boyutuna sahip kafeslerle ilgili deformasyon mekanizmalarına örnekler Şekil 3.63'te görülmektedir. 2.5 mm hücre boyutuna sahip kafes yapılara benzer bir davranış ortaya çıkmaktadır. Düşük hızlı darbelerde deformasyon üniform şekilde numune boyunca (sınır etkisindeki bölgeler hariç) dağılmaktadır. Yüksek hızlı darbe de ise (70 m/s için) şok deformasyonu ortaya çıktığından dolayı şok bölgesi içinde ful yoğunlaşma oluşmakta iken şok bölgesi dışında numunede önemli bir deformasyon oluşmamaktadır.



Şekil 3.63. Farklı darbe hızlarında elde edilen deformasyon mekanizmalarının belirli birim şekil değiştirme değerlerindeki görünüşleri (L=1.25 mm)

Genel olarak hem 2.5 mm hem de 1.25 mm hücre boyutu için gerçekleştirilen darbe testlerinde benzer bir karakteristik davranış elde edilmektedir. Yalnızca şok dalga başlangıcına sebep olan darbe hızı ve gerilme genliklerinde değişiklikler

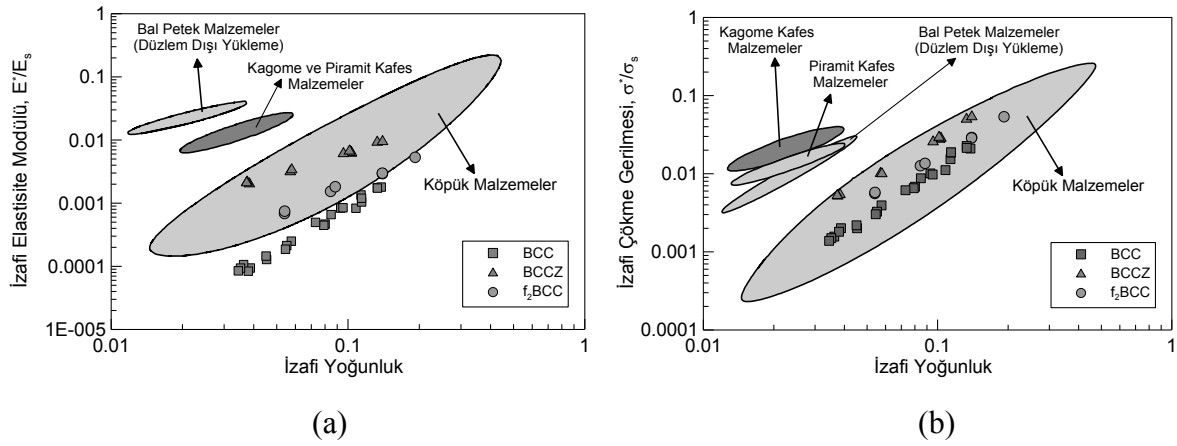
gözlemlenmektedir. Ayrıca elde edilen birim hücre şekil değiştirme profillerinden, hücresel malzemelerdeki dalga yayılımının ince cidarlı tüplerin dalga yayılımı ile benzerlik gösterdiği belirlenmiştir (Karagiozova ve Jones, 2004). İnce cidarlı tüplerde de düşük hızlı darbelerde, darbe ucundan elastik dalga yayılmakta ve sabit duvarda, dalga yansıması sebebiyle ilk akma meydana gelmektedir. Yüksek hızlı darbe durumlarında ise darbe ucuna yakın tüp kesitinde plastik deformasyonlar başlamaktadır.

3.13. Mikro Kafes Yapıların Mevcut Hücresel Malzemelerle Karşılaştırılması ve Geleceği

Bu tez kapsamında incelenen paslanmaz çelik mikro kafes yapıların mekanik performanslarının yaygın kullanımda olan hücresel malzemelerin mekanik performanslarıyla karşılaştırmak için Şekil 3.64'deki gibi iki grafik hazırlanmıştır. Şekil, Ashby vd. (2006) tarafından hazırlanan grafiklere, serbest yüzeyli mikro kafes yapıların deneysel basma verilerinin ilave edilmesiyle oluşturulmuştur. İzafi elastisite modülü ve izafi çökme gerilmeleri, mikro kafes yapıların basma testleriyle elde edilen değerlerin, sırasıyla 316L paslanmaz çeliğin elastisite modülü ve akma gerilmesine (Yaklaşık olarak $E_s=210$ GPa ve $\sigma_s=265$ MPa) bölünmesiyle elde edilmiştir. Şekil 3.64'den görüldüğü üzere paslanmaz çelik mikro kafes yapılar, mekanik performans açısından köpük malzemelerin performansını yakalamaktadır. Diğer bir söylemle, paslanmaz çelik mikro kafes yapılar, köpük malzemelerin kullanıldığı yapısal performans uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilecekleri ortaya çıkmaktadır. Piramit kafes yapılar ve bal petek yapılarla karşılaştırıldığında, performans olarak çok geri kaldıkları görülmektedir. Ayrıca bal petek ve piramit kafes yapıların izafi yoğunluğunun düşüklüğü de onları avantajlı kılmaktadır. Buna karşın, kolayca anlaşılacağı üzere izafi yoğunluğun düşüklüğü genelde malzemenin kapladığı hacmin büyüklüğünün fazla olduğu anlamına gelmektedir. Yani, aynı mekanik performans için mikro kafes yapılarla karşılaştırıldığında çok büyük boyutlarda bal petek malzeme kullanılma gereksinimi doğabilir. Bu yönüyle hacmin önemli olduğu uygulamalarda da mikro kafes yapıların kullanımı önemli bir avantaj olacaktır.

Sonuç olarak, nispeten yeni bir ürün olan seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen çelik mikro kafes yapılar teknolojik uygulamalarda köpük malzemelerle rekabet edebilecek düzeye ulaşmışlardır. Fakat en önemli dezavantajları üretim yönteminin pahalı ve zaman alıcı olmasıdır. Bu dezavantajı sebebiyle şu an için yapısal uygulama alanı oldukça

kısıtlıdır. Bundan dolayı hem üretim yönteminin maliyetinin düşürülmesine hem de bu yapıların mekanik performanslarının optimize edilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Mekanik performanslarının artırılmasına yönelik konuların başında alternatif mikro tozların kullanılmasıyla mikro kafes yapıların üretilmesidir. Örneğin, Titanyum alaşımı tozlar hem hafiflikleri hem de yüksek mukavemet değerleriyle mikro kafes yapıların mekanik performanslarını on katına kadar artırma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir (Tsopanos vd., 2010).



Şekil 3.64. Mikro kafes yapılar ve yaygın hücresel malzemelerin mekanik performanslarının karşılaştırılması; a) İzafi elastisite modülü, b) İzafi çökme gerilmesi (Ashby vd., 2006; güncellendi).

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen mikro kafes yapıların mekanik davranışları genel bir incelemeye tabi tutulmuştur. Çalışmalar deneysel, sayısal ve teorik olarak üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, mikro kafes malzemelerin mekanik davranışını karakterize etmeye yönelik statik ve dinamik testleri içermektedir. Sayısal çalışmalar, deneysel mekanik davranışların sayısal ortama taşınması ve gerçeğe en yakın modellemenin elde edilmesine yöneliktir. Teorik çalışmalar ise, mikro kafes yapıların başlangıç elastisite modülü ve çökme gerilmesi değerlerini tahmin eden ampirik bağıntıların, mikro tel çapının hücre boyutuna oranına bağlı olarak elde edilmesi çabalarını içermektedir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda sunulmaktadır.

- Basma testleri sonucunda, genel olarak mikro kafes yapıların gerilme birim şekil değiştirme eğrilerinin konvansiyonel köpük ve bal petek yapılarınkine benzer olduğu görülmüştür. Fakat hücre topolojisine göre kendi içinde farklılık göstermektedir. BCC kafes yapısı için eğilme baskın çökme davranışı meydana gelirken BCCZ ve F_2 BCC kafes yapılar için başlangıçta çeki-bası baskın çökme davranışı meydana gelmektedir.
- Çalışılan malzeme için izafi yoğunluk ve hücre topolojisinin mekanik davranışları etkileyen en etkin iki parametre olduğu deneysel çalışmalardan belirlenmiştir. İzafi yoğunluk arttıkça her üç tip kafes yapısında gerilmelerde ciddi artışlar meydana gelirken yoğunlaşma birim şekil değiştirme değerlerinde azalma oluşmaktadır. Hücre topolojine bağlı olarak deformasyon mekanizmalarının değişmekte olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin BCC kafes yapısı için bloğun merkezinde deformasyon lokalleşmesi gelişirken, BCCZ ve F_2 BCC için düşük izafi yoğunlukta diyagonal kesme bandı şeklinde deformasyon mekanizması meydana gelmektedir.
- Özgül elastisite ve çökme gerilmesi açısından üç kafes yapının karşılaştırılmasında en iyi mekanik davranışın BCCZ kafes yapısına ait olduğu belirlenmiştir.

- Sınırlandırılmış basma testlerinde sınır etkileri sebebiyle izafi olarak düşük yoğunluklu BCC kafes yapıların çökme mekanizması çeki-bası baskın davranışa benzer gelişmekte olduğu gözlemlenmiş ve bunun sonucunda BCC kafes yapısının mekanik davranışlar açısından sınır etkilerine hassas olduğu ortaya çıkmıştır. Buna karşın, BCCZ kafes yapıların sınır etkilerine hemen hemen herhangi bir hassasiyeti olmadığı sınırlandırılmış basma testlerinden belirlenmiştir.
- Yapılan basma, çekme ve kesme testlerinde mikro kafes yapıların izafi yoğunluğunun aynı olması durumunda, bası ve çeki yüklemeleri için mekanik davranışların tekrarlanabilirliğinin çok yüksek olduğu, fakat kesme yüklemesi için tekrarlanabilirliğin düşük olduğu görülmüştür.
- Saf kesme yüklemesinde BCC kafes blokların mekanik cevabının yükleme açısına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.
- Gerçekleştirilen deneysel ve teorik çalışmalarda BCCZ kafes yapıların mekanik davranışlarının birim hücrede mevcut dikey mikro teller tarafından kontrol edildiği gözlemlenmiştir. Öyle ki, dikey mikro teller üretilirken lazer gücünü değiştirerek kafes bloğun kütlesinde yalnızca % 8'lük bir artışla birlikte, özgül şekil değiştirme enerjisinde % 80 oranında iyileştirmenin mümkün olduğu belirlenmiştir.
- Bileşik yükleme testleri vasıtasıyla düşük izafi yoğunluklu BCC kafes yapıların çökme yüzeyinin dairesel forma sahip olduğu, yüksek izafi yoğunluklu BCC kafes yapılarda çökme yüzeyinin eliptik bir hal aldığı belirlenmiştir.
- 316L paslanmaz çelikten üretilen mikro tellerin bireysel çekme testleriyle elastisite modüllerinin yaklaşık 97 ± 10 GPa civarında olduğu belirlenmiştir. Bu değer literatürde bulunan değerden % 30 daha düşüktür. Akma gerilmesinin ise ana malzeme olan paslanmaz çelik 316L ile hemen hemen aynı olduğu görülmüştür.
- Lazer parametrelerinin mikro tellerin gerilme-birim şekil değiştirme cevabında önemli bir etkisinin olmadığı, literatürden farklı olarak belirlenmiştir.
- Mikro tellerin dinamik çekme testlerinden, yaklaşık 100 s^{-1} birim şekil değiştirme hızına kadar şekil değiştirme hızı bağımlılığının olduğu görülmüştür.

- Teorik ve sayısal modellerde mikro tellerin kesişim bölgesi etkilerinin dikkate alınması modellerin cevabını iyileştirmiştir. Özellikle de küçük hücre boyutuna sahip kafes yapılarda bu etkilerin dikkate alınmasının oldukça önemli olduğu belirlenmiştir.
- Sayısal modellerle gerçekleştirilen çalışmalar BCCZ mikro kafes yapılarda ortaya çıkan diyagonal kesme deformasyonu şeklinde ortaya çıkan lokalleşmesinin gerilme eğrileri üzerinde lokal değişimler dışında önemli bir etkiye sahip olmadığını göstermiştir.
- Gerçekleştirilen sayısal çalışmalar ile kusur şiddeti çok büyük olmadığı sürece yapısal kusurların BCC kafes yapıların mekanik davranışları üzerine önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.
- BCC kafes yapıların mekanik davranışının numune boyutuna bağlı olduğu gerçekleştirilen sayısal çalışmalarla belirlenmiştir.
- Darbe hızı arttıkça BCC mikro kafes yapılarda dalga yayılımının mekanik davranışı belirlediği ve bunun sonunda mikro atalet etkilerinin etkin olmaya başladığı gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda görülmüştür. Belli bir kritik hızdan sonra ise şok yayılımı açık şekilde ortaya çıktığı gözlemlenilmiştir.
- Şok yayılımının belirgin olmaya başladığı kritik hız değerinin mikro kafes yapının hücre boyutuna ve izafi yoğunluğuna göre değiştiği sayısal çalışmalardan belirlenmiştir.

5. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen mikro kafes yapıların mekanik davranışlarının anlaşılmasında ve bu yapıların mekanik cevaplarının sayısal ve teorik modellemelerinde önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Fakat yinede mevcut modellerin iyileştirilmesi ve daha gerçekçi modeller elde etme adına aşağıda sıralanan önerilerin dikkate alınmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

- Deneysel çalışmalar optimum sonuçlar elde edilebilmesi adına diğer hücre topolojileriyle üretilen kafes yapılara uygulanabilir. Bunun yanında, Sayısal ve teorik modeller diğer kafes topolojilerine uygulanabilir.
- Mikro kafes yapılarda ve mikro tellerdeki kusurların modellenmesi adına X-ışını tomografisi gibi ileri tarama teknikleri ile gerçeğe en yakın üç boyutlu modeller elde edilebilir. Elde edilen modellerle mikro kusurların mekanik davranışa etkileri daha net belirlenebilir.
- Optimum yapılar elde etme adına seçici lazer ergitme yöntemiyle fonksiyonel derecelendirilmiş kafes yapılar üretilebilir ve test edilebilir. Derecelendirme, hücre boyutuna, kafes topolojilerine ve farklı ana malzemelere göre yapılabilir.
- Titanyum ve benzeri diğer metaller ile daha verimli mikro kafes yapılar üretilebilir ve mekanik davranışlar araştırılabilir.
- Mikro kafes yapılarda şok gelişiminin izlenmesi ve etkilerinin belirlenmesi için gaz tabancası testi uygulanabilir ve yüksek hızlı kameralar yardımıyla şok olayı belirlenebilir. Ayrıca, Mikro tellerin çekme testlerinde yüksek çözünürlüklü kameralar kullanılabilir ve daha kesin elastisite modülü değerleri elde edilebilir.
- Kafes yapılarda üretimden gelen artık gerilme, plastik şekil değişimleri belirlenerek sayısal modellere aktarılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abe, F., Yoshidome, A., Osakada, K. ve Shiomi, M., 1998. Direct Manufacturing of Metallic Model by Laser Rapid Prototyping, Japan Soc. Precision Eng., 32, 221-222.
- Abe, F., Osakada, K., Shiomi, M., Uematsu, K. ve Matsumoto, M., 2001. The Manufacturing of Hard Tools from Metallic Powders by Selective Laser Melting, J. Mater. Process. Tech., 111, 210-213.
- Ajdari, A., Nayeb-Hashemi, H., Canavan, P. ve Warner, G., 2008. Effect of Defects on Elastic-Plastic Behavior of Cellular Materials, Mat. Sci. Eng. A, 487, 558-567.
- Ajdari, A., Nayeb-Hashemi, H. ve Vaziri, A., 2011. Dynamic Crushing and Energy Absorption of Regular, Irregular and Functionally Graded Cellular Structures, Int. J. Solids Struct., 48, 506-516.
- Alkhader, M. ve Vural, M., 2008. Mechanical Response of Cellular Solids: Role of Cellular Topology and Microstructural Irregularity, Int. J. Mech. Sci., 46, 1035-1051.
- Alkhader, M. ve Vural, M., 2009. An Energy-Based Anisotropic Yield Criterion for Cellular Solids and Validation by Biaxial FE Simulations, J. Mech. Phys. Solids, 57, 871-890.
- Aly, M., S., 2007. Behavior of Closed Cell Aluminium Foams upon Compressive Testing at Elevated Temperatures: Experimental Results, Mater. Lett., 61, 3138-3141.
- Andrews, E., Sanders, W. ve Gibson, L., J., 1999. Compressive and Tensile Behaviour of Aluminum Foams, Mater. Sci. Eng., A270, 113-124.
- Andrews, E., W., Gioux, G., Onck, P. ve Gibson, L., J., 2001. Size Effects in Ductile Cellular Solids. Part II: Experimental Results, Int. J. Mech. Sci., 43, 701-713.
- Ashby, M., F., Evans, A., G., Fleck, N., A., Gibson, L., J., Hutchinson, J., W. ve Wadley, H., N., G., 2000. Metal Foams: A Design Guide, Butterworth-Heinemann, Boston.
- Ashby, M., F., 2006. The Properties of Foams and Lattices, Philos. T. R. Soc. A, 364, 15-30.
- Ashby, M., F., 2011. Materials Selection in Mechanical Design, Forth Edition, Elsevier, UK.
- Baker, W., E., Togami, T., C. ve Weydert, J., C., 1998. Static and Dynamic Properties of High-Density Metal Honeycombs, Int. J. Impact Engng., 21, 3, 149-163.
- Banhart, J., 2001. Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams, Prog. Mater. Sci., 46, 559-632.

- Bart-Smith, H., Bastawros, A., F., Mumm, D., R., Evans, A., G., Sypeck, D., J. ve Wadley, H., N., G., 1998. Compressive Deformation and Yielding Mechanisms in Cellular Al Alloys Determined Using X-Ray Tomography and Surface Strain Mapping, Acta Mater., 46, 10, 3583-3592.
- Bastawros, A., F., Bart-Smith, H. ve Evans, A., G., 2000. Experimental Analysis of Deformation Mechanisms in a Closed-Cell Aluminum Alloy Foam, J. Mech. Phys. Solids, 48, 301-322.
- Burgan, B., 2001. Elevated Temperature and High Strain Rate Properties of Offshore Steels, Steel Construction Institute, Offshore Technology Report 2001/020.
- Chen, C., Lu, T., J. ve Fleck, N., A., 1999. Effect of Imperfections on the Yielding of Two-Dimensional Foams, J. Mech. Phys. Solids, 47, 2235-2272.
- Chen, C. ve Fleck, N., A., 2002. Size Effects in the Constrained Deformation of Metallic Foams, J. Mech. Phys. Solids, 50, 955-977.
- Choi, J., B. ve Lakes, R., S., 1995. Analysis of Elastic Modulus of Conventional Foams and of Re-Entrant Foam Materials with a Negative Poisson's Ratio, Int. J. Mech. Sci., 37, 51-59.
- Christensen, R., M., 1986. Mechanics of Low Density Materials, J. Mech. Phys. Solids, 34, 6, 563-578.
- Christensen, R., M., 2000. Mechanics of Cellular and Other Low-Density Materials, Int. J. Solids Struct., 37, 93-104.
- Cote, F., Deshpande, V., S., Fleck, N., A. ve Evans, A., G., 2006. The Compressive and Shear Responses of Corrugated and Diamond Lattice Materials, Int. J. Solids Struct., 43, 6220-6242.
- Dannemann, K., A. ve Lankford Jr., J., 2000. High Strain Rate Compression of Closed-Cell Aluminium Foams, Mat. Sci. Eng. A, 293, 157-164.
- Davies R.M., 1948. A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar, Phil. Trans. R. Soc. London, Series A, 240, 821, 375-457.
- Dement'ev, A., G. ve Tarakanov, O., G., 1970. Effect of Cellular Structure on the Mechanical Properties of Plastic Foams, Polym. Mech., 6, 519-525.
- Dement'ev, A., G. ve Tarakanov, O., G., 1970. Model Analysis of the Cellular Structure of Plastic Foams of the Polyurethane Type, Polym. Mech., 6, 744-749.
- Demiray, S., Becker, W. ve Hohe, J., 2007. Numerical Determination of Initial and Subsequent Yield Surfaces of Open-Celled Model Foams, Int. J. Solids Struct., 44, 2093-2108.

- Deshpande, V., S. ve Fleck, N., A., 2000. High Strain Rate Compressive Behaviour of Aluminium Alloy Foams, Int. J. Impact Engng., 24, 277-298.
- Deshpande, V., S., Fleck, N., A. ve Ashby, M., F., 2001a. Effective Properties of the Octet-Truss Lattice Material, J. Mech. Phys. Solids, 49, 1747-1769.
- Deshpande, V., S., Ashby, M., F. ve Fleck, N., A., 2001b. Foam Topology Bending Versus Stretching Dominated Architectures, Acta mater., 49, 1035-1040.
- Diebels, S. ve Steeb, H., 2002. The Size Effect in Foams and Its Theoretical and Numerical Investigation, Proc. R. Soc. Lond. A, 458, 2869-2883.
- Doyoyo, M. ve Hu, J., W., 2006. Multi-Axial Failure of Metallic Strut-Lattice Materials Composed Of Short and Slender Struts, Int. J. Solids Struct., 43, 6115-6139.
- Elsayed, M., S., A., 2010. Multiscale Mechanics and Structural Design of Periodic Cellular Materials, Doktora Tezi, McGill University, Montreal.
- Evans, A., G., He, M., Y., Deshpande, V., S., Hutchinson, J., W., Jacobsen, A., J. ve Carter, W., B., 2010. Concepts for Enhanced Energy Absorption Using Hollow Micro-Lattices, Int. J. Impact Engng., 37, 947-959.
- Fan, H., L., Fang, D., N. ve Jin, F., N., 2008. Yield Surfaces and Micro-Failure Mechanism of Block Lattice Truss Materials, Mater. Des., 29, 2038-2042.
- Fan, H., L., Jin, F., N. ve Fang, D., N., 2009. Nonlinear Mechanical Properties of Lattice Truss Materials, Mater. Des., 30, 511-517.
- Fischer, T., 2007. Rationalising Bubble Trusses for Batch Production, Automat. Constr., 16, 45-53.
- Fleck, N., A., Deshpande., V., S. ve Ashby, M., F., 2010. Micro-architected Materials: Past, Present and Future, Proc. R. Soc. London, Series A, 466, 2495-2516.
- Gabbrielli, R., 2009. A New Counter-Example to Kelvin's Conjecture on Minimal Surfaces, Phil. Mag. Lett., 89, 8, 483-491.
- Gama, B., A., Lopatnikov, S., L. ve Gillespie Jr, J., W., 2004. Hopkinson Bar Experimental Technique: A Critical Review, Appl. Mech. Rev., 57, 4, 223-249.
- Gan, Y., X., Chen, C. ve Shen, Y., P., 2005. Three-Dimensional Modeling of the Mechanical Property of Linearly Elastic Open Cell Foams, Int. J. Solids Struct., 42, 6628-6642.
- Gibson, L., J. ve Ashby, M., F., 1997. Cellular Solids: Structure and Properties, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- Gibson, L., J., 2003. Cellular solids. MRS Bull., Mater. Res. Soc., 4, 270-271.

- Gioux, G., McCormack, T., M. ve Gibson, L., J., 2000. Failure of Aluminum Foams under Multiaxial Loads, Int. J. Mech. Sci., 42, 1097-1117.
- Goldsmith, W. ve Sackman, L., J., 1992. An Experimental Study of Energy Absorption in Impact on Sandwich Plates, Int. J. Impact Engng., 12, 2, 2241-262.
- Grenestedt, J., L. ve Tanaka, K., 1998. Influence of Cell Shape Variations on Elastic Stiffness of Closed Cell Cellular Solids, Scripta Mater., 40, 1, 71-77.
- Grenestedt, J., L. ve Bassinet, F., 2000. Influence of Cell Wall Thickness Variations on Elastic Stiffness of Closed-Cell Cellular Solids, Int. J. Mech. Sci., 42, 1327-1338.
- Grenestedt, J., L., 2005. On Interactions between Imperfections in Cellular Solids, J. Mater. Sci., 40, 5853-5857.
- Guo, X., E. ve Gibson, L., J., 1999. Behavior of Intact and Damaged Honeycombs: A Finite Element Study, Int. J. Mech. Sci., 41, 85-105.
- Gümrük, R. ve Karadeniz, S., 2009. The Influences of the Residual Forming Data on the Quasi-Static Axial Crash Response of a Top-Hat Section, Int. J. Mech. Sci., 51, 5, 350-362.
- Hallquist, J., O., 1998. LS-DYNA Users Manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore.
- Harrigan, J., J., Reid, S., R. ve Yaghoubi, A., S., 2010. The Correct Analysis of Shocks in a Cellular Material, Int. J. Impact Engng., 37, 918-927.
- Hayes, A., M., Wang, A., Dempsey, B., M. ve McDowell, D., L., 2004. Mechanics of Linear Cellular Alloys, Mech. Mater., 36, 691-713.
- Hongqing, V., W., 2005. A Unit Cell Approach for Lightweight Structure and Compliant Mechanism, Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Hönig, A. ve Stronge, W., J., 2002a. In-Plane Dynamic Crushing of Honeycomb. Part I: Crush Band Initiation and Wave Trapping, Int. J. Mech. Sci., 44, 1665-1696.
- Hönig, A. ve Stronge, W., J., 2002b. In-Plane Dynamic Crushing of Honeycomb. Part II: Application to Impact, Int. J. Mech. Sci., 44, 1697-1714.
- Hutchinson, R., G. ve Fleck, N., A., 2006. The Structural Performance of the Periodic Truss, J. Mech. Phys. Solids, 54, 4, 756-782.
- Hyun, S., Choi, J., E. ve Kang, K., J., 2009. Effect of Imperfections on the Mechanical Behavior of Wire-Woven Bulk Kagome Truss PCMs under Shear Loading, J. Mech. Sci. Technol., 23, 1270-1277.

- Issen, K., A., Casey, T., P., Dixon, D., M., Richards, M., C. ve Ingraham, J., P., 2005. Characterization and Modeling of Localized Compaction in Aluminum Foam, Scripta Mater., 52, 911-915.
- Jang, W., Y., Kraynik, A., M. ve Kyriakides, S., 2008. On the Microstructure of Open-Cell Foams and Its Effect on Elastic Properties, Int. J. Solids Struct., 45, 1845-1875.
- Karagiozova, D. ve Jones, N., 2004. Dynamic Buckling of Elastic-Plastic Square Tubes Under Axial Impact-II: Structural Response, Int. J. Impact Engng., 30, 2, 167-192.
- Kanahashi, H., Mukai, T., Yamada, Y., Shimojima, K., Mabuchi, M., Nieh, T., G. ve Higashi, K., 2000. Dynamic Compression of an Ultra-Low Density Aluminium Foam, Mat. Sci. Eng. A, 280, 349-353.
- Kim, H., S. ve Al-Hassani, S., T., S., 2001. Plastic Collapse of Cellular Structures Comprised Of Doubly Tapered Struts, Int. J. Mech. Sci., 43, 2453-2478.
- Klintonworth, J., W. ve Stronge, W., J., 1988. Elasto-Plastic Yield Limits and Deformation Laws for Transversely Crushed Honeycombs, Int. J. Mech. Sci., 30, 3-4, 273-292.
- Kolsky, H., 1949. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading, Proc. Phys. Soc. London, section B, 62, II-B, 676-700.
- Kooistra, G., W., Deshpande, V., S. ve Wadley, H., N., G., 2004. Compressive Behavior of Age Hardenable Tetrahedral Lattice Truss Structures Made from Aluminium, Acta Mater., 52, 4229-4237.
- Kooistra, G., W., Queheillalt, D., T. ve Wadley, H., N., G., 2008. Shear Behavior of Aluminum Lattice Truss Sandwich Panel Structures, Mater. Sci. Eng. A, 472, 242-250.
- Kruth, J., P., Froyen, L., Vaerenbergh, J., V., Mercelis, P., Rombouts, M. ve Lauwers, B., 2004. Selective Laser Melting of Iron-based Powder, J. Mater. Process. Tech., 149, 616-622.
- Labeas, G., N. ve Sunaric, M., M., 2008. Investigation on the Static Response and Failure Process of Metallic Open Lattice Cellular Structures, Strain, 46, 195-204.
- Langdon, G., S. ve Schleyer, G., K., 2004. Unusual Strain Rate Sensitive Behaviour of AISI 316L Austenitic Stainless Steel, J. Strain Analysis, 39, 1, 71-86.
- Lee, S., Barthelat, F., Hutchinson, J., W. ve Espinosa, H., D., 2006a. Dynamic Failure of Metallic Pyramidal Truss Core Materials-Experiments and Modeling, Int. J. Plasticity, 22, 2118-2145.
- Lee, S., Barthelat, F., Moldovan, N., Espinosa, H., D. ve Wadley, H., N., G., 2006b. Deformation Rate Effects on Failure Modes of Open-Cell Al Foams and Textile Cellular Materials, Int. J. Solids Struct., 43, 53-73.

- Li, K., Gao, X., L. ve Roy, A., K., 2003. Micromechanics Model for Three-Dimensional Open-Cell Foams Using a Tetrakaidecahedral Unit Cell and Castigliano's Second Theorem, Compos. Sci. Technol., 63, 1769-1781.
- Li, K., Gao, X., L. ve Subhash, G., 2005. Effects of Cell Shape and Cell Wall Thickness Variations on the Elastic Properties of Two-Dimensional Cellular Solids, Int. J. Solids Struct., 42, 1777-1795.
- Li, Q., M., Magkiriadis, I. ve Harrigan, J., J., 2006. Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids, J. Cell. Plast., 42, 371-392.
- Li, K., Gao, X., L. ve Subhash, G., 2006a. Effects of Cell Shape and Strut Cross-Sectional Area Variations on the Elastic Properties of Three-Dimensional Open-Cell Foams, J. Mech. Phys. Solids, 54, 783-806.
- Li, K., Gao, X., L. ve Wang, J., 2007. Dynamic Crushing Behavior of Honeycomb Structures with Irregular Cell Shapes and Non-Uniform Cell Wall Thickness, Int. J. Solids Struct., 44, 5003-5026.
- Liu, Y. ve Zhang, X., C., 2009. The Influence of Cell Micro-Topology on the In-Plane Dynamic Crushing of Honeycombs, Int. J. Impact Engng., 36, 98-109.
- Lopatnikov, S., L., Gama, B., A., Haque, M., J., Krauthauser, C., Gillespie Jr, J., W., Güden, M. ve Hall, L., W., 2003. Dynamics of Metal Foam Deformation during Taylor Cylinder-Hopkinson Bar Impact Experiment, Compos. Struct., 61, 61-71.
- Luxner, M., H., Stampfl, J. ve Pettermann, H., E., 2004. Linear and Nonlinear Numerical Investigations of Regular Open Cell Structures. in: Proceedings of 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress, Anaheim, USA, New York.
- Luxner, M., H., Stampfl, J. ve Pettermann, H., E., 2005. Finite Element Modeling Concepts and Linear Analyses of 3D Regular Open Cell Structures, J. Mater. Sci., 40, 22, 5859-5866.
- Luxner, M., H., Stampfl, J. ve Pettermann, H., E., 2007. Numerical Simulations of 3D Open Cell Structures-Influence of Structural Irregularities on Elasto-Plasticity and Deformation Localization, Int. J. Solids Struct., 44, 2990-3003.
- McCullough, K., Y., G., Fleck, N., A. ve Ashby, M., F., 1999. Uniaxial Stress-Strain Behaviour of Aluminium Alloy Foams, Acta Mater., 47, 8, 2323-2330.
- McKown, S., Shen, Y., Brookes, W., K., Sutcliffe, C., J., Cantwell, W., J., Langdon, G., S., Nurick, G., N. ve Theobald, M., D., 2008. The Quasi-Static and Blast Loading Response of Lattice Structures, Int. J. Impact Engng., 35, 795-810.
- Meguid, S., A., Cheon, S., S. ve El-Abbasi, N., 2002. FE Modelling of Deformation Localization in Metallic Foams, Finite Elem. Anal. Des., 38, 631-643.
- Meyers, M., A., 1994. Dynamic Behavior of Materials, John Wiley & Sons, New York.

- Mines, R., A., W., 2008. On the Characterisation of Foam and Micro-Lattice Materials Used in Sandwich Construction, Strain, 44, 71-83.
- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S. ve Kitahara, A., 2000. Alporas Aluminum Foam: Production Process, Properties and Applications, Adv. Eng. Mater., 2, 4, 179-183.
- Mohr, D. ve Doyoyo, M., 2002. Analysis of the Arcan Apparatus in the Clamped Configuration, J. Compos. Mater., 36, 22, 2583-2594.
- Mohr, D., 2005. Mechanism-Based Multi-Surface Plasticity Model for Ideal Truss Lattice Materials, Int. J. Solids Struct., 42, 3235-3260.
- Montanini, R., 2005. Measurement of Strain Rate Sensitivity of Aluminium Foams for Energy Dissipation, Int. J. Mech. Sci., 47, 26-42.
- Montminy, M., D., Tannenbaum A., R. ve Macosko, C., W., 2004. The 3D Structure of Real Polymer Foams, J. Colloid Interf. Sci., 280, 202-211.
- Mukai, T., Kanahashi, H., Miyoshi, T., Mabuchi, M., Nieh, T., G. ve Higashi, K., 1999. Experimental Study of Energy Absorption in a Close-Celled Aluminum Foam under Dynamic Loading, Scripta Mater., 40, 8, 921-927.
- Mukai, T., Miyoshi, T., Nakano, S., Somekawa, H. ve Higashi, K., 2006. Compressive Response of a Closed-Cell Aluminum Foam at High Strain Rate, Scripta Mater., 54, 533-537.
- Nieh, T., G., Higashi, K. ve Wadsworth, J., 2000. Effect of Cell Morphology on the Compressive Properties of Open-Cell Aluminum Foams, Mat. Sci. Eng. A, 283, 105-110.
- Papka, S., D. ve Kyriakides, S., 1994. In-Plane Compressive Response and Crushing of Honeycomb, J. Mech. Phys. Solids, 42, 10, 1499-1532.
- Papka, S., D. ve Kyriakides, S., 1998. Experiments and Full-Scale Numerical Simulations of In-Plane Crushing of a Honeycomb, Acta Mater., 46, 8, 2765-2776.
- Papka, S., D. ve Kyriakides, S., 1999. Biaxial Crushing of Honeycombs-Part I: Experiments, Int. J. Solids Struct., 36, 4367-4396.
- Ptochos, E. ve Labeas, G., 2012. Shear Modulus Determination of Cuboid Metallic Open-Lattice Cellular Structures by Analytical, Numerical and Homogenisation Methods, Strain, DOI: 10.1111/j.1475-1305.2012.00837.x.
- Qiu, X., M., Zhang, J. Ve Yu, T., X., 2009. Collapse of Periodic Planar Lattices under Uniaxial Compression, Part II: Dynamic Crushing Based on Finite Element Simulation, Int. J. Impact Engng., 36, 1231-1241.

- Onck, P., R., Andrews, E., W. ve Gibson, L., J., 2001. Size Effects in Ductile Cellular Solids. Part I: Modeling, Int. J. Mech. Sci., 43, 681-699.
- Queheillalt, D., T., Deshpande, V., S. ve Wadley, H., N., G., 2007. Truss Waviness Effects in Cellular Lattice Structures, J. Mech. Mater. Struct., 2, 9, 1657-1675.
- Queheillalt, D., T. ve Wadley, H., N., G., 2009. Titanium Alloy Lattice Truss Structures, Mater. Des., 30, 1966-1975.
- Radford, D., D., McShane, G., J., Deshpande, V., S. ve Fleck, N., A., 2007. Dynamic Compressive Response of Stainless-Steel Square Honeycombs, J. Appl. Mech.-T ASME, 74, 658-667.
- Rehme, O. ve Emmelmann C., 2006. Rapid Manufacturing of Lattice Structures with Selective Laser Melting, In: Bachmann, F., G., Hoving, W., Lu, Y. Ve Washio, K. (Eds): Laser-Based Micropackaging III, Proceedings of the SPIE Photonics West, LASE 2006 Symposium, San Jose, CA, USA, vol. 6107, OK1-OK12.
- Reid, S., R. ve Peng, C., 1997. Dynamic Uniaxial Crushing Of Wood, Int. J. Impact Engng., 19, 5-6, 531-570.
- Roberts, A., P. ve Garboczi, E., J., 2002. Elastic Properties of Model Random Three-Dimensional Open-Cell Solids, J. Mech. Phys. Solids, 50, 33-55.
- Ruan, D., Lu, G., Wang, B. ve Yu, T., X., 2003. In-Plane Dynamic Crushing of Honeycombs-A Finite Element Study, Int. J. Impact Engng., 28, 161-182.
- Santosa, S. ve Wierzbicki T., 1998. On the Modeling of Crush Behavior of a Closed-Cell Aluminum Foam Structure, J. Mech. Phys. Solids, 46, 4, 645-669.
- Shen, Y., 2009. High-Performance Sandwich Structures Based on Novel Metal Cores, Doktora Tezi, The University of Liverpool, Liverpool.
- Shen, Y., McKown, S., Tsopanos, S., Sutcliffe, S., C., Mines, R., A., W. ve Cantwell, W., J., 2009. The Mechanical Properties of Sandwich Structures Based on Metal Lattice Architectures, J. Sandw. Struct. Mater., 12, 2, 159-180.
- Shim, V., P., W. ve Stronge, W., J., 1986. Lateral Crushing in Tightly Packed Arrays of Thin-Walled Metal Tubes, Int. J. Mech. Sci., 28, 10, 709-728.
- Shulmeister, v., Van der Burg, M., W., D., Van der Giessen, E. ve Marissen, R., 1998. A Numerical Study of Large Deformations of Low-Density Elastomeric Open-Cell Foams, Mech. Mater., 30, 125-140.
- Sigmund, O., 1994. Materials with Prescribed Constitutive Parameters: An Inverse Homogenization Problem, Int. J. Solids Struct., 31, 17, 2313-2329.

- Silva, M., J. ve Gibson, L., J., 1997. The Effects of Non-Periodic Microstructure and Defects on the Compressive Strength of Two-Dimensional Cellular Solids, Int. J. Mech. Sci., 39, 5, 549-563.
- Smith, M., Cantwell, W., J., Guan, Z., Tsopanos, S., Theobald, M., D., Nurick, G., N. ve Langdon, G., S., 2011. The Quasi-Static and Blast Response of Steel Lattice Structures, J. Sandw. Struct. Mater., 13, 4, 479-501.
- Simone, A., E. ve Gibson, L., J., 1998a. Effects of Solid Distribution on the Stiffness and Strength of Metallic Foams, Acta Mater., 46, 6, 2139-2150.
- Simone, A., E. ve Gibson, L., J., 1998b. Aluminum Foams Produced by Liquid-State Processes, Acta Mater., 46, 9, 3109-3123.
- Simone, A., E. ve Gibson, L., J., 1998c. The Effects of Cell Face Curvature and Corrugations on the Stiffness and Strength of Metallic Foams, Acta Mater., 46, 11, 3929-3935.
- Sugimura, Y., Meyer, J., He, M., H., Bart-Smith, H., Grenstedt, J. ve Evans A., G., 1997. On the Mechanical Performance of Closed Cell Al Alloy Foams, Acta Mater., 45, 12, 5245-5259.
- Stronge, W., J. ve Yu, T., X., 1993. Dynamic Models for Structural Plasticity, Springer, Berlin.
- Tan, P., J., Harrigan, J., J. ve Reid, S., R., 2002. Inertia Effects in Uniaxial Dynamic Compression of a Closed Cell Aluminium Alloy Foam, Mater. Sci. Tech., 18, 480-488.
- Tan, P., J., Reid, S., R., Harrigan, J., J., Zou, Z. ve Li, S., 2005. Dynamic Compressive Strength Properties of Aluminium Foams. Part I-Experimental Data and Observations, J. Mech. Phys. Solids, 53, 2174-2205.
- Tang, X., Prakash, V., Lewandowski, J., J., Kooistra, G., W. ve Wadley, H., N., G., 2007. Inertial Stabilization of Buckling at High Rates of Loading and Low Test Temperatures: Implications for Dynamic Crush Resistance of Aluminum-Alloy-Based Sandwich Plates with Lattice Core, Acta Mater., 55, 2829-2840.
- Tekoğlu, C., Gibson, L., J., Pardoën, T. ve Onck, P., R., 2011. Size Effects in Foams: Experiments and Modeling, Prog. Mater. Sci., 56, 109-138.
- Tilbrook, M., T., Radford, D., D., Deshpande, V., S. ve Fleck, N., A., 2007. Dynamic Crushing of Sandwich Panels with Prismatic Lattice Cores, Int. J. Solids Struct., 44, 6101-6123.
- Timoshenko, S., P. ve Gere, J., 1961. Theory of Elastic Stability, Second Edition, McGraw-Hill, New York.

- Thornton, P., H. ve Magee, C., L., 1975. The Deformation of aluminum foams, Metall. Mater. Trans. A, 6, 6, 1253-1263.
- Triantafillou, T., C., Zhang, J., Shercliff, T., L., Gibson, L., J. ve Ashby, M., F., 1989. Failure Surfaces for Cellular Materials under Multi Axial Loads-II. Comparison of Models with Experiment, Int. J. Mech. Sci., 31, 9, 665-678.
- Tsopanos, S., 2009. Micro heat exchangers by Selective Laser Melting, Doktora Tezi, The University of Liverpool, Liverpool.
- Tsopanos, S., Mines, R., A., W., McKown, S., Shen, Y., Cantwell, W., Brooks, W. ve Sutcliffe, C., J., 2010. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Micro-Lattice Structures. J. Manuf. Sci. E-T ASME, 132, 4, 41011.
- Ushijima, K., Cantwell, W., J., Mines, A., R., W., Tsopanos, S. ve Smith, M., 2011. An Investigation into the Compressive Properties of Stainless Steel Micro-Lattice Structures, J. Sandw. Struct. Mater., 13, 3, 303-329.
- URL-1, <http://www.mtt-group.com/selective-laser-melting.html>, 24 Ekim 2011.
- Vahapoğlu, V., 2010. Kauçuk Türü Malzemeler: Şekil Değiştirme Hızı Etkileri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 3, 265-281.
- Wadley, H., N., G., 2002. Cellular Metals Manufacturing, Adv. Eng. Mater., 2, 10, 726-733.
- Wadley, H., N., G., 2006. Multifunctional Periodic Cellular Metals, Philos. T. R. Soc. A, 364, 31-68.
- Wallach, J., C. ve Gibson, L., J., 2001a. Mechanical Behavior of a Three-Dimensional Truss Material, Int. J. Solids Struct., 38, 7181-7196.
- Wallach, J., C. ve Gibson, L., J., 2001b. Defect Sensitivity of a 3D Truss Material, Scripta Mater., 45, 639-644.
- Wang, A., J. ve McDowell, D., L., 2003. Effects of Defects on In-Plane Properties of Periodic Metal Honeycombs, Int. J. Mech. Sci., 45, 1799-1813.
- Wang, A., J. ve McDowell, D., L., 2004. In-Plane Stiffness and Yield Strength of Periodic, J. Eng. Mater.-T. ASME, 126, 137-156.
- Warren, W., E. ve Kraynik, A., M., 1987. Foam Mechanics: The Linear Elastic Response of Two-Dimensional Spatially Periodic Cellular Materials, Mech. Mater., 6, 1, 27-37.
- Warren, W., E. ve Kraynik, A., M., 1997. Linear Elastic Behavior of a Low-Density Kelvin Foam with Open Cells, J. Appl. Mech.-T ASME, 64, 787-794.

- Weaire, D. and Phelan, R., 1994. A Counter Example to Kelvin's Conjecture on Minimal Surfaces, Phil. Mag. Lett., 69, 2, 107-110.
- Wu, E. ve Jiang W., S., 1997. Axial Crush of Metallic Honeycombs, Int. J. Impact Engng., 19, 5-6, 439-456.
- Yi, F., Zhu, Z., Zu, F., Hu, S. ve Yi, P., 2001. Strain Rate Effects on the Compressive Property and the Energy-Absorbing Capacity of Aluminum Alloy Foams, Mater. Charact., 47, 417-422.
- Youssef, S., Maire, E. ve Gaertner, R., 2005. Finite Element Modelling of the Actual Structure of Cellular Materials Determined by X-Ray Tomography, Acta Mater., 53, 719-730.
- Yu, T., X. ve Zhang, L., C., 1996. Plastic Bending: Theory and Application, World Scientific, Singapore.
- Zilauts, A., F. ve Lagzdin, A., Z., 1992. Single-Bar Model of Cellular Materials Subjected to Large Elastic Deformations, Mech. Compos. Mater., 28, 1-7.
- Zhihua, W., Hongwei, M., Longmao, Z. ve Guitong, Y., 2006. Studies on the Dynamic Compressive Properties of Open-Cell Aluminum Alloy Foams, Scripta Mater., 54, 83-87.
- Zhang, Y., H., Qiu, X., M. ve Fang, D., N., 2008. Mechanical Properties of Two Novel Planar Lattice Structures, Int. J. Solids Struct., 45, 3751-3768.
- Zhang, X., C., Liu, Y., Wang, B. ve Zhang, Z., M., 2010. Effects of Defects on the In-Plane Dynamic Crushing of Metal Honeycombs, Int. J. Mech. Sci., 52, 1290-1298.
- Zhao, H. ve Gary, G., 1998. Crushing Behaviour of Aluminium Honeycombs under Impact Loading, Int. J. Impact Engng., 21, 10, 827-836.
- Zheng, Z., Yu, J. ve Li, J., 2005. Dynamic Crushing of 2D Cellular Structures: A Finite Element Study, Int. J. Impact Engng., 32, 650-664.
- Zhou, Q. ve Mayer, R., R., 2002. Characterization of Aluminum Honeycomb Material Failure in Large Deformation Compression, Shear and Tearing, J. Eng. Mater.-T. ASME, 124, 412-420.
- Zhou, J., Shrotriya, P. ve Soboyejo, W., O., 2004. Mechanisms and Mechanics of Compressive Deformation in Open-Cell Al Foams, Mech. Mater., 36, 781-797.
- Zupan, M., Deshpande, V., S. ve Fleck, N., A., 2004. The out-of-Plane Compressive Behavior of Woven-Core Sandwich Plates, Eur. J. Mech. A-Solid, 23, 411-421.
- Zhu, H., X., Knott, J., F. ve Mills, N., J., 1997a. Analysis of the Elastic Properties of Open-Cell Foams with Tetrakaidecahedral Cells, J. Mech. Phys. Solids, 45, 3, 319-343.

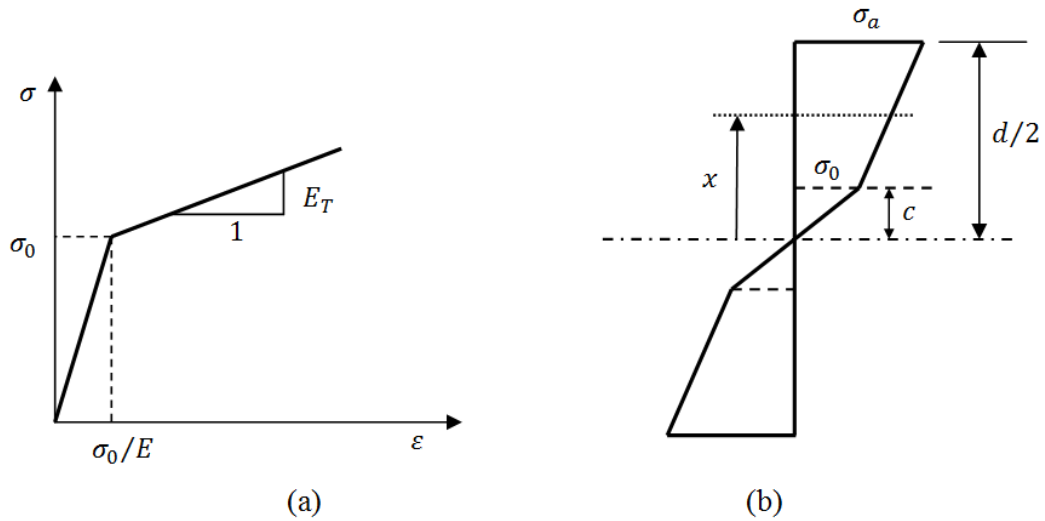
- Zhu, H., X., Mills, N., J. ve Knott, J., F., 1997b. Analysis of the High Strain Compression of Open-Cell Foams, J. Mech. Phys. Solids, 45, 11-12, 1875-1904.
- Zhu, H., X., Hobdell, J., R. ve Windle, A., H., 2000. Effects of Cell Irregularity on the Elastic Properties of Open-Cell Foams, Acta Mater., 48 4893-4900.
- Zhu, H., X. ve Windle, A., H., 2002. Effects of Cell Irregularity on the High Strain Compression of Open-Cell Foams, Acta Mater., 50, 1041-1052.
- Zhu, H., X., Thorpe, S., M. ve Windle, A., H., 2006. The Effect of Cell Irregularity on the High Strain Compression of 2D Voronoi Honeycombs, Int. J. Solids Struct., 43, 1061-1078.

7. EKLER

EK. 1. Dairesel Kesitli Elastik Lineer Plastik Malzemedan Yapılmış Bir Kirişte Plastik Momentin Tanımlanması

Elastik lineer plastik malzemedan yapılmış bir dairese kesitli kiriş akma sınırının üzerinde bir saf eğilme yüklemesine maruz kaldığı zaman kesitte oluşan gerilme dağılımı Ek Şekil 1’de görüldüğü gibi gerçekleşir. Burada, “d” ve “c” sırasıyla kiriş çapı ve akmaya başlayan liftlerin (Fibre) tarafsız eksenden uzaklığıdır. “ σ_a ” ise en dıştaki liftlerdeki gerilme göstermektedir. Böylece gerilme dağılımı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{x}{c} \sigma_0, & |x| \leq c \\ \sigma_0 + (\sigma_a - \sigma_0) \frac{x - c}{d/2 - c}, & x > c \end{cases} \quad (E.1)$$



Ek Şekil 1. Elastik lineer plastik malzemenin idealleştirilmiş hali; a) Gerilme-birim şekil değiştirme davranışı, b) kesit boyunca elastik ve plastik gerilme dağılımları

Ek Şekil 1’den en dıştaki liftlerdeki gerilmeler şu şekilde hesaplanabilir:

$$\sigma_a = \sigma_0 + \mu \sigma_0 \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right) \quad (E.2)$$

Ek-1'in devamı

Formülde " μ ", tanjant modülünün elastik modüle oranıdır ve $\mu = E_t / E$ şeklinde ifade edilirken " $\gamma = d/2c$ " şeklinde ifade edilir. Eşitlik (E.1) eşitlik (E.2)'de yerine yazılırsa, plastik bölgedeki gerilme dağılımı bulunur.

$$\sigma = \sigma_0 + \mu \sigma_0 \left(\frac{x}{c} - 1 \right) \quad x \geq c \quad (\text{E.3})$$

Kesitteki eğilme momentleri hem elastik hem de plastik eğilme momentlerinin toplanması ile elde edilir.

$$M = M_e + M_p \quad (\text{E.4})$$

$$M = 2 \int_0^c \sigma(|x| \leq c) x dA + 2 \int_c^{d/2} \sigma(|x| > c) x dA \quad (\text{E.5})$$

Eşitlikler (E.3) ve (E.1) eşitlik (E.5)'de yerlerine yazılırsa;

$$M = 2 \int_0^c \sigma_0 x \frac{x}{c} dA + 2 \int_c^{d/2} \left(\sigma_0 + \mu \sigma_0 \left(\frac{x}{c} - 1 \right) \right) x dA \quad (\text{E.6})$$

şeklinde integral eşitliği elde edilir. Burada, " dA ", Ek Şekil 2'de görüldüğü gibi birim alandır. " dA " için Ek Şekil 2'de verilen değer integral eşitliğinde yerine yazılırsa, son eşitlik şu şekilde elde edilir.

$$M = 4 \int_0^c \frac{x^2}{c} \sigma_0 \sqrt{\left(\frac{d^2}{4} - x^2 \right)} dx + 4 \int_c^{d/2} \left(\sigma_0 + \mu \sigma_0 \left(\frac{x}{c} - 1 \right) \right) x \sqrt{\left(\frac{d^2}{4} - x^2 \right)} dx \quad (\text{E.7})$$

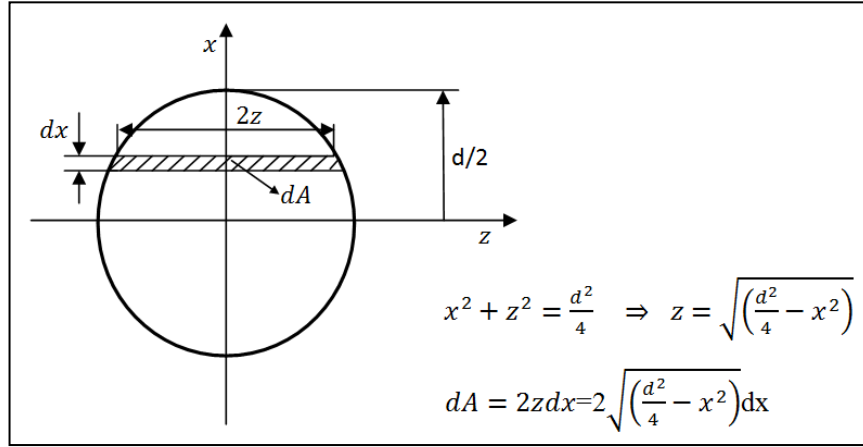
Eşitlik (E.7), Mathematica programı ile çözülürse, toplam moment elde edilmiş olur.

Ek-1'in devamı

$$M=2\sigma_0 \left\{ 0.0625d^3(1-\mu)(0.333A^2+0.5)\sqrt{A}+0.015625\frac{d^4}{c}B \right\} \quad (E.8)$$

Burada, A ve B sabitlerdir ve şu şekilde tanımlanırlar.

$$A=1-4\left(\frac{c}{d}\right)^2 \quad \text{ve} \quad B=(1-\mu)\text{ArcSin}\left[2\frac{c}{d}\right]+1.5708\mu \quad (E.9)$$



Ek Şekil 2. İntegrasyon için dairesel kesitten birim alanın hesabı

ÖZGEÇMİŞ

Recep GÜMRÜK, 1980 yılında Trabzon’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini aynı ilde tamamladı. 1997 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2001 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2006 yılında Yüksek Lisans Eğitimini tamamlayıp aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Eğitimine başladı. 2003 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Halen aynı görevine devam etmekte olup, İngilizce bilmektedir.