



**UHMWPE’NİN FARKLI DEFORMASYON HIZLARI ALTINDA
EĞİLME DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ: DENEYSEL VE
NÜMERİK ÇALIŞMA**

KAZIM ERCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2021

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**UHMWPE’NİN FARKLI DEFORMASYON HIZLARI ALTINDA
EĞİLME DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ: DENEYSEL VE
NÜMERİK ÇALIŞMA**

KAZIM ERCAN

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ

YOZGAT – 2021

Her Hakkı Saklıdır

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Kazım ERCAN

01.06.2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UHMWPE’NİN FARKLI DEFORMASYON HIZLARI ALTINDA EĞİLME DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ: DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMA

KAZIM ERCAN

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. HAMZA KEMAL AKYILDIZ

Yarı kristal termoplastik malzeme olarak bilinen hafifliği, çok düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci, yüksek darbe dayanımı, yüksek kimyasal ve korozyon direnci ve yüksek gürültü emilim gibi olağan üstü mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE), biyomedikal, savunma, otomotiv ve havacılık gibi birçok sanayi kollarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulama alanlarında UHMWPE genellikle değişik hızlar altında eğilme gibi çok eksenli yüklere maruz kalmaktadırlar. Bu malzemenin değişik hızlar altındaki eğme yüklerine karşı vermiş olduğu tepkiyi önce deneysel olarak belirlemek ve sonrasında da sonlu elemanlar bağlamında modellemek endüstriyel bir gereksinimdir. Bu çalışmanın ana amacı daha önce hiç belirlenmemiş UHMWPE’nin değişik hızlarda 3 nokta eğme yükleri altındaki mekanik davranışını deneysel olarak belirlemek ve nümerik olarak doğrulamaktır. Bu kapsamda 3 nokta eğme testleri 0.1, 1 ve 12 mm/s hızları altında gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin nümerik analizleri SAMP-1(polimerler için yarı analitik malzeme modeli) malzeme modeli kullanılarak LS-DYNA mühendislik programında yapılmıştır. SAMP-1 malzeme modelinin hesaplamalar için gereksinim duyduğu çoklu çekme plastik gerinim-gerilim eğrileri ile birlikte basma plastik gerinim-gerilim eğrileri gerçekleştirilen çekme ve basma testleri aracılığıyla elde edilmiştir. Basma ve çekme testleri yine 0.1, 1 ve 12 mm/s hızları altında yapılmıştır. UHMWPE’nin çekme ve basma yükleri altında sergilemiş olduğu gerinim yumuşaması ve takip eden gerinim sertleşmesi gibi önemli malzeme davranışlarını SAMP-1 malzeme modeli tarafından yüksek hassasiyetle elde edildiği bu testlerin yapılan nümerik analizleri sonucunda ortaya konmuştur. Artan hıza bağlı UHMWPE’nin 3 nokta eğme yüklerine karşı verdiği tepkinin arttığı ve SAMP-1 malzeme modeli aracılığı ile yüksek doğrulukla elde edildiği gözlemlenmiştir.

2021, 81 Sayfa

Anahtar Kelimeler: UHMWPE, 3 nokta eğme, SAMP-1, Gerinim oranı, Hidrostatik basınç

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

DETERMINATION OF THE FLEXURAL BEHAVIOR OF UHMWPE UNDER DIFFERENT DEFORMATION VELOCITIES: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY

KAZIM ERCAN

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF EDUCATION INSTITUTE**

MECHANICAL ENGINEERING

SUPERVISOR: PROF. DR. HAMZA KEMAL AKYILDIZ

Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) considered as a semi-crystalline polymer has been widely used in a broad range of engineering applications, such as biomedical, defense, automotive and aviation due to its superior physical and mechanical properties, including lightweight, very low coefficient of friction, high wear resistance, high impact resistance, high chemical and corrosion resistance and high noise absorption. In these application fields, UHMPWE are generally subjected to multiaxial loads, like bending at different deformation velocities. First, determining the mechanical response of this material to bending loads experimentally, and then predicting its material behavior under bending loads in the context of finite element analysis accurately is of industrial need. On account of this, the primary aim of this study is to first determine the material behavior of UHMWPE under three-point bending at different deformation rates through mechanical tests, and then to reproduce the 3-point bending test data satisfactorily by means of numeric analysis. In this framework, the 3-point bending tests have been carried out on UHMWPE at three various deformation rates such as 0.1 mm/s, 1 mm/s and 12 mm/s. The numerical implementation of the 3-point point bending tests has been performed using SAMP- 1 material model (semi-analytical material model for polymers) in LS-DYNA engineering software. The required input material parameters to SAMP-1, including multiple tensile plastic stress-strain and compressive plastic stress-strain curves have been obtained by conducting associated mechanical tests at the identical deformation rates attained in the actual 3-point bending experiments. Such characteristic material behavior of UHMWPE under tension and compression, including strain softening followed by strain hardening, has been successfully captured by SAMP-1. It has been observed that the UHWMPE acts stiffer with an increased deformation rate, and a very good correlation has been achieved between 3-point bending outcomes and numerical predictions.

2021, 81 Pages

Keywords: UHMWPE, 3-point bending, SAMP-1, strain rate, Hydrostatic pressure

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca maddi ve manevi vermiş olduğu desteklerinden dolayı öncelikle eşime ve aileme çok teşekkür ederim.

Tez konusu belirlenmesi, deneylerin yapılması, nümerik çalışmaları ve tezin yazımı da dahil olmak üzere en başından en sonuna kadar her an yardımını esirgemeyen ve büyük bir özveri ile yardımcı olup sürekli motive eden sayın hocam Dr. Mehmet Akif DÜNDAR'a, deney numunelerinin hazırlanma aşamasında yardımcı olan Araş. Gör. Osman ÖZENÇ ve Burak BÜYÜKER'e ve danışman hocam sayın Prof. Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasındaki tüm mekanik testler "TANAP Sosyal ve Çevresel Yatırım Programları" tarafından finanse edilen Yozgat Bozok Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Test Laboratuvarı'nda (MATEL) gerçekleştirilmiştir.

Kazım ERCAN

01/06/2021

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ÖZETLERİ	10
3 MATERYAL VE YÖNTEM	18
3.1 Materyal.....	18
3.2 Yöntem	18
4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	22
4.1 Çekme Deneyi	22
4.2 Basma Deneyi.....	25
4.3 3 Nokta Eğme Deneyi	26
5 NÜMERİK ÇALIŞMALAR	28
5.1 Çekme Deneyi	33
5.2 Basma Deneyi.....	34
5.3 3 Nokta Eğme Deneyi	35
6 BULGULAR.....	37
6.1 Deneysel Çalışma Bulguları	37
6.1.1 Çekme Deneyi.....	37
6.1.2 Basma Deneyi	44
6.1.3 3 Nokta Eğme Deneyi	48
6.2 Nümerik Çalışma Bulguları ve Karşılaştırma	51
6.2.1 Çekme Deneyi.....	51
6.2.2 Basma Deneyi	56

6.2.3	3 Nokta Eğme Deneyi	60
7	SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALARA ÖNERİLERİ.....	68
	KAYNAKLAR	71



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Polimer malzemelere ait şematik zincir çizimi.....	2
Şekil 1.2. UHMWPE kaplı toplayıcı damperli kamyon(Kurtz, 2015).....	4
Şekil 1.3. UHMWPE'nin zincir yapısı (a) amorf ve (b) kristal bölgeler(Beşergil, 2020)	4
Şekil 1.4. Etilen ve polietilen kimyasal yapısı	5
Şekil 1.5. UHMWPE' nin çekme altında tipik mühendislik eğrisi(Xu ve ark., 2016).7	
Şekil 1.6. Plastik deformasyon altında UHMWPE' nin elektron mikrografi ile mikro yapısının değişimi: (a) $\epsilon=0$ (b) $\epsilon=1$ (c) $\epsilon=6,6$ (Xu ve ark., 2016)	9
Şekil 1.7. Çekme yükü altında deformasyon oluşum aşaması(Sælen, 2012).....	9
Şekil 3.1. SHIMADZU üniversal test cihazı (a) ve sonuçların alındığı bilgisayar (b)	20
Şekil 4.1. Standart çekme test numunesi ölçüleri	23
Şekil 4.2. Hazırlanan numunelerin yönlendirme durumları.....	23
Şekil 4.3. Deneylede kullanılacak standart çekme numuneleri	23
Şekil 4.4 Çekme deneyi sırasında UHMWPE numunenin deforme olması.....	24
Şekil 4.5. Standart basma numunesi ölçüleri	25
Şekil 4.6. Standartlara göre hazırlanmış basma numunesi.....	26
Şekil 4.7. Standart 3 Nokta eğme numune ölçüleri.....	27
Şekil 4.8. Standart olarak hazırlanmış 3 nokta eğme numunesi	27
Şekil 4.9. 3 nokta eğme deneyi süresince numunenin deforme olma aşaması	27
Şekil 5.1. SAMP-1 akma yüzeyi hesaplama algoritması(Dundar, 2017)	29
Şekil 5.2. Çekme test sonlu elemanlar modeli	33
Şekil 5.3. Basma test sonlu elemanlar modeli	34
Şekil 5.4. 3 nokta eğme test sonlu elemanlar modeli.....	36
Şekil 6.1. Çekme deneyi sonuçlarından oluşan farklı deformasyon hızlarındaki (a)UHMWPE 0^0 ve (b)UHMWPE 90^0 numunelere ait eğriler.....	37
Şekil 6.2. Farklı deformasyon hızlarında UHMWPE 0^0 ve UHMWPE 90^0 numunelerin çekme eğrilerinin karşılaştırılması	39

Şekil 6.3. Test sonucunda deforme olmuş numuneler (a) ve test sırasında deforme olmuş numune (b)	42
Şekil 6.4. 12 mm/s hızda (a) UHMWPE 0 ⁰ ve (b) UHMWPE 90 ⁰ numuneler için deney sırasında deforme olmuş hali	42
Şekil 6.5. (a) UHMWPE 0 ⁰ ve (b) UHMWPE 90 ⁰ numunelere ait çekme hızına bağlı akma dayanımı karşılaştırılması.....	43
Şekil 6.6. (a) UHMWPE 0 ⁰ ve (b) UHMWPE 90 ⁰ numunelere ait çekme hızına bağlı çekme elastik modülü karşılaştırılması	43
Şekil 6.7. Değişik hızlar için gerçek basma gerilme-gerinim eğrileri.....	44
Şekil 6.8. Basma deneyi sonucunda deforme olmuş numuneler.....	45
Şekil 6.9. Basma hızına bağlı (a) akma dayanımı ve (b) basma elastik modülü karşılaştırması	47
Şekil 6.10. Farklı hızlar için 3 nokta eğme test kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	48
Şekil 6.11. 3 nokta eğme deneyi sonrasında deforme olmuş numuneler	50
Şekil 6.12. 3 nokta eğme hızına bağlı en yüksek eğme kuvvet değişimi.....	50
Şekil 6.13. 0.1 mm/s çekme hız için gerilme gerinim dağılımları a) X-stress (normal gerilme) ve b) X-strain değerleri.....	52
Şekil 6.14. 0.1 mm/s hız için çekme gerilim-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması....	52
Şekil 6.15. 1 mm/s çekme hız için gerilme gerinim dağılımları a) X-stress (normal gerilme) ve b) X-strain değerleri.....	53
Şekil 6.16. 1 mm/s hız için çekme gerilim-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 6.17. 12 mm/s çekme hız için gerilme gerinim dağılımları a) X-stress (normal gerilme) ve b) X-strain değerleri.....	54
Şekil 6.18. 12 mm/s hız için çekme gerilim-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması.....	55
Şekil 6.19. 0.1 mm/s hız için yer değiştirme ve karşılık gelen von Mises gerilim dağılımları	56
Şekil 6.20. 0.1 mm/s hızda nümerik ve deneysel eğrilerin karşılaştırılması.....	57
Şekil 6.21. 1 mm/s hız için yer değiştirme ve karşılık gelen von Mises gerilim dağılımları	57
Şekil 6.22. 1 mm/s hızda nümerik ve deneysel eğrilerin karşılaştırılması.....	58
Şekil 6.23. 12 mm/s hız için yer değiştirme ve karşılık gelen von Mises gerilim dağılımları	59

Şekil 6.24. 12 mm/s hızda nümerik ve deneysel verilerin karşılaştırılması.....	59
Şekil 6.25. 0.1 mm/s eğilme hızı altında (a) Drucker-Prager ve (b) von Mises çözüm yöntemleri için X-stress dağılımı	61
Şekil 6.26. 0.1 mm/s eğilme hızı altında deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması	62
Şekil 6.27. 1 mm/s eğilme hızı altında (a) Drucker-Prager ve (b) von Mises çözüm yöntemleri için X-stress dağılımı	63
Şekil 6.28. 1 mm/s eğilme hızı altında deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması	63
Şekil 6.29. 12 mm/s eğilme hızı altında (a) Drucker-Prager ve (b) von Mises çözüm yöntemleri için X-stress dağılımı	64
Şekil 6.30. 12 mm/s eğilme hızı altında deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması	65
Şekil 6.31. En yüksek eğme kuvvetlerinin karşılaştırılması	66
Şekil 6.32. 12 mm/s eğme hızı altında nümerik olarak elde edilen en yüksek gerinim oranı.....	67

TABLolar LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1.1. UHMWPE'nin Mekanik Özellikleri(Edidin ve Kurtz, 2000).....	6
Tablo 6.1. Çekme deneyi sonucu oluşan UHMWPE 0 ⁰ ve UHMWPE 90 ⁰ numuneler için değişen hızlarda oluşan akma dayanımı ve çekme elastik modülü	40
Tablo 6.2. Basma deneyi sonucu oluşan UHMWPE numuneler için değişen hızlarda oluşan akma dayanımı ve basma elastik modülü değerleri	46
Tablo 6.3. Nümerik analizlerde kullanılan değerler tablosu	60
Tablo 6.4. En yüksek eğme kuvvetlerinin karşılaştırma tablosu	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
MPa	MegaPascal
mm	Milimetre
N	Newton

Kisaltmalar	Açıklama
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
LLDPE	Lineer bağlı düşük yoğunluklu polietilen
MDPE	Orta yoğunluklu polietilen
PMMA	Polimetil metakrilat
PC	Polikarbonat
PVC	Polivinil klorür
PS	Polistiren
PET	Polietilen teraftalat
SAMP-1	Polimer malzemeler için yarı analitik malzeme modeli
UHMWPE	Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen
VLDPE	Çok düşük yoğunluklu polietilen

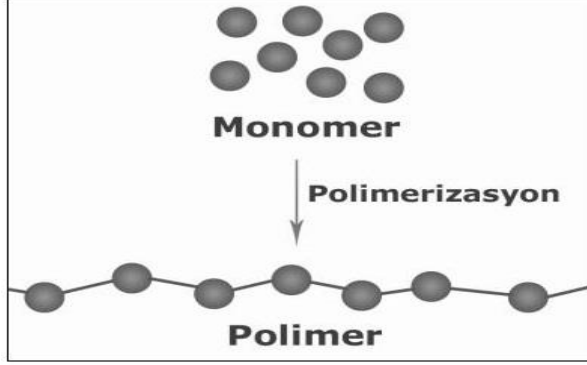
1 GİRİŞ

Son yüzyıl içerisinde gelişen teknolojiye bağlı olarak üretim yöntemlerinin artması günümüz endüstri dallarında kullanılan polimerlerin üretimini kolaylaştırmış ve bu kolaylaştırma polimer malzemelerin endüstride kullanılan metal malzemelerin yerini alma hızını arttırmıştır. Kullanım alanı genişleyen polimer malzemelerin mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirme noktasında çalışmalar devam etmektedir. Günümüzde plastik olarak adlandırılan polimer malzemeler endüstri ve günlük hayatımızda birçok alanda kullanılmaktadır. Polimer malzemelerin işlenebilirlik ve şekil alma kabiliyetleri metallere göre daha iyi olması ve kolay bulunabilir olması tercih edilmesinde en büyük etkenlerdendir. Çoğu polimer malzeme aşırı plastik deformasyona uğrama kabiliyetine sahip olduğundan dolayı mükemmel darbe enerjisi sönümlene yeteneğine sahiptir (Yang ve Chen, 2001; Nikolov ve ark., 2006). Bundan dolayı polimer malzemeler yüksek darbe dayanımının olmasının istendiği otomotiv, havacılık, medikal, uzay ve askeri alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimerlerin sahip olduğu yalıtkanlık, kimyasal ve atmosferik koşullara dirençli olmaları darbe sönümlene kabiliyetlerine ek malzeme özellikleri olarak bu malzemelerin kullanımlarını daha da fazla yaygınlaştırmaktadır. Polimerik köpükler, darbe ve patlama yüklemeye koşullarının baskın olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Liu ve ark., 2005; Ousji ve ark., 2017; Sun ve Li, 2018). Polimerler, doğada organik olarak bulunması yanında, sentezleme yöntemi ile de üretimi yapılmaktadır.

Polimer Yunanca poli "çok", meros "parça"; çok parçalı anlamında, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi monomer denilen küçük moleküllerin birbirlerine tekrarlar halinde bağlanmasıyla oluşan çok uzun zincirli moleküllerdir. Polimerler molekül yapılarına bağlı olarak termoplastik, termoset ve elastomer olmak üzere 3 ayrı kategoride değerlendirilmektedir.

Polimerler, monomerlerin kimyasal reaksiyonu ile elde edilir. Doğada bu işlem doğal polimerlerin oluşumuyla sonuçlanırken, sentetik polimerler ise insan tarafından yapılmaktadır. Polimerler, en başından beri (örneğin selüloz, nişasta ve doğal kauçuk) çevremizde doğal olarak bulunmaktadır. İnsan yapımı polimerik malzemeler on

dokuzuncu yüzyılın ortalarından beri incelenmekle birlikte günümüzde polimer endüstrisi hızla gelişmektedir.



Şekil 1.1. Polimer malzemelere ait şematik zincir çizimi

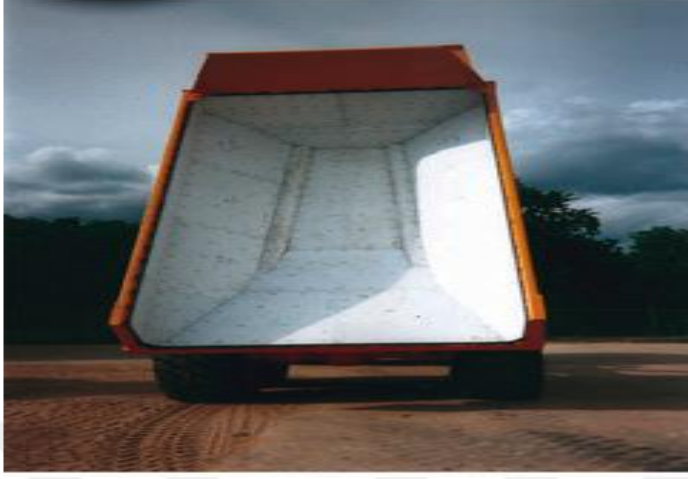
Metaller ile kıyaslandığında polimer malzemelerin yükleme altında mekanik davranışları oldukça karmaşıktır. Polimerlerin elastik (elastisite modülü) ve plastik (akma noktası, kopma gerilmesi) malzeme özellikleri gerinim oranına (Bauwens-Crowet, 1973; Alcock ve ark., 1976; Galeski, 2003; Richeton ve ark., 2007; Diani ve Gall, 2006; Mulliken ve Boyce, 2006; Richeton ve ark., 2006; Chester, 2011; Jatin ve ark., 2014; Daniel ve ark., 2018; Manaia ve ark., 2020), sıcaklığa (Deplancke ve ark., 2019) ve hidrostatik basınca (Ryu ve ark., 2015; Pulungan ve ark., 2018) bağlı olarak ciddi şekilde değişmektedir. İlave olarak zincirlerin dağılımına bağlı olarak polimer malzemelerin çekme, basma ve kayma yükleri altında mekanik davranışları da değişkenlik göstermektedir (Ryu ve ark., 2015; Pulungan ve ark., 2018). Çeşitli polimerler üzerinde değişik gerinim oranlarında gerçekleştirilen çekme ya da basma deney verilerine bağlı olarak polimerlerin malzeme davranışlarını modellemek için birçok malzeme modeli geliştirilmeye çalışılmıştır (Eyring, 1936; J. Roetling, 1965; Haward ve Thackray, 1968; Bauwens J.c. ve ark., 1969; Argon, 1973; Boyce ve ark., 1988, 2000; Arruda ve Boyce, 1991; Arruda ve ark., 1995). Fakat bu malzeme modelleri çekme ya da basma deney verileri kullanılarak geliştirildiği için bu malzemelerin çok eksenli yüklemeler altındaki gerçek malzeme davranışlarını yakalayamamaktadır (Arruda ve Boyce, 1991; Arruda ve ark., 1995; Boyce ve ark., 2000). Polimer malzemelerin sadece çekme ya da basma altındaki malzeme davranışlarını belirlemek bu malzemelerin çok eksenli (3 nokta eğme, darbe vb.) yükler altındaki gerçek davranışlarını belirlemek için yeterli değildir. Bunun arkasında yatan temel neden çok eksenli yüklemeler altında malzeme üzerinde meydana gelen

bütünleşik çekme, basma ve kayma gerilmelerinin aynı anda oluşmasıdır. Ve bu malzeme modellerinin sadece belli bir yükleme koşullarına bağlı olarak geliştirilmesi çok eksenli yükler altında polimerlerin mekanik davranışlarını belirleyebilme noktasında zorluklar göstermektedir. Bundan dolayı bu malzemelerin gerçek davranışlarını belirleyebilmek için daha karmaşık ve ileri malzeme modellerine ihtiyaç vardır (Hossain ve ark., 2014; Du ve ark., 2020; Serdeczny ve ark., 2020).

Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE)

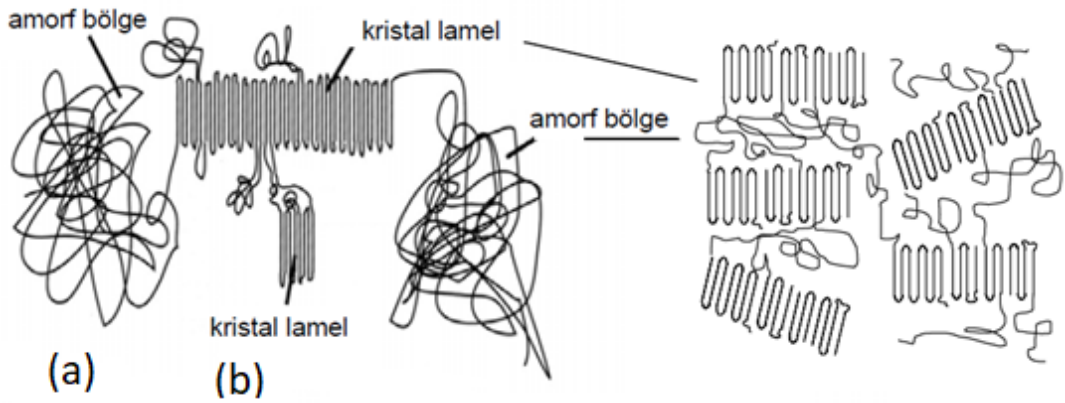
UHMWPE (ultra high molecular weight polyethylene), mükemmel aşınma direnci, kendi kendine yağlama özelliği, yorulma direnci, darbe direnci, yüksek kimyasal kararlılık, düşük sıcaklık direnci ve biyouyumluluk gibi olağanüstü fiziksel ve mekanik özelliklere sahip yarı kristal yapıda olan bir mühendislik termoplastik polimeridir (Fouad, 2010; Lucas ve ark., 2011; Kurtz, 2015). Termoplastiklerde yapısal olarak önce amorf bölgeler açılır ve ardından kristal alanlar döndürülür ve ayrılır. Termoplastik malzemelerin yapısında bulunan zincirlerin yükleme altında birbirlerine göre kayma kabiliyetlerinin olmasından dolayı bu malzemeler kopma olmadan büyük plastik deformasyonlara maruz kalabilirler (Roesler ve ark., 2006). Zaman içerisinde yarı kristal yapıya sahip UHMWPE'nin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi yapısal ve elektronik uygulamalarında kullanımının önünü açmış ve hızlandırmıştır. Yarı kristal polimerler, ticari olarak temin edilebilen materyallerde kristallik yüzdesinin % 10 ila % 90 arasında değiştiği hem amorf hem de kristalin alanlardan oluşur (Van Dommelen ve ark., 2003). Ayrıca, polimer kristallerin birbirine dolaşık zincir yapısı, kristal alanların rastgele plastik deformasyonları barındırma kabiliyetini sınırlar. Bu nedenle, empoze edilen deformasyona yanıt vermede amorf ve kristal alanlar arasındaki etkileşim yarı kristal polimerin genel makroskopik mekanik davranışının belirlenmesinin arkasında yatan temel nedendir. Termoplastikler ısıtıldıklarında yumuşayan, soğutulduklarında tekrar sertleşen plastik grubu olarak adlandırılabilir. Bu olay termoplastikler için tekrar edilebilir bir özelliktir. Bu şekillendirme esnasında hiçbir kimyasal değişime uğramazlar. Bu da geri dönüştürülebilir olma özelliğine işaret ettiğinden dolayı çevre koruma açısından özel bir anlam taşır. Münferit türleri birbirleri ile karıştırılmazlarsa, termoplastikler yeniden kazanım için mükemmel uygunluktadırlar. Şekil 1.2'de UHMWPE'nin uygulama

alanlarından birinde damperli bir kamyon kasası içinin kaplama elemanı olarak kullanıldığı gösterilmektedir.



Şekil 1.2. UHMWPE kaplı toplayıcı damperli kamyon (Kurtz, 2015)

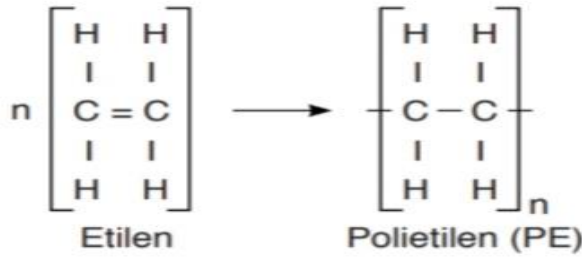
Diğer termoplastiklerde olduğu gibi UHMWPE’de polimerizasyon adı verilen kimyasal işlemle elde edilirler. Zincir içinde kovalent, zincirler arasında zayıf Van der Waals bağlara sahiptir (Dixit ve ark., 2016). Yüksek sıcaklıklarda zincirler arası bağlar zayıflar. Pek çok termoplastik polimerler lineer polimer şeklindedir. Termoplastikler kendi aralarında amorf ve yarı kristal termoplastikler olmak üzere iki ayrı kısımda incelenir. Termoplastikler sentetik polimerlerin büyük bir kısmını oluşturmaktadır.



Şekil 1.3. UHMWPE’nin zincir yapısı (a) amorf ve (b) kristal bölgeler(Beşergil, 2020)

Polietilen (PE), günlük hayatımızda ve sanayide en çok kullanılan termoplastiktir. Şekil 1.3’de gösterildiği gibi polimer zincir yapılarında yarı kristal zincir yapısına sahip olmuş olsa da biraz da amorf yapı mevcuttur. Şekil 1.4’de etilen ve polietilenin

sahip olduğu kimyasal bileşenleri gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere polietilen kimyasal bileşeninde 2 adet karbon ve 4 adet hidrojen bulunmaktadır. Kimyasal gösterimi C₂H₄'tür. Her bir karbon atomuna 2 adet hidrojen bağlanması ile oluşan 2 adet CH₂ atomunun birleşmesi ile etilen meydana gelir. Polietilen ilk olarak 1899'da Alman kimyager Hans von Pechmann tarafından diazometanı araştırırken kazayla sentezlenmiştir. Endüstriyel olarak ilk polietilen sentezi 1933 yılında, yine kazayla Eric Fawcett ve Reginald Gibson tarafından Northwich, İngiltere'de bulunan Imperial Chemical Industries (ICI)'de keşfedilmiştir. Etilen kullanılarak polietilen üretilir. Plastik endüstrisinde genelde ticari adı kısaca PE olarak kullanılır.



Şekil 1.4. Etilen ve polietilen kimyasal yapısı

2017 itibarıyla, yıllık 100 milyon tondan fazla polietilen reçinesi üretilmektedir; bu dünya genelindeki plastik pazarının %34'ünü teşkil etmektedir (Geyer ve ark., 2017). Düşük bir dayanıma ve sertliğe sahiptir. Yani metallerde olduğu gibi yüksek çekme mukavemetleri bu tip malzemelerde görülmez. Düşük çekme dayanımı ayrıca, düşük sertlik anlamına da gelmektedir. Ancak; yüksek bir darbe dayanımına sahiptir. Yani, gevrek kırılma göstermezler. Güneş ışığına maruz kaldıklarında yapılarındaki bozulmalar neticesinde kırılma özelliği göstermeye başlarlar. Bu malzemelerin statik yükler altında dayanımları iyidir. Ortalama 120-130 °C'den sonra endüstride yapısal eleman olarak kullanılamayacak kadar yumuşamaya başlarlar. Metallerdeki gibi korozyona uğramaması, sünek bir yapısının olması gibi tercih nedeni olabilecek karakteristiklere sahiptir. Ancak, sıcaklıklar yükseldiğinde dayanımı düşer, çok yumuşak hale gelir ve kullanılma potansiyeli ortadan kalkar. Kolay kaynak edilebilme, iyi bir talaşlı imalat özelliği vardır. Nemli işlerde kullanılabilir. Neme dayanıklıdır. Özellikle, sıvı maddelerin ambalajlanmasında kullanılmaktadır.

Farklı moleküler ağırlıkları ve farklı zincir yapıları ile sentezlenmiş birkaç çeşit polietilen vardır. Bu polietilen türleri, dallanmış ve lineer zincir yapısına sahiptirler, her birinin molekül ağırlığı genellikle 50.000 g/mol den düşüktür. Bu çeşitler;

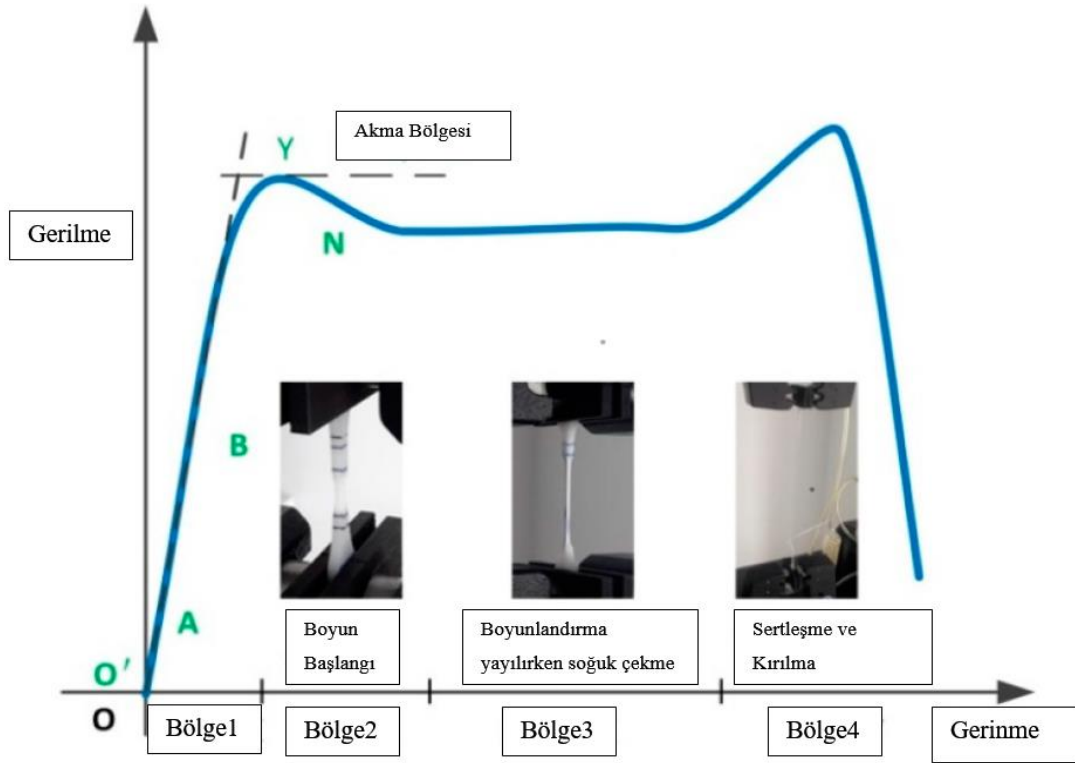
1. UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene/Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen)
2. HDPE (High Density Polyethylene/Yüksek Yoğunluklu Polietilen)
3. MDPE (Medium-Density Polyethylene/Orta Yoğunluklu Polietilen)
4. LDPE (Low-Density Polyethylenedüşük Yoğunluklu Polietilen)
5. LLDPE (Linear Low Density Polyethylene/Lineer Bağlı Düşük Yoğunluklu Polietilen)
6. VLDPE (Very Low Density Polyethylene/Çok Düşük Yoğunluklu Polietilen) dir.

UHMWPE' nin ticari olarak polimerizasyonu 1950'lerde Ruhrchemie AG tarafından gerçekleştirilmiştir. Daha sonraları çeşitli firmalar tarafından toz, levha, çubuk ve fiber ürünler pazarlanmaya başlamıştır. UHMWPE değişik molekül ağırlıklarına göre üretilmekte ve bu molekül ağırlıklarına göre mekanik özellikleri değişmektedir. Tablo 1.1 'de 106 gr/mol molekül ağırlığına sahip UHMWPE'nin mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 1.1. UHMWPE'nin Mekanik Özellikleri (Edidin ve Kurtz, 2000)

Özellik	
Moleküler Ağırlık (106 gr/mol)	3.5-7.5
Erime Sıcaklığı (°C)	132-138
Poisson Oranı	0.46
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	0.925-0.945
Çekme Elastik Modülü (GPa)	0.5-0.8
Çekme Mukavemeti (MPa)	21-28
Nihai Gerilme Dayanımı (Mpa)	39-48
Uzama (%)	350-525
Darbe Dayanımı, Izod (J/m çentik:3.125 mm kalınlıkta numune)	>1070 kırılma yok
Kristalize Derecesi	39-75

Moleküller arasındaki Van der Waals kuvvetleri oldukça zayıftır (Dixit ve ark., 2016), ancak moleküller çok uzun olduğundan molekülden moleküle büyük kayma kuvvetli taşınır. Her bir zincir diğerlerine çok miktarda Van der Waals kuvvetiyle bağlandığından tüm moleküller arası kuvvet çok yüksek olur. UHMWPE birçok uygulamada borular, paneller, çubuklar, mekikler, dişliler, yapay kemikler, vücut zırhı gibi çeşitli ürünleri imal etmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, UHMWPE' nin çok yüksek erime viskozitesi ile sonuçlanan yüksek moleküler ağırlığı nedeniyle, enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel eriyik işlemleriyle üretim yapılması zordur (Yang ve ark., 2010; Liang ve ark., 2014). UHMWPE' nin çekme altındaki mekanik davranışı karmaşık bir yapıya sahip olmakla birlikte, davranış şeklini Şekil 1.5'de olduğu gibi 4 ayrı bölgeye ayırmak mümkündür (Peterlin, 1971; Official ve ark., 1975; Mortensen, 2007; Yang ve ark., 2010; Liang ve ark., 2014).



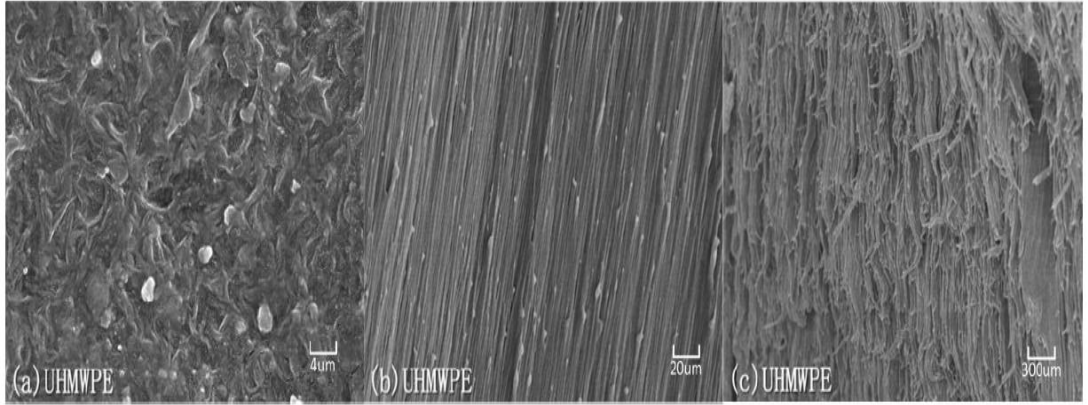
Şekil 1.5. UHMWPE' nin çekme altındaki tipik mühendislik eğrisi (Xu ve ark., 2016)

Şekil 1.5'de görüldüğü gibi sırayla lineer elastik, gerinim yumuşaması ya da boyun verme başlangıcı, boyun verme devam ederken soğuk çekme sertleşmesi ve son olarak ta sertleşme kopma bölgelerinden oluşmaktadır. Birinci bölgede UHMWPE lineer elastik deformasyona maruz kalmaktadır. Bu doğrusal bölge genellikle çok küçüktür.

Bu bölge aslında kristalin faza kısmen paralel olarak sınırlı amorf fazın uzamasına karşılık geldiği bölgedir. İkinci bölgede ise kristal lamellerin küresel kutuplarda parçalanmasına karşılık gelir ve bu da malzemenin doğrusal olmayan bir davranışına yol açar (Peterlin, 1971; Defebvin ve ark., 2016). Bu aşamada, akma noktası, kristal lamellerin parçalanması, sferülitlerin ekvator bölgelerine ulaştığında ortaya çıkar ve bu da, sınırlı amorf faz ile birbirine bağlanan büyük ölçüde yayılmış kristal blok yapılarına yol açar. Bu aşamanın başlangıcında, kristalin lameller ile ilgili gerilime katkısı artık etkili değildir; ancak kristal ağ gerilimi, amorf sınırlı fazın katkısı sayesinde artmaya devam etmektedir (Bartczak, 2018). Üçüncü aşama boyunca, kristalin lamel blokları gerilme yönünde hizalanmak için dönerler (Defebvin ve ark., 2016). Kutuptan başlayıp ekvator bölgelerine doğru ilerleyen kristal bloklar, kristalin lamellerden zincirlerin çıkarılmasını içeren fibrilasyon işlemine tabi tutulur (Peterlin, 1971). Bu nedenle, önceden kristalin lamellerin bir parçası olan katlanmış zincirler, sınırlı amorf fazın uzunluğunu artırarak amorf hale gelir. Fibrilasyon süreci nedeniyle kristal oranının düşmesi gerekir. Bununla birlikte, zincirlerin içindeki güçlü yönelimden kaynaklanır. Yükleme yönünde fibriller, fibriller içinde yeni kristalin alanların oluşumu meydana gelir. Ardışık fibrilasyon-yeniden kristalleştirme adımları nedeniyle, zincir çözülmesi gecikir. Son olarak, fibriller son aşamaya karşılık gelen maksimum uzamalarına ulaştığında, zincirlerin kilitleme olayı meydana gelir ve gerilimi büyük ölçüde artırır (Defebvin ve ark., 2016). Üçüncü Aşama sırasında Fibrilasyon süreci ve üçüncü ve dördüncü aşamalar sırasında yeniden kristalleştirme birleşimi nedeniyle, kristal oranının tüm deformasyon sırasında neredeyse sabit kaldığı görülmektedir (Wang ve ark., 2017). Bununla birlikte, kristal oranı önemli ölçüde olmasa da değişim geçirdikçe, kristal alanların rolü ve boyutu tüm deformasyon süreci boyunca büyük ölçüde değişir.

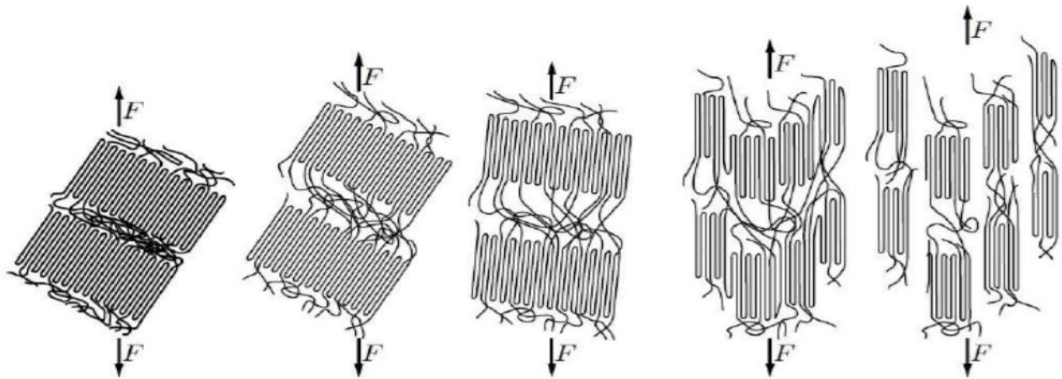
Polimerlerin bu karmaşık mekanik davranışının modellenmesinde, bu tür etkilerin dikkate alınması gerekmektedir. Polimer malzemelerin yükler altındaki deformasyon mekanizmalarını anlamak amacıyla yukarıda bahsedilen polimerlerin yükleme altındaki moleküler bazda değişimlerini göz önünde bulundurarak teorik ve sayısal malzeme modelleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu malzeme modelleri genellikle polimer malzeme üzerinde gerçekleştirilen çekme ya da basma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Eyring, 1936; J. . Roetling, 1965;

Haward ve Thackray, 1968; Bauwens JC ve ark., 1969; Argon, 1973; Boyce ve ark., 1988, 2000; Arruda ve Boyce, 1991; Arruda ve ark., 1995; Anand ve Gurtin, 2003; Richeton ve ark., 2006). Bu teorilere dayanarak, yarı kristalin polimerler için üç boyutlu kurucu modeller geliştirilmiştir (Nikolov ve ark., 2002; Drozdov ve Christiansen, 2008; Ayoub ve ark., 2010; Bartczak ve Galeski, 2010; Popa ve ark., 2014; Garcia-Gonzalez ve ark., 2017; van Dommelen ve ark., 2017).



Şekil 1.6. Plastik deformasyon altında UHMWPE' nin elektron mikrografi ile mikro yapısının değişimi: (a) $\epsilon=0$ (b) $\epsilon=1$ (c) $\epsilon=6,6$ (Xu ve ark., 2016)

Şekil 1.6'da UHMWPE malzemesine ait çekme sırasında liflerin hareketi ve deforme olma aşamaları görülmektedir. Şekil 1.7'de görüldüğü gibi önce amorf bölgeler açılır ve ardından kristal alanlar döndürülür ve ayrılır. Termoplastikler büyük plastik deformasyonlar alabilir çünkü zincirler birbirine göre kayabilir. Bu şekilde lamellerin uzaması ve kopması şekil değişimine bağlı olarak görülmektedir.



Şekil 1.7. Çekme yükü altında deformasyon oluşum aşaması (Sælen, 2012)

2 LİTERATÜR ÖZETLERİ

Yarı kristal polimerler malzemelerin mekanik davranışları tam olarak doğrusal değildir ve çok karmaşıktır. Genellikle bu malzemelerin mekanik özellikleri sıcaklık, gerinim hızı ve hidrostatik basıncın fonksiyonları olarak çok ciddi değişiklikler göstermektedirler. Yapıları, karmaşık bir şekilde birbirine bağlanmış hem amorf hem de kristal fazlardan oluşur (Bkz. Şekil 1.3). Polimerik malzemelerin farklı yükleme koşulları altındaki davranışını anlamaya ve belirleme adına birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda polimerlerin viskoelastik ve viskoplastik deformasyon davranışını yakalamak için modeller geliştirilmeye çalışılmıştır. Sorunun karmaşıklığından ve yerel deformasyon mekanizmalarının ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasından dolayı, araştırmacılar tarafından değişik modeller geliştirilmeye çalışılmıştır. Polimerik malzemelerden yapılacak ürünleri tasarlarırken karşılaşılan zorluk, uzun vadede performans tahminidir, yani deformasyon miktarını önceden, yani tasarım aşamasında doğru bir şekilde belirlemektir. Yarı kristal bir polimerdeki kristallik derecesi de (boyutu ve dağılımı) bu malzemelerin elastisite modülü, akma gerilmesi ve çekme gerilmesi gibi mekanik özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Polimer davranışları söz konusu olduğunda, oldukça tatmin edici ve öngörücü sonuçlar veren fiziksel tabanlı modellerde hem camsı hem de kavuçuksu durumlar dikkate alınarak modeller üzerinde çalışılmalar yapılmıştır. Bu tür malzemeler için geliştirilen malzeme modelleri içerisinde Haward ve Thackray'nin(Haward ve Thackray, 1968) geliştirmiş olduğu bir boyutlu elastik viskoplastik malzeme modeli geliştirilen ilk gerçek model olarak karşımıza çıkmakta ve bu model daha sonra bu alanda çalışan araştırmacılar için daha ileri ve tutarlı malzeme modelleri geliştirebilme adına ilham kaynağı olmuştur. Genellikle yapılan bu çalışmalarda ilklerden olan Haward ve Thackray ve Boyce ve Arruda'nın çalışmalarından ilham alınmaktadır (Haward ve Thackray, 1968; Xue ve ark., 1998; Boyce ve ark., 2000).

Moleküler yaklaşıma bağlı olarak geliştirilen ilk malzeme modelleri genellikle termoplastiklerin değişik gerinim hızlarında ve sıcaklıklarda akma gerilme değerlerinin belirlenmesi noktasında yoğunlaşmıştır. Bunun ötesinde çekme ve basma testlerinden elde edilen gerinme-gerilme diyagramlarından anlaşılan gerinim yumuşaması (ani gerilim düşüşü) ve onu takip eden gerinim sertleşmesi (gerilimde yükselme) gibi malzeme özelliklerini modelleme noktasında çalışmalar yapılmıştır.

Bu ilginin sonucu olarak termoplastiklerin şekil değiştirme hızı ve sıcaklığa bağlı malzeme davranışının modellenmesine yönelik yapılan ilk alışma Eyring tarafından yapılmıştır (Eyring, 1936). Eyring'in teorisine göre bir molekülün enerji bariyerinin plastik akışla veya zincirlerin ilk konumunda değişikliğin, malzemeye uygulanan kayma gerilimi nedeniyle aşılarak belirli bir durumdan veya potansiyel enerjiden diğerine geçiş yapmasıdır. Temel olarak Eyring burada oluşan plastik akışın tek aşamalı termal olarak aktive edilen bir süreç yoluyla gerçekleştiğini ne sürmektedir. Devam eden çalışmalarda Roetling (1965) PMMA (Polimetil metakrilat) zerinde 30 °C ile 90 °C arasında değişen sıcaklıklarda ve 10^{-5} s^{-1} ile 10 s^{-1} arasında değişen gerinim oranlarında tek eksenli çekme testleri gerçekleştirmiştir ve elde ettiği deneysel verilerini Eyring modelini kullanarak elde etmiş olduğu verilerle karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda Eyring'in geliştirmiş olduğu modelin PMMA'nın gerinim hızına bağlı akma davranışını yakalayamadığını ortaya koymuştur. Diğer bir ifadeyle gerinim oranına bağlı akma noktalarını yakalamak için Eyring tarafından öne sürülen ve tek aşamalı termal aktivite prosesine dayanan yaklaşımının yeterli olmadığını ortaya koymuştur. Roetling'e ek olarak, PC (Polikarbonat) (Bauwens-Crowet, Bauwens, ve Homes 1972; Bauwens 1972), PVC (Polivinil klorür) (Bauwens JC, Bauwens-CROWET C, and Homes G 1969) ve PMMA (J. A. Roetling, 1965) gibi çeşitli termoplastikler üzerinde yapılan çalışmalarda da benzer bilgiler bulunmaktadır. Bauwens ve ekibi (Bauwens-Crowet ve ark., 1972), 10^{-5} s^{-1} ile 1 s^{-1} arasında değişen farklı gerinim oranlarında PVC ve PS (Polistiren) zerinde yapılan tek eksenli gerilim testlerinden elde edilen deneysel verilere dayanarak Eyring'in yapısal malzeme modelini yeniden düzenlemişlerdir. Robertson (1965), moleküller arası kuvvetlere dayanarak, uygulanan bir kayma geriliminin neden olduğu gerçek yapısal değişiklikleri hesaba katmış ve iki farklı termoplastiğin (PS ve PMMA) gerinim hızına bağlı olarak akma davranışını hesaplamıştır. Model tahminleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında oluşturulan modelin başarılı olmadığı anlaşılmıştır.

Haward ve Thackray (Haward ve Thackray, 1968) termoplastiklerin deformasyon mekanizmasını doğrusal elastik direnç, viskoz akış ve kauçuk esnekliği gibi iki farklı aşama içerisinde değerlendirmiştir. Oluşturulan bu modelde, ilk elastik direncin hesaplanması için lineer Hooke yay, sıcaklığa ve gerinim oranına bağlı akma gerilmelerini tanımlamak için doğrusal olmayan Eyring sönümleyici ve bunları takip

eden gerinim sertleşmesini yakalayabilmek için de doğrusal olmayan Langevin yayı(Toda, 1958) kullanılmıştır. Buradan anlaşılacağı gibi bu model ilk gerinim sertleşmesi ve gerinim yumuşaması gibi termoplastiklerde gözlemlenen önemli malzeme davranışlarının yanında hidrostatik basınçtan kaynaklanan çekme ve basma altındaki değişik malzeme davranışlarını göz önünde bulundurmamasına rağmen daha sonra bu tür malzemeler için model geliştirmeye çalışan araştırmacılar için bu model mihenk taşı hükmündedir. Duckett, termoplastiklerin basınç etki ve gerinim oranına bağlı etkisini göz önünde bulundurarak Robertson'ın teorisini genişletti ve modeli, Robertson'un moleküler akma teorisinin, hidrostatik basıncın ve sıcaklığın ortak bir biçimcilik içinde tartışılmasına izin veren bir modifikasyonu olarak sundu (Duckett ve ark., 1970). Robertson gibi yüksek gerinim oranları dışında PMMA'nın akma davranışını başarılı bir şekilde de tahmin etti. Truss, Clarke, Duckett ve Ward mekanik testlerini yarı kristal yapıya sahip termoplastikler üzerinde gerçekleştirmelerine rağmen amorf yapıya sahip polimerlerin akma davranışlarının anlaşılması noktasında önemli katkılarda bulundular (Truss ve ark., 1984). Kapsamlı çalışmalarını ile polietilendeki akma hızının, sıcaklığa ve basınca bağımlılığını inceledi. Yapmış oldukları çalışmalar genellikle polietilen malzemenin sıcaklığa ve basınca bağlı akma dayanımlarının incelenmesi ve modellenmesi ile alakalıdır. Foot, Truss, Ward ve Duckett devam eden çalışmalarında amorf yapıya sahip PET (Polietilen Teraftalat) termoplastik malzemesinin sıcaklığa bağlı olarak akma noktalarının nasıl değiştiğini ortaya çıkarmak için testler yapmışlar (Foot ve ark., 1987).

Diğer araştırmacılardan farklı olarak Argon, Haward ve Thackray tarafından termoplastik malzemeler için geliştirilen modelini genişletmiş ve bu modelde kullanılan doğrusal olmayan Eyring sönümleyicisini kendi tanımlamış olduğu model ile birleştirerek yeni bir model önermiştir (Argon, 1973). Burada Haward ve Thackray'nin modelinden farklı olarak Argon hidrostatik basınç etkisini hesaplamalarına dahil etmiştir. Argon'un teorisi, kayma modülünün sıcaklık ve basınca bağımlılığı yoluyla dolaylı olarak hem sıcaklığa hem de basınca bağlı olan plastik akışa karşı bir engelin kayma direnci varlığını öne sürdü. Yani, herhangi bir termal hareket veya termal aktivasyon olmadığında kayma direnci, plastik deformasyon meydana geldikçe, makro moleküler yapının, plastik akışa moleküller arası enerji bariyerini aşacak şekilde yeniden düzenlendiği düşünülmektedir. Argon

geliştirmiş olduğu PS, PMMA, PET malzemeler üzerinde yapmış olduğu mekanik testlerden elde etmiş olduğu deneysel verilerle karşılaştırarak doğrulamıştır. Fakat burada altının önemle çizilmesi gereken nokta Argon'un bu mekanik testleri düşük gerinim oranları altında gerçekleştirmiş olduğu gerçeğidir ve buda yüksek gerinim oranlarında bu tür malzemelerin malzeme davranışlarının belirlenmesini ne kadar önemli olduğu noktasında daha sonra gelen araştırmacıların dikkatlerini bu alana çevirmeye yol açmıştır.

Haward-Thackray ve Argon'un bu amaçla gerinim hızı, sıcaklık, basınç, gerinim yumuşaması ve gerinim sertleşmesi de dahil olmak üzere tüm malzeme karakteristiklerini dikkate alan güvenilir yapısal malzeme modelleri geliştirme noktasında büyük çabalar gösterilmiştir. Bu çalışmalar içerisinde en fazla ön plana çıkan ve termoplastik malzemelerin mekaniksel davranışlarını moleküler yapı ve mikro moleküler plastik akış gibi iki kısma ayırarak modellemeye çalışan ve hali hazırda akademi dünyası tarafından kabul gören Mary Boyce tarafından geliştirilen modeldir. Bu modelin termoplastik malzemelerde gözlemlenen elastik tepki, akma gerilmesi, gerinim yumuşaması ve gerinim yumuşamasını takip eden gerinim sertleşmesi gibi malzeme özelliklerini istenilen seviyede yakaladığı ortaya konmuştur (Mary C. Boyce, 1986; Boyce ve ark., 1988). Daha sonrasında Argon'un geliştirmiş olduğu model, Boyce tarafından geliştirilmiş ve yine kendisi tarafından geliştirilen bir önceki modeli ile birleştirilmiştir. Bu model günümüzde BPA (Boyce-Parks-Argon) modeli olarak bilinmekte ve daha sonra gelen araştırmacılar yapmış oldukları çalışmaları bu model üzerine inşa etmişlerdir. Geliştirilen bu model daha önce geliştirilen modeller ile kıyaslandığında büyük deformasyonlara maruz kalan termoplastiklerin hız sıcaklık ve basınca bağlı malzeme davranış değişimlerini ve ayrıca gerinme yumuşama olgusunu daha iyi tanımlayabildiği gözlemlenmiştir. İlerleyen yıllarda Arruda ve Boyce tarafından gerinim yumuşamasını takip eden gerinim sertleşme bölgesi daha iyi yakalayabilmek için ve daha önce Argon tarafından gerçekleştirilen modeli geliştirerek 8 zincirli kauçuk esnekliği kavramını öne sürmüşlerdir (Arruda ve Boyce, 1993). Kauçuk esnekliği için önerilen 8 zincirli ağ modelinin daha önce geliştirilen modellere göre gerinim sertleşme bölgesini daha iyi tanımlayabildiği yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılmıştır. Buna rağmen bu BPA modelinde karşılaşılan en büyük sorun gerinim yumuşaması bölgesinin tam

olarak tanımlanamaması ve tam olarak tanımlanamayan gerinim yumuşaması özelliğinin daha sonradan gelen gerinim sertleşmesi davranışının da tam olarak belirlenememesine yol açmaktadır. Bu modelde karşılaşılan problemi ortadan kaldırmak için Anand geliştirmiş olduğu modelinde iki dahili durum değişkeni tanımlamış ve geliştirmiş olduğu modelin gerinim yumuşaması ve gerinim yumuşamasını takip eden gerinim sertleşmesi bölgelerini yüksek doğrulukta tanımlayabildiğini yapmış olduğu çalışmalar sonucunda ortaya çıkarmıştır (Anand ve Gurtin, 2003). Burada gerinim yumuşamasının üzerinde hassasiyetle durulmasının nedeni yüklenme esnasında bu bölgenin malzeme üzerinde yerel plastik deformasyonlara maruz kaldığını ve yerel malzeme özelliklerinde değişikliklerin meydana gelmeye başladığını göstergesi olmasıdır. Bu nedenle gerinim yumuşama bölgesinin teorik olarak tanımlanabilmesi UHMWPE gibi malzemelerin herhangi bir yüke maruz kaldığında göstermiş olduğu mekaniksel davranışlarının doğru olarak belirlenebilmesi için çok büyük önem arz etmektedir (Dundar, 2017). Daha sonrasında BPA ve Anand'ın geliştirmiş olduğu malzeme modellerini kendilerine esas alarak termoplastik malzemeler için daha ileri ve tutarlı malzeme modelleri geliştirilmeye çalışılmıştır (Mulliken ve Boyce, 2006; Richeton ve ark., 2007).

Yukarıda detaylı bir şekilde anlatılan malzeme modelleri incelendiğinde bu modellerin değişik hızlar altında gerçekleştirilen çekme ve basma test verilerine dayanarak geliştirildiği anlaşılmaktadır. Fakat UHMWPE ve benzeri polimer malzemeler gerçek dünyada kullanıldıkları uygulamalarda genellikle değişik hızlar altında çekme basma ve kayma gerilmelerinin aynı anda olduğu çok eksenli eğilme ve darbe gibi mekanik yüklere maruz kalmaktadırlar. Bu malzemelerin eğilme ve darbe gibi çok eksenli yüklemeler altında mekanik davranışlarının belirlenebilmesi için günümüze kadar geliştirilen malzeme modellerinin eksik kaldığı gerçekliği karşımıza çıkmaktadır. Bu gerçeklik araştırmacıları bu malzemelerin çok eksenli yükler altındaki nümerik analizde yarı deneysel malzeme modellerini kullanma eğilimine itmiştir. Değişik mühendislik programlarında (Abaqus, LS-DYNA) polimer için çok sayıda malzeme modeli bulunmasına rağmen bu malzeme modellerinden sadece bir kaçını yine yukarıda derinlemesine anlatılan ve polimer malzemelerde gözlemlenen karmaşık mekaniksel davranışlarını yakalayabilme kabiliyetine sahiptirler. Bu yüzden mühendislik programlarında özellikle termoplastik malzemelerin çok eksenli yükler altında

nümerik analizleri yapılmadan önce hangi malzeme modelinin kullanılması gerektiğine dair yeterli bilgiye sahip olmak bir zorunluluktur. Yukarıda bahsedilen karmaşık malzeme davranışı ifadesi, bu malzemelerin mekanik davranışlarının sıcaklık, gerinim oranı ve hidrostatik basınca bağlı olmasının yanında, gerinim yumuşaması ve gerinim sertleşmesi gibi davranışlarının olduğunun yansıtmasıdır. Nümerik analizlerde malzeme modeli seçilirken bu özelliklerin göz önünde bulundurulması nümerik analiz sonuçlarının doğruluğunu doğrudan etkilemektedir.

UHMWPE gibi yarı kristal yapıya sahip polietilen malzemelerin geniş uygulamaları göz önüne alındığında, gerçek dünyada uygulama alanlarında kuvvet taşıyan yapısal bileşenler olarak kullanıldığından dolayı bu malzemelerin statik ve dinamik davranışlarının ilk önce deneysel olarak belirlenmesi ve daha sonra nümerik olarak belirlenmesi sağlam bir tasarım için gerekmektedir. Yarı kristalli polimerler düşünüldüğünde hem fenomenolojik (Dusunceli ve Colak, 2008; Regrain ve ark., 2009; Drozdov ve De Christiansen, 2011; Maurel-Pantel ve ark., 2015) hem de mikro makro yaklaşımlara dayalı malzeme modelleri (Van Dommelen ve ark., 2003; Gueguen ve ark., 2010; Sedighiamiri ve ark., 2014) geliştirilmiş ve önerilmiştir. Uzun yıllardır, yarı kristal polimerlerin plastik akış davranışları üzerine G'Sell, Kitagawa, Argon ve diğerleri tarafından (G'Sell, Boni ve Shrivastava, 1983; Galeski *vd.*, 1992; Kitagawa, Onoda ve Mizutani, 1992; Katagiri *vd.*, 1993; G'sell ve Dahoun, 1994; (Boyce ve ark., 1988) yapılan kapsamlı araştırmalar, gerçek gerilme-gerinim eğrisinin akma davranışı, gerçek gerinim sertleşmesi ve kristal dokuda stres kaynaklı dönüşümlerin belirlenmesi üzerinde çalışmaları olmuştur. Büyük deformasyonlara maruz kalan UHMWPE' nin mekanik davranışlarının tam olarak karakterize edebilmek için değişik hızlar altında çekme ve basma testleri yapılarak ve bu testlerden elde edilen verilerden bahsi geçen testlere karşılık gerçek gerilme ve gerçek gerinim eğrilerinin hesaplanması mekanik karakterizasyon noktasında derinlemesine bilgiye sahip olabilmek için hayati önem taşımaktadır. Gerçek gerilme-gerinim eğrisinin şekline ek olarak, UHMWPE' nin akma ve plastik bölgedeki davranışını teorik tanımlayabilmek ve nümerik olarak doğrulamak büyük bir öneme sahiptir. Daha yakın zamanlarda, hem akma hem de gerinim sertleşmesi davranışlarını belirlemek için gerçek yapısal değişiklikleri göz önünde bulundurarak mekaniksel modellerde önerilmiştir (Senden ve ark., 2010).

UHMWPE'nin geniş kapsamlı olarak kullanıldığı alanlardan bir tanesi biyomedikal alanıdır ve bu uygulama alanında UHMWPE çok eksenli gerilmelere maruz kalmaktadır ve bu çok eksenli gerilme durumlarında sergilemiş oldukları malzeme davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi (FEM) bağlamında doğru bir şekilde belirleyebilmek için önemli araştırmalar yapılmıştır.

Bu zaman kadar UHMWPE üzerinden çekme basma ve çok eksenli yüklemeler altında mekanik testler gerçekleştirilmiş ve bu gerçekleştirilen mekanik test verileri çeşitli malzeme modelleri kullanılarak sonlu elemanlar bağlamında yeniden elde edilmeye çalışılmıştır. Bu kullanılan malzeme modelleri içerisinde monotonik yüklemeler için elastik mükemmel plastik malzeme modeli önerilmiş ve kullanılmıştır (Teoh ve ark., 2002). Fakat bu kullanılan malzeme modelinin sonlu elemanlar analizi noktasında çok ciddi sınırlamalarının olduğu yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konmuştur (Kurtz ve ark., 1998; Bergström ve ark., 2002). Bu sınırlamalar içerisinde en fazla göze çarpan gerinim oranına bağlı malzeme davranışının hidrostatik basınç etkisinin ve plastik bölgedeki deformasyon mekanizmasının yeterince tanımlanamaması kriterleridir. Bundan daha önemlisi sonlu elemanlar modelinde kullanılan bu malzeme modellerinin genellikle metaller için geliştirilmesi ve bu malzeme modellerinin çoğunun von Mises J_2 plastik modeli kullanmalarıdır. von Mises kriterine dayanan J_2 plastik modelinin çok eksenli yüklemelere maruz kalan UHMWPE'nin mekanik davranışlarını yeterince tanımlayamadığı yapılan çalışmalar tarafından rapor edilmiştir (Kurtz SM, Bergström JS, Rimnac CM, 2001). Bu malzeme modellerinde görünen kısıtlamaları ortadan kaldırabilmek için daha önce de belirttiğimiz gibi Arruda-Boyce (Boyce ve ark., 1988; Arruda ve ark., 1995), Hasan-Boyce (Hasan ve Boyce, 1995), Bergström-Boyce (Hasan ve Boyce, 1995) ve Hybrid model (Hasan ve Boyce, 1995) tarafından geliştirilen modeller UHMWPE'nin tek eksenli yüklemeler altında mekaniksel davranışlarını J_2 plastik malzeme modeline göre çok daha iyi bir şekilde tahmin edebildiği ortaya koymuştur. Fakat bu malzeme modelleri UHMWPE'nin eğilme ve darbe gibi çok eksenli yüklemeler altındaki malzeme davranışlarını tahmin etme noktasında yetersiz kalmaktadırlar. Yapılan geniş kapsamlı literatür taramasından sonra bu malzeme modelleri, UHMWPE üzerinde yapılan punch testleri bütünlük çekme/burulma ve eşit eksenli yükleme testleri aracılığıyla elde edilen çok eksenli yüklemeler altında oluşan gerilmeleri belirleyebilmek için kullanılmıştır (Kitagawa ve

ark., 1992b; Kurtz ve ark., 1997, 2002; Edidin ve Kurtz, 2001; Bergström ve ark., 2002). 3 nokta eğilme testleri UHMWE ve benzeri termoplastik malzemelerin çok eksenli yüklemeler altında gerçek malzeme davranışlarını elde etme noktasında uygulanması gereken en basit mekanik testlerden bir tanesidir. Literatürde, UHMWPE üzerinde gerçekleştirilen 3 nokta eğme test ve bu testlerin nümerik analizleri noktasında hiçbir bilgi bulunamamıştır. Literatürde görülen bu eksikliğin giderilmesi bu çalışmanın birinci motivasyonudur. Bu bilgiler ışığında ilk olarak UHMWPE üzerinde değişik hızlar altında 3 nokta eğilme testleri gerçekleştirmek ve daha sonra bu testlerin nümerik analizlerini yapılan geniş kapsamlı incelemelerden sonra özellikle polimer malzemeler için geliştirilen yarı empirik SAMP-1 malzeme modeli kullanarak deneysel ve nümerik çalışmalar arasında kabul edilebilir bir uyumluluk sağlamaktır. Bu bağlamda 3 nokta eğilme testleri 3 değişik hız altında (0.1, 1 ve 12 mm/s) gerçekleştirilmiş ve deneysel veriler kuvvet-yer değiştirme çıktıları açısından her bir hız için elde edilmiştir.

SAMP-1 malzeme modelinde giriş parametresi olarak kullanılması gereken çekme ve basma test verilerini elde edebilmek için bahsi geçen mekanik testler ayrıca gerçekleştirilmiştir. Yapılan literatür araştırması sonrasında UHMWPE malzeme üzerinde çeşitli hızlar altında çekme ve basma testlerinin gerçekleştirildiği ve gerçekleştirilen çekme basma testlerinden elde edilen verilerin raporlandığı görülmüştür (Frank ve ark., 2003; Bois ve ark., 2004; Huang ve ark., 2004; Bergstrom ve Bischoff, 2010; Senden ve ark., 2010; Chen ve ark., 2017; Deplancke ve ark., 2019; Bernard ve ark., 2020). Fakat UHMWPE malzeme özellikleri moleküler ağırlığına göre değiştiğinden dolayı ve bu testlerin bizim bu çalışmada üzerinde yoğunlaştığımız UHMWPE ile moleküler ağırlık noktasında farklılık arz etmesinden dolayı burada bahsi geçen testler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzeme modeli ilk önce çekme ve basma testlerinin nümerik analizlerinde kullanılmış ve malzeme modelinin UHMWPE'nin karmaşık malzeme davranışlarını yakalayabildiğinden emin olunmuştur. Daha sonra 3 nokta eğilme testlerinin nümerik analizlerinde kullanılmış ve deneysel veriler ile kıyaslandığında yüksek bir uyumluluk yakalanmıştır.

3 MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu çalışmada üzerinde çalışılan UHMWPE malzemesi SONGHAN firmasında 4 mm kalınlığında levhalar şeklinde temin edilmiştir. Firma tarafından bu malzemenin ORBILAN® PE 1000 UHMW-PE (SONGHAN, 2021) şeklinde ifade edildiği ve buna göre malzemenin yoğunluk ve molekül ağırlığı sırasıyla 930 kg/m^3 ve $5 \times 10^6 \text{ gr/mol}$ olarak verilmiştir. Yine firmaya göre bu malzemenin ekstrüzyon imalat yöntemi kullanılarak elde edildiği bildirilmiştir. Bu levhalardan ileride daha detaylı bir şekilde açıklanan uygun ASTM (ASTM-D638, 2006; ASTM-D695, 2010) standartlarına göre çekme numuneleri su jeti ile basma ve 3 nokta eğme testleri için ise numuneler CNC ile hazırlanmıştır.

3.2 Yöntem

Bu çalışmada gerçekleştirilen basma, çekme ve 3 nokta eğme testlerinin tamamı Şekil 3.1'de gösterilen SHIMADZU AGS-X marka 100kN kapasiteli çok amaçlı test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Çekme testleri 3 farklı hız altında (0.1, 1 ve 12 mm/s) yapılmıştır ve bu testler esnasında çekme numunelerinin üzerinde oluşan gerinim alanları TRAPEZIUM X marka video ekstansometre yardımı ile elde edilmiştir. Yapılan basma testlerinde ise çekme testlerinde de olduğu gibi 3 farklı hız (0.1, 1 ve 12 mm/s) kullanılmış malzeme üzerinde oluşan birim şekil değiştirme ise cihazın kafa hareketine bağlı olarak hesaplanmıştır. Cihazın kafa hareketine göre gerinimlerin arkasında yatan ana neden kullanılan video ekstansometrenin basma terslerinde uygulanabilirliğinin olmamasındandır. Çekme ve basma testlerinden elde edilen mühendislik gerilim-gerinim eğrileri kullanılarak her bir hız için gerçek gerilim-gerçek gerinim eğrileri belirlenmiştir. Çekme verileri kullanılarak elde edilen gerçek gerilim-gerçek gerinim eğrileri kullanılarak her bir hız için çekme elastik modülü, üst ve alt akma sınırları belirlenmiştir. Bu veriler değişik hızlarda çekme yüklerine maruz bırakılan UHMWPE'nin malzeme davranışlarını anlayabilme noktasında çok önemli bilgiler sağlamıştır. Aynı durum basma yükü altında elde edilen malzeme davranışı içinde geçerlidir. Çekme ve basma testleri sırasıyla ASTM D638-14 tipV ve ASTM D695-15 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Basma test numuneleri silindirik olarak değil de yine standarta uygun olan kare prizma şeklinde hazırlanmıştır.

UHMWPE'nin çok eksenli yükler altında gerçek davranışını ortaya çıkarabilmek için 3 değişik (0.1, 1 ve 12 mm/s) hız altında gerçekleştirilmiştir. 3 nokta eğme testlerinin bu tür malzemelerin gerçek davranışlarını ortaya çıkarabilmek için yapılabilirliği en kolay olan mekanik testtir. 3 nokta eğilme test verileri her bir hız için eğilme kuvveti-yer değiştirme açısından elde edilmiş ve ortaya çıkan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yukarıda bahsi geçen mekanik testlerde (çekme, basma ve 3 nokta eğme) kullanılan her bir hız için en az 4 tane test yapılmış ve bu test verilerinin ortalamasının alınarak nihai deneysel veriler elde edilmiştir.

Yapılan mekanik test verilerinin sonlu elemanlar bağlamında tekrar elde edilebilmesi için LS-DYNA mühendislik modelleme programı kullanılmıştır. Bu modelleme programında çok sayıda elastik-viskoplastik malzeme modelleri bulunmasına rağmen bu malzeme modellerinden yarı deneysel SAMP-1 malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modelinin kullanılmasının arkasında yatan temel sebep UHMWPE gibi polimer malzemelerde gözlemlenen karmaşık malzeme davranışlarının(gerinim oran bağımlılığı ve hidrostatik basınç etkisi) ve gerinim yumuşaması ve gerinim sertleşmesi gibi malzeme davranışlarını bu model tarafından istenilen doğrulukta yakalanabilmesidir. 2005 yılında özellikle polimerler için geliştirilen SAMP-1 malzeme modelinin polimerik malzemelerin nümerik analizlerinde kullanımı giderek artmaktadır. Çekme, basma ve 3 nokta eğilme testlerinin nümerik analizlerinde HyperMesh ön işlemci olarak kullanılırken, LS-DYNA çözümleyici olarak kullanılmıştır. HyperMesh buradaki mekanik testlerde kullanılan test numunelerini küçük sonlu elemanlara ayrılması noktasında kullanılmıştır. HyperMesh, LS-DYNA ile kıyaslandığında bu geometrilerin istenilen seviyede küçük ve bölgesel olarak daha yoğun mesh yapabilme imkanı sağlamıştır. Bu izlenen yol ile nümerik analizlerin doğruluğunu artırılması sağlamıştır. 3 nokta eğilme test simülasyonlarında SAMP-1 malzeme modeline dışarıdan gerçek plastik gerinim-gerçek plastik gerilim eğrileri tanıtılmıştır. Bu SAMP-1 malzeme modelini UHMWPE'nin gerinim oranına bağlı malzeme davranışını yakalamak içindir. İlave olarak hidrostatik basınç etkisinden kaynaklı basma ve çekme altındaki değişik malzeme davranışlarını yakalayabilmek için 0.1 mm/s basma hızı altında elde edilen gerçek plastik gerilim-gerçek plastik gerinim eğrisi malzeme modeline tanıtılmıştır. Bu tanımlamalar aracılığı ile SAMP-1 malzeme modelinin gerinim oranı bağımlılığı ve hidrostatik basıncı etkisine alan

Drucker-Prager plastik malzeme model formülasyonuna göre hesaplama yapması sağlanmıştır. Hidrostatik basınç etkisinin eğilme kuvvet-yer değiştirme eğrisi üzerindeki etkisi ortaya çıkarabilmek için basma test verisi tanımlaması SAMP-1 malzeme modeline yapılmayarak SAMP-1 malzeme modelini geleneksel von Mises (J2 plastisite) yaklaşımına göre hesaplama yapması sağlanmıştır. Daha sonra Drucker-Prager formülasyonuna göre ve von Mises yaklaşımına göre elde edilen nümerik veriler deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Buradaki asıl amaç 3 nokta eğme altında bütünlük olarak oluşan çekme, basma ve kayma gerilmelerinden basma altındaki malzeme özelliğini nümerik analizlerde hesaplama içine alınmadığında ortaya çıkacak etkiyi gözlemlemek ve ortaya koymaktır.



Şekil 3.1. SHIMADZU üniversal test cihazı (a) ve sonuçların alındığı bilgisayar (b)

Şekil 3.1 b resminde ise test cihazından alınan verilerin aktarıldığı ve test cihazı ve kameranın bağlı olduğu bilgisayar görülmektedir. Ölçümler için test cihazına bağlı kamera yardımıyla malzemedeki oluşan şekil değişim miktarı ölçülmüştür. Deneyler 0.1 mm/s, 1 mm/s ve 12 mm/s hızlarında olmak üzere 3 farklı hız kullanılmış ve en az 4 tekrarlı deneyler yapılmıştır. Kullanılan bu hızlar bütün testlerde ve simülasyonlarda her test için yapılmış olup birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel numuneler için, çekme testi numunelerinde radyus bölgeleri ve ölçüm alanının deforme olmadan çok iyi bir işleme tabi tutulmasının öneminden dolayı ve yüzey kalitesi açısından numuneler CNC ile değil de su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır. 3 nokta eğme ve basma testi için hazırlanmış numuneler ise CNC ile kesilerek hazırlanmış ve hazırlanmış tüm

numuneler değişen hızlarda plastik deformasyona maruz bırakılarak verdiği tepkiler bağlamında grafikler oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan bu grafikler yapılan nümerik çalışmalar ile karşılaştırılmış ve oluşan durum yorumlanarak bir sonuç elde edilmiştir.

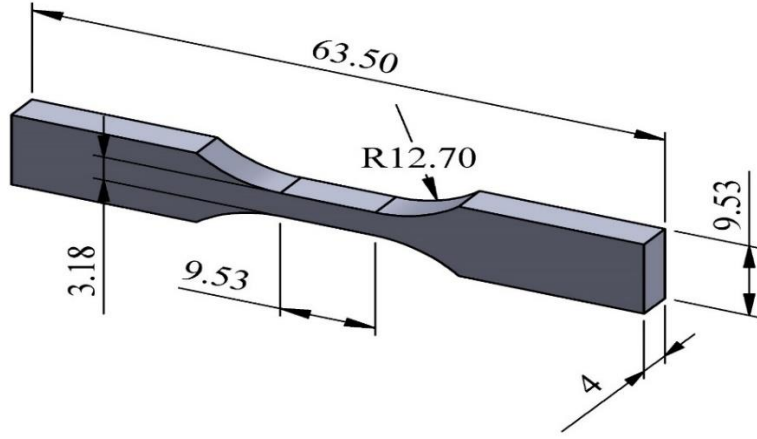


4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

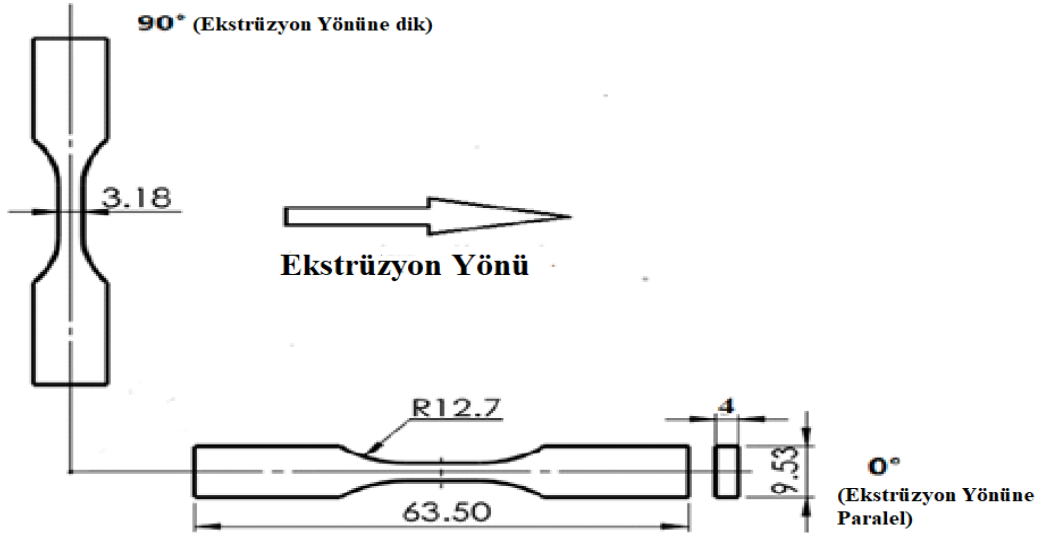
UHMWPE malzemesinin çekme, basma ve 3 nokta eğme yüklemeleri altında mekanik davranışlarını belirleyebilmek için çekme, basma ve 3 nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm testler SHIMADZU AGS-X marka 100kN kapasiteye sahip cihaz kullanılmıştır. Gerçekleştirilen mekanik testler aşağıdaki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

4.1 Çekme Deneyi

Çekme numuneleri köpek kemiği şekline sahip ASTM D638-14 tipV standartlarına uygun olarak hazırlanmış ve bu hazırlanan numune ölçüleri Şekil 4.1 de gösterilmiştir. Çekme testleri 3 değişik çekme hızı (0.1, 1 ve 12 mm/s) altında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çekme test numuneleri 4 mm kalınlığa sahip plakadan hem ekstrüzyon yönü doğrultusunda 0^0 hem de ekstrüzyon yönüne 90^0 dik olan yön doğrultusunda su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır. Bu hazırlanan numunelerin doğrultuları Şekil 4.2 de gösterilmiştir. Burada hedeflenen asıl amaç imalat aşamasındaki ekstrüzyon yön doğrultusunun UHMWPE malzeme davranışları üzerindeki etkisini ortaya çıkarmaktadır. UHMWPE 0^0 ve UHMWPE 90^0 de hazırlanan test numuneleri üzerinde 3 değişik hız altında çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Burada her bir hız için en az 4 tane çekme testi gerçekleştirilmiş ve bu testlerden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak gerilme-gerinim diyagramı elde edilmiştir. Çekme deneyleri esnasında numuneler üzerinde oluşan gerinim alanları “TRAPEZIUM X” marka video ekstansometre ile ölçülmüştür. Video ekstansometrenin çalışma prensibine göre şekil 4.4’de gösterildiği gibi malzeme üzerinde iki adet sticker yerleştirilmiş ve video ekstansometrenin çekme esnasında bu iki sticker arasındaki yer değişimini takip etmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.1. Standart çekme test numunesi ölçüleri



Şekil 4.2. Hazırlanan numunelerin yönlendirme durumları



Şekil 4.3. Deneilerde kullanılacak standart çekme numuneleri

Şekil 4.3’de deneyler sırasında kullanılacak numune görülmektedir. Bu numuneler hazırlanırken ekstrüzyon yönüne göre Şekil 4.2 deki gibi iki şekilde yönlendirme ile kesilmiştir.



Şekil 4.4 Çekme deneyi sırasında UHMWPE numunenin deforme olması

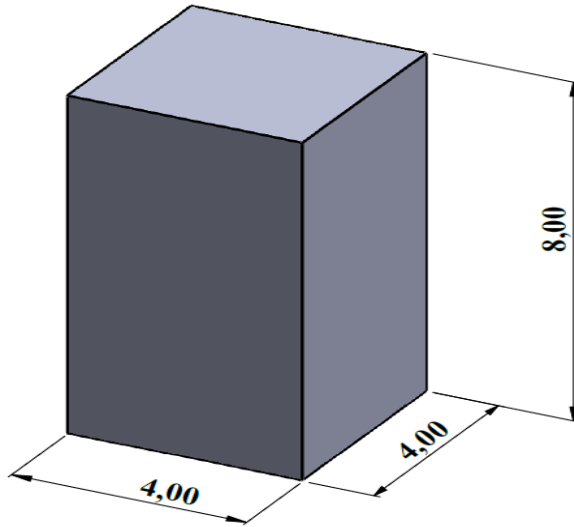
Metallerden farklı olarak polimer malzemelerin elastik bölgesi çok küçüktür ve akma noktasına çok hızlı bir şekilde ulaşırlar. Bu yüzden cihazın kafa hareketine bağlı olarak bir gerinim hesaplaması yapmak polimer malzemeler için tutarlı bir yaklaşım değildir. Elastik ve plastik bölgedeki gerinimlerin özellikle elastik bölgedeki gerinimlerin doğru bir şekilde ölçülebilmesi için manuel yada video ekstansometre kullanılması son derece önemlidir. Fakat polimer malzemeler çekme yükleri altında genellikle hacim değişimlerine maruz kaldıklarından dolayı gerinim alanlarının belirlenmesinde manuel ve video ekstansometre kullanılması yeterli olmayabilmektedir (Dundar, 2017; Dundar ve ark., 2020). Çok daha tutarlı veri elde edebilmek için optik yöntem olarak bilinen dijital görüntü kolarasyonu kullanılmalıdır. Bu yöntem ile bölgesel gerinimle ve malzemenin maruz kaldığı hacim değişimleri hesaplanarak çok daha tutarlı veriler elde edilmektedir. Yapılan çekme testleri ile elde edilen gerilme-gerinim eğrileri, çekme esnasında malzeme üzerinde oluşan bölgesel kesit alanı daralmalarını hesaba katmadığından dolayı mühendislik gerilme-mühendislik gerinim eğrileri olarak bilinir. Bundan dolayı bölgesel kesit daralmalarını hesaba katarak gerçek gerilim-gerçek gerinim eğrileri elde edilmelidir. Buna binaen gerçek gerilme ve gerçek gerinim değerleri denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_g = \sigma_m (1 + \varepsilon_m) \quad \varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon_m) \quad (4.1)$$

Burada σ_m ve ε_m sırasıyla mühendislik çekme gerilmesi ve mühendislik çekme gerinimini gösterirken, gerçek çekme gerilmesi ve gerçek çekme gerinmesi sırasıyla σ_g ve ε_g ile ifade edilmiştir. Elde edilen gerçek gerilme gerçek gerinim değerleri kullanılarak her bir hız için çekme elastik modülü çekme alt ve üst akma noktası hesaplanmış ve elde edilen değerler birbirleriyle kıyaslanmıştır.

4.2 Basma Deneyi

Basma test numuneleri ASTM D695-15 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan test numune ölçüleri şekil 4.5’de gösterilmiştir. Burada test numuneleri silindirik olmaktan ziyade bahsi geçen standarta göre kare prizma şekline göre hazırlanmıştır. Çekme testlerinde de olduğu gibi basma testleri de 3 değişik hız (0.1, 1 ve 12 mm/s) altında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Basma testleri esnasında Şekil 4.6’da gösterilen numune 6 mm ye kadar sıkıştırılmaya maruz bırakılmıştır. Buradaki basma testlerinde ortaya çıkan gerinim değerleri video ekstansometre kullanılmadığından dolayı cihazın kafa hareketinden elde edilen yer değiştirme değerlerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Her bir hız için standartlara uygun olarak en az 4 adet test yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak basma gerilme-basma gerinim grafikleri elde edilmiştir. Bu verilere dayanarak basma gerçek gerinim basma gerçek gerinim grafikleri denklem 4.2 kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Standart basma numunesi ölçüleri

$$\sigma_g = -\sigma_m (1 - \varepsilon_m) \quad \varepsilon_g = -\ln(1 - \varepsilon_m) \quad (4.2)$$

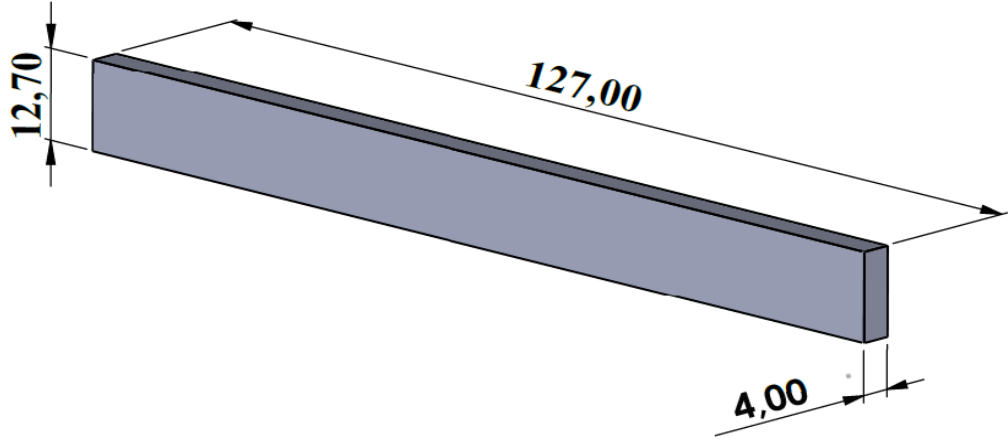
Buradaki hesaplamalarda σ_m deney sonucunda alınan mühendislik basma gerilmesi, ε_m ise mühendislik basma gerinmesini göstermektedir. Burada basma olduğundan dolayı σ_m ve ε_m negatif olarak alınmıştır. İlave olarak σ_g ve ε_g değerleri sırasıyla gerçek basma gerinim gerçek basma gerilim değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 4.6. Standartlara göre hazırlanmış basma numunesi

4.3 3 Nokta Eğme Deneyi

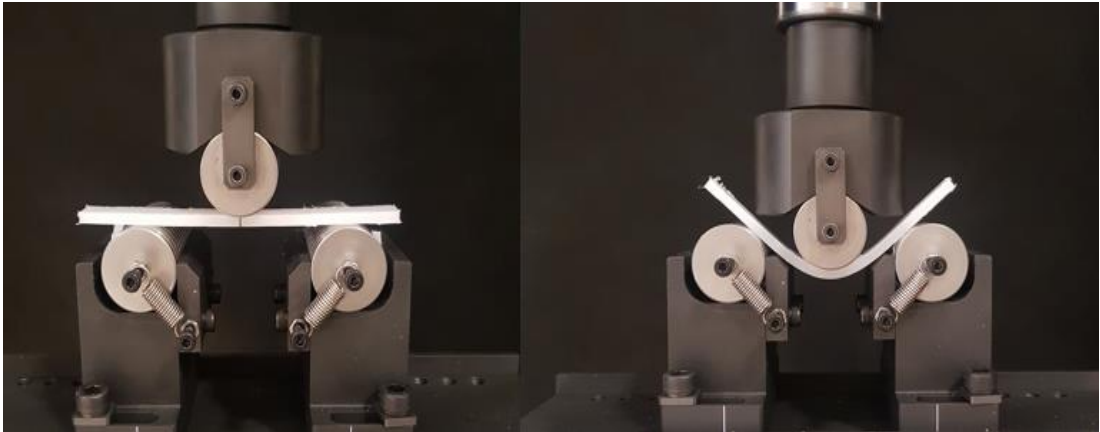
3 nokta eğme test numuneleri ölçüleri Şekil 4.7’de gösterilen ASTM D5023-15 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Çekme ve basma testlerinde de olduğu gibi 3 nokta eğme testleri de 3 değişik hız (0.1, 1 ve 12 mm/s) altında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 3 nokta eğme testleri esnasında Şekil 4.8’de gösterilen numune 22 mm ye kadar eğilmeye maruz bırakılmıştır. Buradaki 3 nokta eğme testlerinde ortaya çıkan sehim miktarı basma testinde de olduğu gibi video ekstansometre kullanılmadığından dolayı cihazın kafa hareketinden elde edilen yer değiştirme değerlerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Her bir hız için standartlara uygun olarak Şekil 4.9’da görüldüğü üzere en az 4 adet test yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak kuvvet-yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.7. Standart 3 Nokta eğme numune ölçüleri



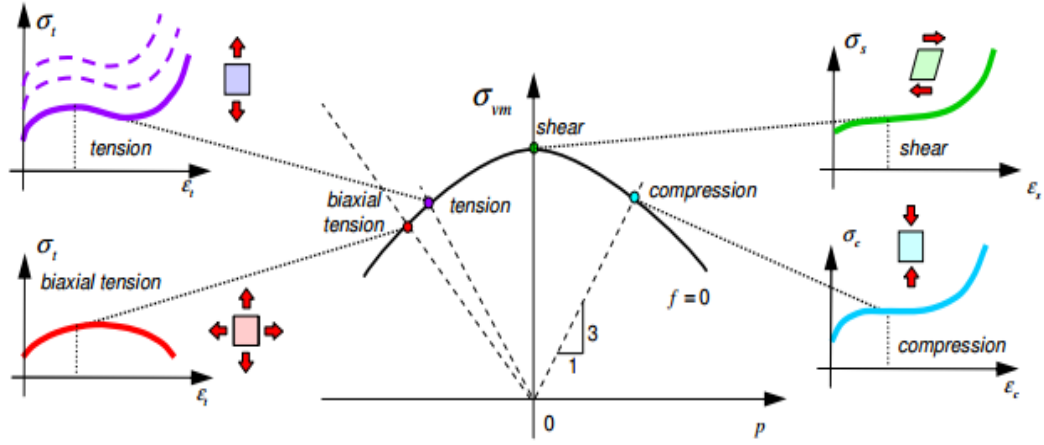
Şekil 4.8. Standart olarak hazırlanmış 3 nokta eğme numunesi



Şekil 4.9. 3 nokta eğme deneyi süresince numunenin deforme olma aşaması

5 NÜMERİK ÇALIŞMALAR

Geleneksel malzeme modelleri çok eksenli yüklemelere maruz polimer malzemelerin mekanik davranışlarını sonlu elemanlar bağlamında tahmin etme noktasında yetersiz kalmaktadır. Bu yetersiz kalmanın ana nedenleri olarak polimer malzemelerinin mekanik malzeme özelliklerinin gerinim oranı, sıcaklık ve hidrostatik basınçtan önemli ölçüde etkilenmelerine ilave olarak gerinim yumuşaması ve gerinim yumuşamasını takip eden gerinim sertleşmesi gibi karmaşık davranışların bu geleneksel modeller tarafından yeterince tanımlanamamalarıdır. Literatür taramasında da ifade edildiği gibi bu karmaşık malzeme davranışlarını belirleyebilmek için önemli akademik çalışmalar yapılarak malzeme modelleri geliştirilmesine rağmen bu malzeme modelleri çok eksenli yüklere maruz kalan polimer malzemelerin davranışlarını istenilen doğrulukta tahmin edememektedirler. Buradaki malzeme modellerinin yetersizliği araştırmacıların yönünün yarı deneysel malzeme modellerinin geliştirilmesine çevirmiştir. 2005 yılında özellikle polimer malzemelerin çok eksenli yükler altındaki gerçek malzeme davranışlarını sonlu elemanlar bağlamında yüksek hassasiyetle elde edebilmek için SAMP-1 malzeme modeli geliştirilmiştir (Kolling ve ark., 2005). Yapılan akademik çalışmalar ile bu malzeme modelinin değişik polimer malzemelerin 3 nokta eğme ve darbe gibi deney verilerinin nümerik olarak yüksek doğrulukla elde edebildiğini ortaya çıkarmıştır (Daiyan ve ark., 2012; Gu ve ark., 2013; Dunder ve ark., 2020; Dunder ve Dhaliwal, 2020a). Şekil 5.1’de SAMP-1 malzeme modeli kullanılarak hesaplamalar için bu malzeme modeli tarafından oluşturulan akma yüzey tanımlamaları gösterilmiştir.



Şekil 5.1. SAMP-1 akma yüzeyi hesaplama algoritması (Dundar, 2017)

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere bu malzeme modeli, tek eksenli gerilme, tek eksenli basma, kayma ve çift eksenli gerilme gibi dört farklı mekanik testten elde edilmesi gereken tablo verileri olarak dört farklı gerçek plastik gerilme-gerçek plastik gerinim eğrisini kullanarak bir dışbükey akma yüzeyi oluşturur. SAMP-1, yarı statik veya dinamik tek eksenli gerilme testinden elde edilmesi gereken bir girdi olarak kesinlikle en az bir gerçek plastik gerilme-gerçek plastik gerinim eğrisi gerektirmektedir.

Daha önce belirtildiği gibi, SAMP-1 malzeme modeli, hesaplamalar için girdi olarak farklı deneysel test verilerini kullanır. Simülasyonlarda kullanılan farklı deneysel verilere bağlı olarak SAMP-1 tarafından üretilen von Mises, Drucker-Prager ve SAMP-1 gibi üç farklı akma yüzey tanımları vardır. Örneğin, SAMP-1’e yalnızca çekme testi verilerinin dahil edilmesi ile von Mises akma gerilmesi formülasyonunun, çekme ve basma altında farklı malzeme davranışını tanımlayamamasına yol açar. Ek olarak, Drucker-Prager akma gerilmesi tanımı, çekme testi verileriyle birlikte basma veya kayma testi verilerinin malzeme modeline tanıtılması ile gerçekleştirilir. Bu durumda, eksik test verileri dahili olarak SAMP-1 tarafından oluşturulur (Kolling ve ark., 2005). Bu malzeme modeli, gerinim oranından bağımsız olarak dışarıdan girilen sabit bir elastik modül kullanır. Bununla birlikte, polimerlerin elastik modülünün gerinim oranıyla değiştiği bilinmektedir. Modele tanıtılan çoklu gerinme-gerilme eğrileri polimerlerin gerinim oranına bağlı malzeme davranışlarını belirlemek için kullanılırken, basma veya kayma plastik gerilim-gerinim eğrileri ise hidrostatik basınçtan kaynaklanan çekme, basma veya kayma altındaki değişik malzeme davranışlarını hesaplamaların içine almak içindir. Burada vurgulanması gereken en

önemli noktalardan bir tanesi malzeme modelinin çoklu basma veya kayma plastik gerilim gerinim eğrilerini kullanmaya izin vermemesidir. Fakat burada yapılan ve ileriki bölümlerde gösterilen basma test verileri UHMWPE'nin basma altında da gerinim oranına bağlı olarak değişim gösterdiğini ortaya koymuştur. Burada SAMP-1 kendisine dışarıdan tanıtılan çoklu gerçek çekme plastik gerilim-gerinim eğrileri içerisinde en düşük gerinim oranına sahip eğriyi kendisine referans olarak almakta ve simülasyonlar esnasında ortaya çıkan gerinim oranlarına göre referans eğrisi ile diğer eğriler arasındaki oranları kullanarak basma ya da kayma eğri verilerini arttırmaktadır. Aslında bu durum SAMP-1 malzeme modelindeki sınırlamalardan bir tanesini işaret etmektedir. Çünkü polimer malzemelerin çekme, basma ve kayma altındaki gerinim oranına bağlı değişim hassasiyetleri aynı değildir.

Burada her ne kadar SAMP-1 malzeme modeline çoklu çekme plastik eğrileri, basma plastik eğrisi ve kayma plastik eğrilerinin tamamı tanıtılması tavsiye edilse de sadece çoklu çekme eğrisi ve basma eğrisi de kullanılarak polimer malzemelerin çok eksenli yükler altındaki davranışlarını yüksek doğrulukla bu malzeme tarafından hesaplanabildiği ortaya konmuştur (Daiyan ve ark., 2012; Dundar ve ark., 2020). Burada basma testleri altında malzeme üzerinde oluşan gerilimlerin daha homojen olduğundan dolayı basma testleri yapılmış ve nümerik analizlerde kullanılmıştır.

Tüm polimerler bir miktar anizotropiye işaret etse de, izotropi için gerilme tensörü formundaki quadratik akma yüzeyi aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$f = \sigma^T F \sigma + B \sigma + F_0 \leq 0 \quad (5.1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{pmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{12} & 0 & 0 & 0 \\ F_{12} & F_{11} & F_{12} & 0 & 0 & 0 \\ F_{12} & F_{12} & F_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{44} \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} F_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Eşdeğer saf kayma ve çift eksenli çekme / basma aşağıdaki kısıtlamaları gerektirir;

$$F_0 \leq 0 \quad \text{ve} \quad F_{44} = 2(F_{11} - F_{12}) \quad (5.3)$$

İfadede dört bilinmeyen bağımsız katsayı görünüyor. Tüm bu katsayılar bir sabit ile çarpıldıktan sonra, tek eksenli gerilme, tek eksenli basma ve kayma gibi üç farklı

mekanik testten elde edilen deneysel verilere dayanarak serbestçe seçilebilen yalnızca üç katsayı tanımlanabilir. Buna bağlı olarak, denklem 5.1 'de verilen akma yüzeyi tanımı basınç ve von Mises gerilme değişmezleri olarak aşağıdaki ifade ile yeniden formüle edilebilir;

$$f = \sigma_{vm}^2 - A_0 - A_1 p - A_2 p^2 \leq 0 \quad (5.4)$$

Burada p ilk gerilim değişmezidir ve aşağıdaki gibi formüle edilebilir;

$$p = -(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) / 3 \quad (5.5)$$

σ_{vm} ilk gerilim değişmezidir (von Mises) ve aşağıda yazıldığı gibi ifade edilebilir;

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{3}{2} [(\sigma_{xx} + p)^2 + (\sigma_{yy} + p)^2 + (\sigma_{zz} + p)^2 + 2\sigma_{xy}^2 + 2\sigma_{yz}^2 + 2\sigma_{xz}^2]} \quad (5.6)$$

5.1, 5.4 ve 5.5 denklemlerini kullanarak, F_0 , F_1 , F_{11} , F_{12} ve F_{44} 'ün bilinmeyen katsayıları A_0 , A_1 ve A_2 cinsinden aşağıdaki gibi türetilir;

$$F_0 = -A_0, \quad F_1 = \frac{A_1}{3}, \quad F_{11} = 1 - \frac{A_2}{9}, \quad F_{44} = 3 \quad \text{ve} \quad F_{12} = F_{11} - \frac{F_{44}}{2} = -\left(\frac{1}{2} + \frac{A_2}{9}\right) \quad (5.7)$$

Şimdi, quadratik akma yüzeyini tanımlayan katsayılar, tek eksenli çekme, basma ve kayma testi verilerinden elde edilebilir, aşağıda yazıldığı gibi gerilme değerleri;

$$F_0 + F_1 \sigma_t + F_{11} \sigma_t^2 = 0 \quad (5.8)$$

$$F_0 - F_1 \sigma_c + F_{11} \sigma_c^2 = 0 \quad (5.9)$$

$$F_0 + F_{44} \sigma_s^2 = 0 \quad (5.10)$$

σ_t , σ_c , σ_s sırasıyla çekme, basma ve kayma altındaki akma gerilmeleridir. 5.8, 5.9 ve 5.10 denklemlerini aynı anda çözdükten sonra şu şekilde yazılabilir;

$$F_1 = F_0 (1/\sigma_c - 1/\sigma_t) \quad (5.11)$$

$$F_{11} = -F_0 / (\sigma_t \sigma_c) \quad (5.12)$$

$$F_{44} = -F_0 \sigma_s^2 \quad \text{ve} \quad F_0 = -3\sigma_s^2 \quad (5.13)$$

Denklem 5.13'ün, 5.11 ve 5.12 denklemlerine ilave edilmesi ile F_1 ve F_{11} aşağıdaki gibi elde edilebilir;

$$F_1 = -3\sigma_s^2 (1/\sigma_c - 1/\sigma_t) \quad \text{ve} \quad F_{11} = \frac{3\sigma_s^2}{\sigma_t \sigma_c} \quad (5.14)$$

$$F_1 = -3\sigma_s^2(1/\sigma_c - 1/\sigma_t) \text{ ve } F_{11} = \frac{3\sigma_s^2}{\sigma_t \sigma_c} \quad (5.14)$$

5.13 ve 5.14 denklemlerini denklem 5.7'ye koyarsak, bilinmeyen katsayılar (A_0 , A_1 , A_2) aşağıdaki gibi türetilir;

$$A_0 = 3\sigma_s^2, \quad A_1 = 9\sigma_s^2(\sigma_c - \sigma_t \sigma_c \sigma_t) \text{ ve } A_2 = 9[(\sigma_c \sigma_t - 3\sigma_s^2)/(\sigma_c \sigma_t)] \quad (5.15)$$

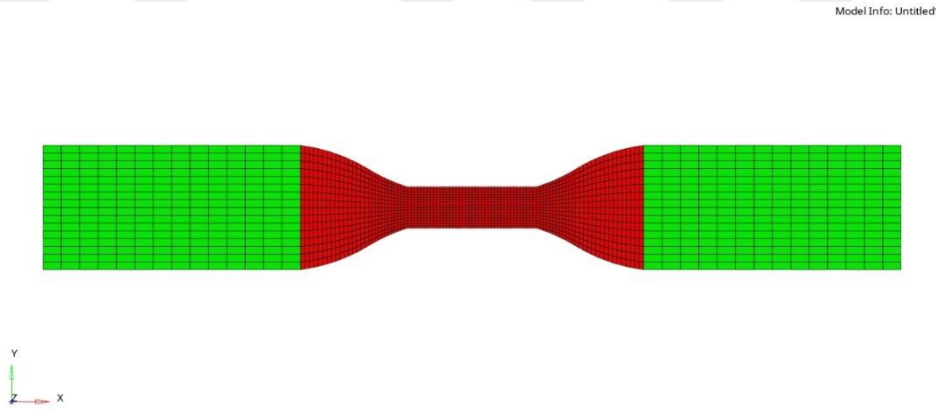
Kullanılan plastik poisson oranı tanımına bağlı olarak SAMP-1'de ilişkili ve ilişkili olmayan iki farklı akış kuralı tanımlama olasılığı vardır. Simülasyonda sabit plastik poisson oranı kullanılırsa, akış kuralı ilişkisiz akış olarak kabul edilecektir. Plastik poisson oranının, plastik gerinimle oranı değişimi ile tanımlandığında simülasyonlarda kullanılan akış kuralı ilişkili akış olarak kabul edilecektir. Yaptığımız nümerik çalışmalarda simülasyonlarda kullandığımız SAMP-1 malzeme modelinde ilişkili olmayan akışta plastik poisson oranı değerinin bir girdi olarak tanıtılmasıyla hesaplamalar yapılmaktadır. Yapılan bu girdinin neticesinde simülasyon hesaplama süresinin önemli ölçüde iyileştiği ve ilişkili olan durumu ile sonuçlar birbirine hemen hemen yakın olduğu yapılan çalışmalarda da görülmüştür (Dundar ve ark., 2020). Bu, ilişkili olmayan akışın, ilişkili akıştan çok daha az bir hesaplama süresi ile sonuçlandığı anlamına gelir. Bizim kullandığımız malzeme olan UHMWPE için ilişkili olmayan poisson oranı 0.46 olarak tanımlanmıştır ve bu şekilde nümerik çalışmalarda kullanılmıştır.

Yapmış olduğumuz çekme, basma ve 3 nokta eğme deneysel çalışmalarımızdan aldığımız her bir hız (0.1, 1 ve 12 mm/s) için çekme ve basma deneylerinden elde edilen ve gerinim açısından düzensiz olan gerilme-gerinim eğrileri Matlab ve Abaqus programlarında bulunan “smooth” fonksiyonu kullanılarak deneysel verilerin bütünlüğünü bozmadan yeniden düzenlenmiştir. Bunun yapılmasının ana nedeni SAMP-1 malzeme modeline dışarıdan girdi olarak tanıtılan bu eğrilerin gerinim açısından düzensiz olması malzeme modelinin düzgün olarak bu verileri algılayamamasına bağlı yanlış tahminlerde bulunmasıdır.

Yapılan nümerik çalışmalarımızda kullanılan LS-DYNA programında, SAMP-1 malzeme modeli kullanılarak yukarıda belirtmiş olduğumuz kısıtlama ve girdiler kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

5.1 Çekme Deneyi

Çekme deneyi nümerik çalışmalarında Şekil 5.2’de görüldüğü gibi ASTM D638-14 tipV standartlarına uygun şekilde HyperMesh programında model çizilmiş ve çizilen model üzerinde mesh bölgeleri oluşturulmuştur. Bu oluşturulan modeli LS-DYNA programında SAMP-1 malzeme modeli kullanılarak deney şartlarında 3 farklı hızda (0.1, 1 ve 12 mm/s) standartlara uygun bir şekilde nümerik çalışmalar kapsamında simülasyonları gerçekleştirilmiştir. LS-DYNA programına her bir deformasyon hızı için ayrı ayrı o şartlarda yapılan deneysel çalışmalardan oluşturduğumuz gerçek plastik gerilme gerçek plastik birim şekil değiştirme eğrileri girdi olarak verilmiş ve nümerik çalışmalar her bir hız için bu şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2. Çekme test sonlu elemanlar modeli

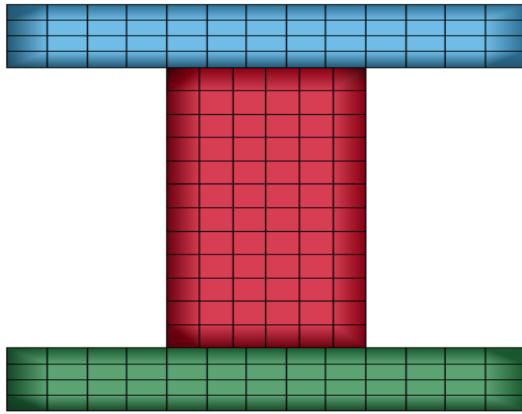
Çekme testlerinin nümerik modellenmesinde problem 3 boyutlu olarak ele alınmış ve bu analizlerde 15872 hexahedral (altı yüzlü) element kullanılmıştır. Bu element sayısı nümerik analizlerle analizlerin 19125 düğüm üzerinden hesaplama yapılmasına yol açmıştır. Ayrıca kalınlık boyunca 8 adet hexahedral element kullanılmıştır. Şekil 5.2’de yeşil renk ile ifade edilen kısımlar rijit bölge olarak tanımlanmış ve bu bölgelerden sol tarafta kalan kısmın sınır şartlar aracılığıyla tamamen sabitlenirken diğer bölgeye çekme yönünde (x yönü) deneylerde kullanılan hızda aynen olduğu gibi zamanın bir fonksiyonu olarak uygulanmıştır. Numune sonlu elemanlara ayrılırken numune üzerinde radiustan kaynaklı gerilme geçiş hatları daha küçük elementlere ayrılmıştır. Burada amaçlanan, çekme nümerik analizlerinde ortaya çıkan gerilmelerin bu bölgelerden geçişini daha kolay hale getirerek nümerik analiz sonuçlarının doğruluğunu artırmaktır. Kırmızı renk ile gösterilen kısım bizim UHMWPE malzemesini temsil etmektedir.

Nümerik analizlerde simülasyon zamanını düşürmek için ELFORM-1 formülasyonu ve bu formülasyon ile birlikte “Hourglass” sertlik kontrolü kullanılmıştır. Bu ELFORM-1 formülasyonu azaltılmış entegrasyon üzerine hesap yaparak simülasyon zamanını düşürdüğünden ve de doğruluğu yüksek olduğundan nümerik analizlerde kullanılması tercih edilen en yaygın olarak kullanılan formülasyon tipidir (Daiyan ve ark., 2012; Gu ve ark., 2013; Dundar ve ark., 2020). Nümerik analizler sonucunda her bir hız için gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrileri elde edilmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

5.2 Basma Deneyi

Basma deneyi nümerik çalışmalarında Şekil 5.3’de görüldüğü gibi ASTM D695-15 standartlarına uygun şekilde HyperMesh programında model çizilmiş ve çizilen model üzerinde alt tarafta sabit bir tabla ve üst tarafta da hareketin uygulandığı hareketli bir tabla çizilmiş ve bu bölgeler sonlu elemanlara bölünmüştür. Basma test nümerik analizlerinde gerçek deneyler esnasında kullanılan 3 değişik hız (0.1, 1 ve 12 mm/s) mavi renkte gösterilen hareketli tablaya olduğu gibi uygulanmıştır.

SAMP-1 malzeme modelinde dışarıdan 1 tane gerçek plastik gerilim-gerçek plastik gerinim eğrisi girilmek zorunda olduğundan burada bir tane çekme eğrisi ile birlikte bahsi geçen hızlardan elde edilen basma gerçek gerilim-basma gerçek gerinim grafikleri her bir nümerik analizler için SAMP-1 malzeme modeline tanıtılarak gerçekleştirilmiştir



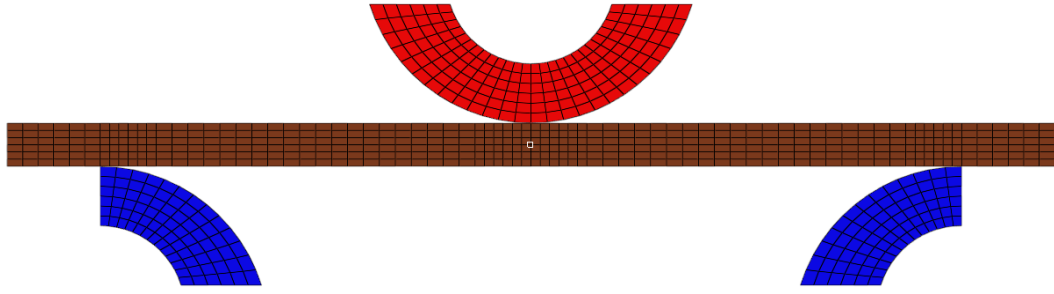
Şekil 5.3. Basma test sonlu elemanlar modeli

Şekil 5.3’de görüldüğü gibi basma test nümerik analizlerinde 1784 hexahedral element kullanılmıştır ve bu kullanılan element sayısı nümerik analizlerin 2593 düğüm

üzerinden yapılan hesaplamalar ile gerçekleştirilmiştir. Sabit levha ve hareketli levha arasında “1-Way Surface to Surface” kontak tipi tanımlanmıştır. Kontak yüzeyleri arasında hiçbir sürtünme katsayısı tanımlanmamıştır. Yeşil ile gösterilen alt plaka hareketsizdir ve tüm yönleriyle sınır şartları ile sabitlenirken üst plaka ile basma numunesinin 6 mm basılması sağlanmıştır. Burada alt levha ve üst levha rijit cisim olarak tanımlandığından dolayı kontak yüzeyleri ana (master) yüzey olarak tanımlanmış ve bu tanımlamadan kaynaklı olarak alt levha ve üst levha basma numune ile karşılaştırıldığında daha büyük sonlu elemanlara ayrılmıştır. Çekme nümerik analizlerinde olduğu gibi ELFORM-1 sertlik kontrolü ile birlikte kullanılmıştır. Bu basma test nümerik analizlerinde elementler aşırı deformasyona maruz kaldığından dolayı sonlu elemanlar aşırı deformasyona maruz kalmakta ve bu da nümerik analiz sonuçlarını etkilemektedir. Bunun önüne geçebilmek için LS-DYNA programında kullanılan iç seçenek kısmı kullanılmıştır. Yapılan nümerik analizler sonucunda gerçek basma gerilme-gerinim değerleri elde edilerek sözü edilen hızlardan gelen basma verileri ile karşılaştırılmıştır.

5.3 3 Nokta Eğme Deneyi

3 nokta eğme test sonlu elemanlar modeli Şekil 5.3’de gösterilmiştir. Modelin geometrisi HyperMesh programında çizilerek elde edilmiş ve yine bu modelde sonlu elemanlara ayrılmıştır. Nümerik analizlerde çekme testlerinden elde edilen gerçek plastik gerilim-gerinim eğrilerinin hepsi SAMP-1 malzeme modeline tanıtılırken, 0.1 mm/s basma hızı altında elde edilen gerçek plastik gerilim gerçek plastik gerinim eğrisi de kullanılmıştır. Basma eğrisinin kullanılmasının arkasında yatan ana hedef eğilme esnasında malzeme üzerinde oluşan basma ve gerilme altındaki değişik malzeme davranışların hesaplamaların içine dahi etmektir. Bu durumun dahil edilmediği noktalarda aynı nümerik analizler basma gerçek plastik gerilim-gerinim eğrisi kullanılmadan da gerçekleştirilmiş ve elde edilen nümerik sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.4. 3 nokta eğme test sonlu elemanlar modeli

3 nokta eğme sonlu elemanlar modellerinde 4752 hexahedral element ve 6622 element düğüm kullanılmıştır. Şekil 5.4’de de görüldüğü gibi 3 nokta eğme UHMWPE modeli kalınlık boyunca 7 elemente ayrılmıştır. Nümerik modelde mavi renk ile temsil edilen destekler ve kırmızı renk ile temsil edilen indenter rijit kütle olarak tanımlanmıştır. Model üç boyutlu olarak ele alınmıştır. Simülasyon zamanını düşürmek için yine ELFORM-1 formülasyonu sertlik kontrolü ile kullanılmıştır. Bunu ötesinde problem simetrik olduğundan dolayı 3 nokta eğme testi modellenmesinde testin sadece yarısı göz önünde bulunmuştur. Bu izlenen yol hesaplama zamanının ciddi manada önemli ölçüde düşürülmesi için izlenmiştir. Simetriden kaynaklı simetri sınır şartları test numunesinin üzerine tanıtılmıştır. İndenter-eğme numunesi ve destekler-eğme numunesi aralarında otomatik genel kontak tipi iç seçenek kısmı ile birlikte kullanılmıştır. Burada indenter ve destekler rijit cisim olarak tanımlandığından dolayı nümerik analizlerde kontak esnasında ana yüzeyler olarak tanımlanmıştır. Bundan dolayı UHMWPE eğme numunesi ile kıyaslandığında daha büyük sonlu elemanlara ayrılmıştır. Şekil 5.4’de de görüldüğü gibi birbirleri ile kontak içinde olan bölgelerde nümerik analiz sonuçlarının doğruluğunu artırabilmek için UHMWPE numunesi daha küçük elemanlara ayrılmıştır. Nümerik analizlerde tüm kontak yüzeyler arasında sürtünme katsayısı 0.05 olarak alınmıştır. Buradaki analizlerde indenter aracılığı ile numunenin orta kısmının 22 mm eğilmesi sağlanmıştır. Gerçek testlerde kullanılan hızlar burada indentora olduğu gibi uygulanmıştır. nümerik analizlerden indenter ve numune arasındaki kontak yüzeyinde oluşan kontak kuvvetleri her bir hız için yer değiştirmeye bağlı olarak elde edilmiş ve elde edilen bu değerler deneysel veriler ile kıyaslanmıştır.

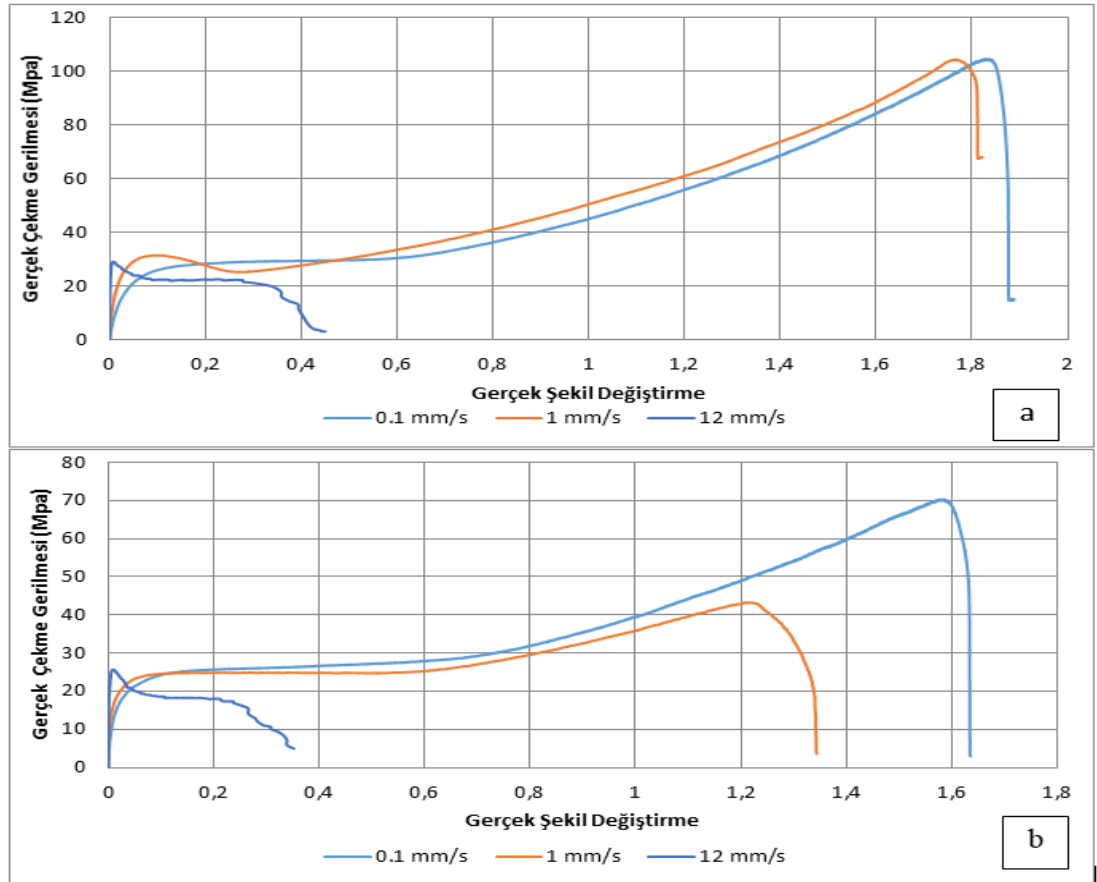
6 BULGULAR

6.1 Deneysel Çalışma Bulguları

3 değişik hız (0.1, 1 ve 12 mm/s) altında gerçekleştirilen çekme ve basma testlerinden elde edilen mühendislik gerilme-gerinim eğrileri kullanılarak gerçek gerinim-gerilme eğrileri elde edilmiştir. Çekme verileri kullanılarak bu hızlar için ayrı ayrı çekme elastik modülü, alt çekme dayanımı, üst çekme dayanımları elde edilmiştir. Bu çekme verileri UHMWPE, 0^0 ve 90^0 için ayrı ayrı hesaplanmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Basma altında elde edilen gerçek gerilim-gerinim eğrileri de her bir hız için elde edilmiş ve çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. 3 nokta eğme testlerinden gelen veriler birbirleriyle karşılaştırılmış ve de değerlendirilmiştir.

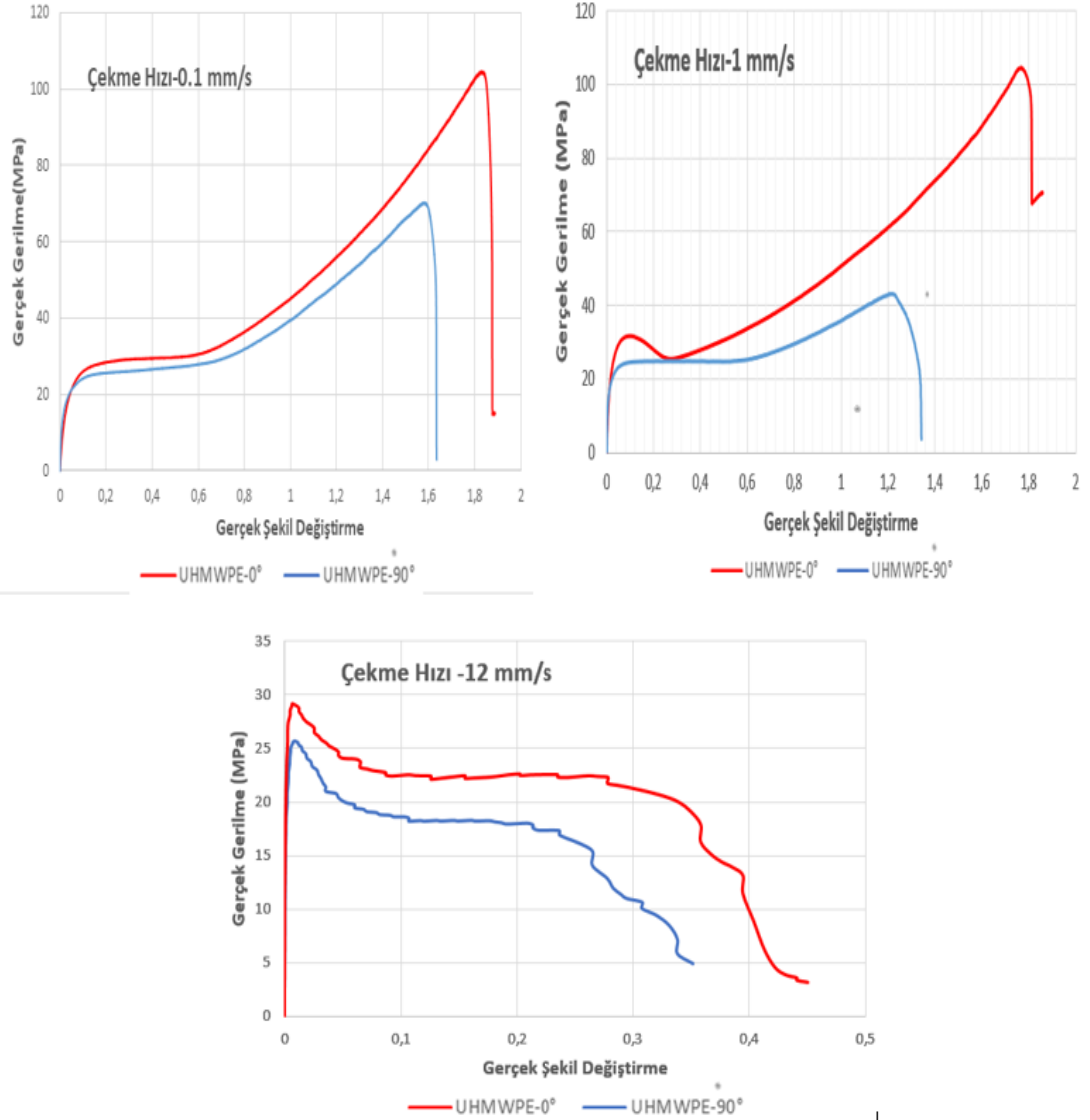
6.1.1 Çekme Deneyi

Şekil 6.1a'da UHMWPE 0^0 için gerçek gerilme gerçek gerinim eğrileri 3 farklı hız için gösterilirken bu veriler Şekil 6.1b'de UHMWPE 90^0 için verilmiştir.



Şekil 6.1. Çekme deneyi sonuçlarından oluşan farklı deformasyon hızlarındaki (a)UHMWPE 0^0 ve (b)UHMWPE 90^0 numunelere ait eğriler

Şekil 6.1'e dayanarak UHMWPE 0⁰ ve UHMWPE 90⁰ en düşük iki hızda (0.1 ve 1 mm/s) gerinim yumuşaması ve gerinim yumuşamasını takip eden gerinim sertleşmesi malzeme davranışlarını gösterdiği çıkarımı yapılabilir. Çekme testlerinde en yüksek hız olan 12 mm/s grafiklerine baktığımız zaman üst akma noktasından sonra gerilimde bir düşüş olduğu yani gerinim yumuşaması davranışını gösterdiği fakat bu gerinim yumuşamasını takip eden gerinim sertleşmesi davranışını belirgin bir şekilde göstermediği görülmektedir. Özellikle UHMWPE 90⁰ için nerdeyse gerinim yumuşamasını takip eden bir gerinim sertleşmesi olduğunu söylemek pek mümkün değildir. UHMWPE 0⁰ üst ve alt dayanım nihai gerilim ve nihai gerinimler açısından UHMWPE 90⁰ ile karşılaştırıldığında çok daha iyi çekme malzeme özellikleri göstermektedir.



Şekil 6.2. Farklı deformasyon hızlarında UHMWPE 0° ve UHMWPE 90° numunelerin çekme eğrilerinin karşılaştırılması

Ekstrüzyon yönünün UHMWPE'nin çekme altında malzeme davranışlarının nasıl değiştiğini daha iyi yorumlayabilmek için UHMWPE 0° ve UHMWPE 90° nin gerçek gerilme-gerçek gerinim diyagramları her bir hız için birbirleri ile Şekil 6.2'de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır.

Çekme hızının 0.1 mm/s olduğunda UHMWPE 0° ile UHMWPE 90° nin sahip olduğu gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrileri birbirlerine benzemektedir. Fakat UHMWPE 0° daha yüksek üst akma sınırı ile birlikte daha fazla nihai gerilme ve gerinimlere sahiptir. Burada bu hız için ekstrüzyon yönünün gerçek gerilme üzerindeki etkisi, gerçek gerinim artarken daha belirgin hale gelmiştir.

Çekme hızının 1 mm/s olduğu durumda ise UHMWPE 0° ile UHMWPE 90° arasında mekanik malzeme davranışı açısından daha fazla farklılık gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar içerisinde özellikle üst akma dayanımının olduğu öne sürülebilir. UHMWPE 0° nin üst akma dayanımını UHMWPE 90° ye göre önemli ölçüde daha fazla olduğu söylenebilir. 0.1 mm/s çekme hızında olduğu durumdaki gibi ekstrüzyon yön etkisi gerinim artarken çok daha belirgin hale gelmektedir. Her iki hız durumu için UHMWPE 0° nin daha fazla tokluğa sahip olduğu gözlemlenmiştir. UHMWPE 0° nin özellikle nihai geriniminin daha fazla olması uygulama alanlarında göz önünde bulundurulması gereken bir gerçeklik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum sağlıklı bir tasarım yapabilme adına oldukça önemlidir.

Çekme hızının 12 mm/s olduğu durum diğer iki hızda gözlemlenen durumlar ile benzerlik göstermektedir. Üst akma dayanım nihai gerilim ve nihai gerinim açısından UHMWPE 0° çok daha iyi mekanik performans göstermektedir. Ekstrüzyon yönünün UHMWPE'nin elastik ve plastik malzeme davranışları üzerinde önemli etkiye sahiptir. Tablo 6.1'de 3 deformasyon hızı için %0.2 ofset metoduyla hesaplanan çekme elastik modülü, alt akma dayanımı ve üst akma dayanım değerleri UHMWPE 0° ve UHMWPE 90° için gösterilmiştir.

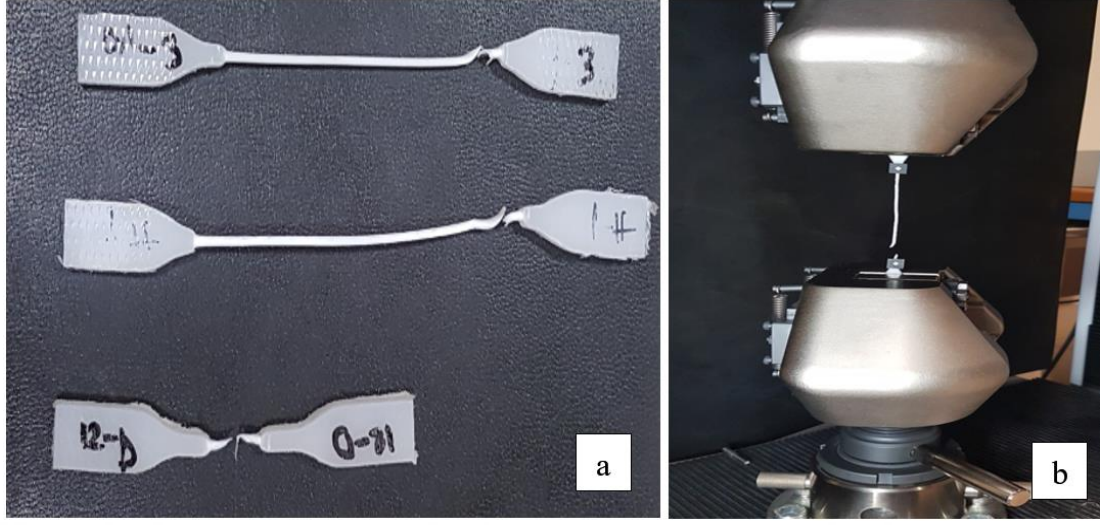
Tablo 6.1. Çekme deneyi sonucu oluşan UHMWPE 0° ve UHMWPE 90° numuneler için değişen hızlarda oluşan akma dayanımı ve çekme elastik modülü

Çekme Hızı (mm/s)	Gerinim Oranı (s ⁻¹)	Çekme Elastik Modülü (MPa)	Alt Akma Sınırı (MPa)	Üst Akma Sınırı (MPa)
0,1	0,01	0°-1169 90°-869.8	0°-21.7 90°-23.1	0°-28.9 90°-25.7
1	0,1	0°-1453 90°-1394	0°-25.1 90°-23.2	0°-31.5 90°-24.8
12	1,2	0°-4200 90°-3703	0°-21.4 90°-22.7	0°-29.1 90°-25.2

Tablo 6.1'den de anlaşılacağı gibi UHMWPE 0° in çekme elastik modülü tüm hızlar için UHMWPE 90° ninkinden her zaman yüksektir. Bu beklenen bir sonuçtur. Aynı kompozit malzemelerde olduğu gibi zincir dizilimleri ekstrüzyon yönünde olduğundan dolayı bu malzemelerin kendi zincirlerine paralel gelen yüklere karşı göstermiş

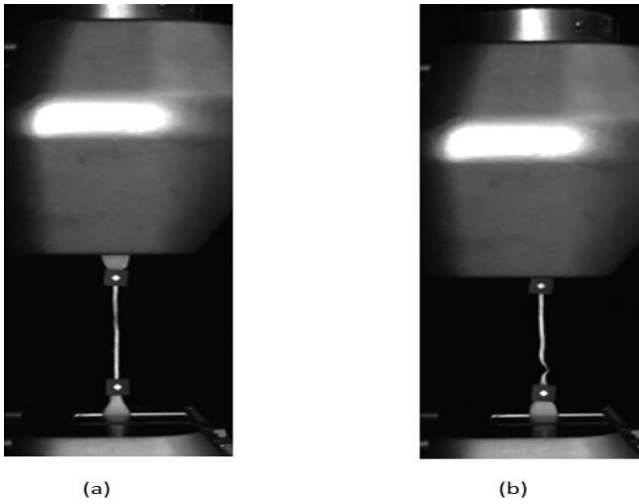
oldukları direnç daha fazladır. Ayrıyeten deformasyon hızı arttıkça her ikisinin de çekme elastik modülü önemli ölçüde artmaktadır. UHMWPE 0° nin üst akma dayanımları UHMWPE 90° ninkinden her zaman yüksek çıkmıştır. Fakat bu değerler arasındaki fark çok fazla olmadığı için göz ardı edilebilir farktır. Yalnız bu durum çekme elastik modülleri için geçerli değildir. Çekme elastik modülleri arasında önemli bir fark bulunmaktadır ve bu fark tasarımlarda kesinlikle hesaplamalarda bulundurulmalıdır. Burada her ne kadar alt akma dayanımları da verilmiş olsa da polimer malzemelerde esas olarak kullanılan üst akma sınırıdır. Bu üst akma sınır değerlerine bakılarak UHMWPE'nin anizotropik malzeme davranışı göstermediği söylenebilir.

Şekil 6.3'de çekme testlerine maruz bırakılan UHMWPE'nin her üç hız için kopma morfolojileri gösterilmiştir. Şekil 6.3'den de anlaşılacağı gibi bu malzeme aşırı deformasyonlara maruz kalabilmekte ve çok yüksek plastik gerinim değerlerine ulaşabilmektedir. Çekme testleri sonrası kopan malzemeler incelendiğinde malzemelerin üzerinde(gösterge uzunluğu) renk değişimi gözlemlenmiştir. Malzeme kendi özel renginden açık beyaz renge doğru bir değişim göstermiştir. Bu polimer malzemelerde gerilim beyazlaşması diye bilinen malzemenin içerisinde oluşan hasarın ve ilerlemenin bir göstergesidir. Uzama ve kopma karakteristiklerine bakıldığında bu malzemenin aşırı derecede sünek olduğu ve kopma mekanizmasında buna bağlı olarak sünek olduğu anlaşılmaktadır. Bu da Şekil 6.3'de malzemenin kopmaya uğradığı bölgelerde boyun vermiş olmasından çıkarılan bir sonuçtur. Tablo 6.1'de her ne kadar bu malzemenin metallere kıyasla elastik modülünün ve akma dayanımının küçük olmasına rağmen özellikle üst akma sınırından sonra göstermiş olduğu yüksek plastik gerinim değerleri bu malzemenin darbe yükleri altında enerji absorbe kabiliyetinin olduğunu göstermektedir.

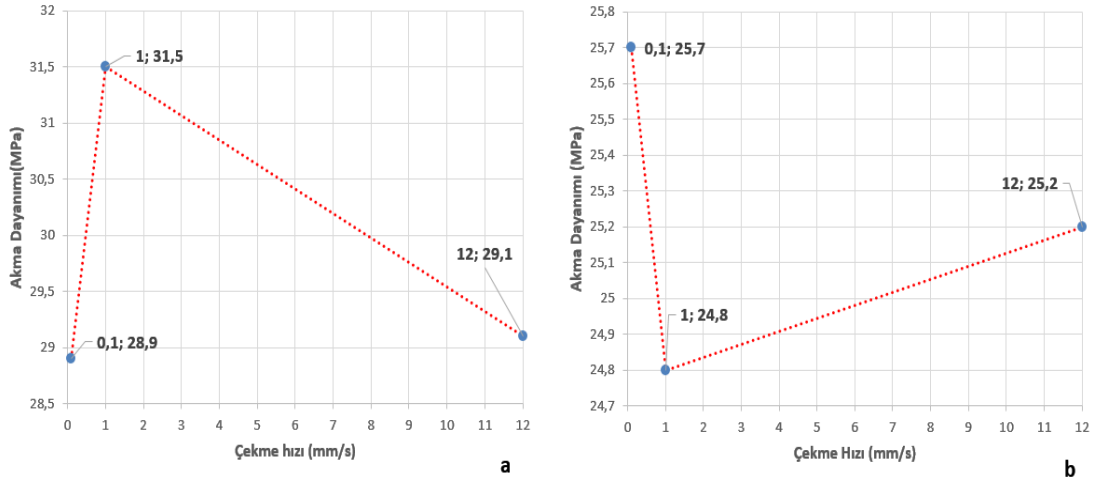


Şekil 6.3. Test sonucunda deforme olmuş numuneler (a) ve test sırasında deforme olmuş numune (b)

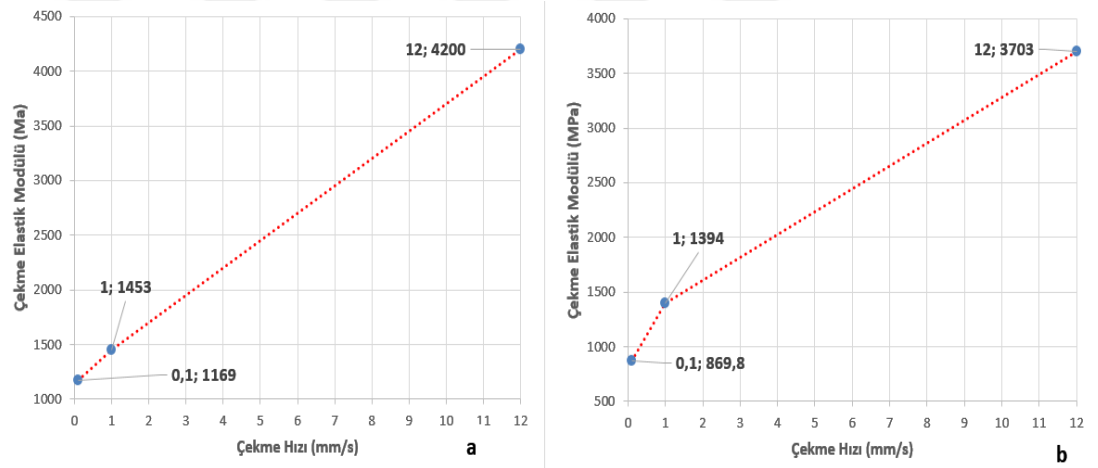
Çekme testi esnasında 12 mm/s hız altında kopmaya uğrayan UHMWPE 0⁰ ve UHMWPE 90⁰ ye ait numunelerin şekilleri sırasıyla Şekil 6.4a ve Şekil 6.4b’de gösterilmiştir. Bu görüntüler test esnasında video ekstansometrenin sahip olduğu “trapezium x” marka kameradan alınmıştır. Bu resimlerden de yine malzemeler üzerinde oluşan renk değişimi ve sünek kopma mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 6.4. 12 mm/s hızda (a) UHMWPE 0⁰ ve (b) UHMWPE 90⁰ numuneler için deney sırasında deforme olmuş hali



Şekil 6.5. (a) UHMWPE 0° ve (b) UHMWPE 90° numunelere ait çekme hızına bağlı akma dayanımı karşılaştırılması



Şekil 6.6. (a) UHMWPE 0° ve (b) UHMWPE 90° numunelere ait çekme hızına bağlı çekme elastik modülü karşılaştırılması

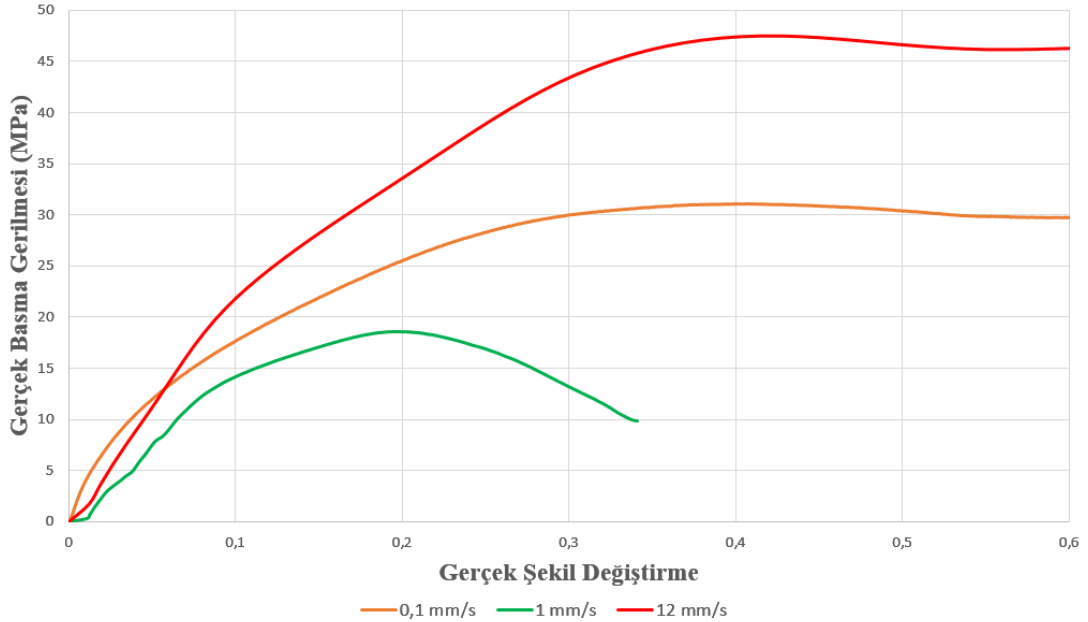
Şekil 6.5a ve Şekil 6.5 b'de sırasıyla UHMWPE 0° ve UHMWPE 90° için çekme hızına bağlı olarak değişen çekme üst akma dayanımları gösterilmiştir. Çekme hızına bağlı olarak bu malzemenin üst akma dayanımlarının yüksek seviyede nonlinear olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, bizim burada çalışmış olduğumuz hız aralığında üst akma dayanımı çekme hızına bağlı olarak oldukça nonlineardir. Burada kullandığımız en yüksek hız olan 12 mm/s'den daha yüksek hızlarda çekme testleri gerçekleştirilerek akma dayanımının hıza bağlı olarak değişimini incelemek çok daha detaylı bilgi sağlayacaktır.

Çekme hızına bağlı akma dayanımlarının değişimlerinin aksine UHMWPE 0° ve UHMWPE 90°'nin çekme elastik modülleri çekme hızına bağlı olarak artmaktadır. Bu

artış sırasıyla Şekil 6.6a ve Şekil 6.6b’de gösterilmiştir. UHMWPE 0⁰ için çekme hızına bağlı olarak elastik modülünün değişimi çalışılan bu hız aralığında doğrusal olarak kabul edilebilirken, UHMWPE 90⁰ için bu durum söz konusu değildir. Daha detaylı çıkarım yapabilmek için daha yüksek hızlarda çekme testleri gerçekleştirilmeli bu testlerden elde edilecek çekme elastik modülleri çalışmaya dahil edilmelidir.

6.1.2 Basma Deneyi

Basma testleri sonucunda üç hız için ayrı ayrı elde edilen mühendislik gerilme gerinim verileri kullanılarak elde edilen gerçek gerilme-gerinim eğrileri Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Değişik hızlar için gerçek basma gerilme-gerinim eğrileri

Burada çekme altında malzemenin göstermiş olduğu gerinim yumuşaması ve gerinim yumuşamasını takip eden gerinim sertleşmesi davranışları basma altında gözlemlenmemiştir. Bunun arkasında yatan temel sebep UHMWPE'nin sahip olduğu makro zincir yapısından kaynaklanmaktadır. Gerinim yumuşamasına sebep olan ana etken çekme yükü altında zincirlerin ilk konumlarını kalıcı olarak değiştirmeleri ve bu kalıcı değişim esnasında terk etmiş oldukları ilk konumlarının etrafında küçük boşlukların oluşmasını takiben gerilimde düşmeye yol açmasıdır. Fakat basma altında zincirlerin yer değiştirme mekanizması çekme altındakine göre çok daha homojendir. Bu homojen hareket basma altında bu malzemelerde oluşan gerinim yumuşamasının ve takip eden gerinim sertleşmesi bölgelerinin ortaya

çıkmasını önemli ölçüde azaltmaktadır. Burada 1 mm/s hızı altında UHMWPE gerinim yumuşaması özelliği göstermezken diğer iki hızda bu alan belli belirsiz şekilde gözlemlenmektedir. Bu gibi malzemeler değişik hızlar altında değişik tepkiler verdiği için dolayı diğer iki hızda 0.1 ve 12 mm/s gerinim yumuşaması az da olsa gözlenirken 1 mm/s hız altında niye bu malzeme özelliğini göstermediği bilinmemektedir (Mulliken, 2006; Mulliken ve Boyce, 2006). Bu gibi malzemelerde bu durum malzemelerin değişik hızlar altında göstermiş olduğu “içsel yetenek” olarak bilinmekte ve bu içsel yeteneğin arkasında yatan temel gerçeklik hala ciddi bir araştırma konusu olarak önemini korumaktadır.

Şekil 6.8’de basma testleri sonrası deformasyona uğrayan UHMWPE numuneleri gösterilmiştir. Buradaki deformasyon miktarı 6 mm’dir.



Şekil 6.8. Basma deneyi sonucunda deforme olmuş numuneler

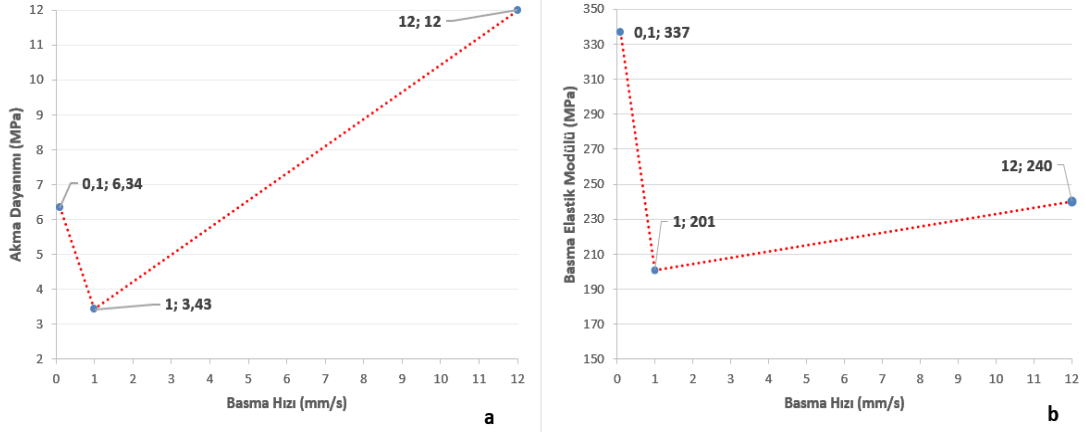
Burada kopan çekme numunelerinde gözlemlemiş olduğumuz gerinim beyazlaşması gözlemlenmemiştir. Diğer bir ifadeyle basma esnasında UHMWPE malzemesinin üzerinde renk değişimi (açık beyaz) gerçekleşmemiştir. Yine bu zincir hareketleri ile doğrudan bağlantılıdır. Renk değişiminin arkasında yatan temel sebep zincirlerin ilk yerlerini kalıcı olarak değiştirirken küçük boşlukların oluşması ve bu boşlukların yüklenim devam etmesi durumunda daha fazla olması ve çoğalan ve genişleyen bu boşlukların birbirleriyle birleşmesindedir. Basma altında bu mekanizma gözlemlenmediğinden dolayı da renk değişimi gözlemlenmemektedir. Aslında bu

durum Şekil 6.7’de gösterilen gerçek basma gerilmesi-gerçek basma gerinimi eğrilerinde gerinim yumuşamasının niye az belirgin olduğunun da cevabıdır.

Tablo 6.2. Basma deneyi sonucu oluşan UHMWPE numuneler için değişen hızlarda oluşan akma dayanımı ve basma elastik modülü değerleri

Basma Hızı (mm/s)	Akma Dayanımı (Mpa)	Basma Elastik Modülü (Mpa)
0.1	6.34	337
1	3.43	201
12	12	240

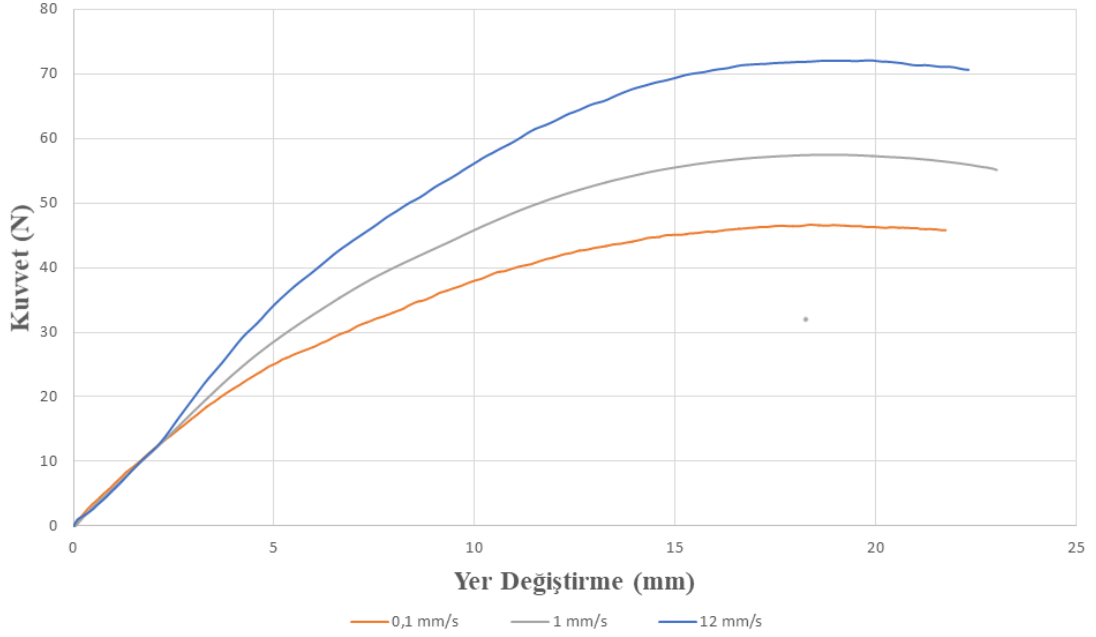
Tablo 6.2’de %0.2 ofset metodu kullanılarak her bir hız için elde edilen akma dayanımları ve basma elastik modülleri gösterilmiştir. En yüksek basma modülü 0.1 mm/s basma hızı altında 337 Mpa olarak elde edilirken en düşüğü 201 Mpa olarak 1 mm/s hız altında elde edilmiştir. İlave olarak en düşük akma dayanımı 3.43 Mpa ile 1 mm/s basma hızı altında gerçekleşmiştir. Buradan anlaşılan UHMWPE’nin basma dayanımları ve elastik modülleri basma hızına göre doğrusal olmayan bir şekilde değişiklik göstermektedir. Bu durum değişik molekül ağırlığa sahip UHMWPE malzemesi için literatürde belirtilen durumlar ile benzerlik göstermektedir(L. G. Malito, 2016). Çekme altındaki elastik modülleri ile kıyaslandığında (Tablo 6.1 ve Tablo 6.2) UHMWPE’nin basma modüllerinin çok daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Akma dayanımları açısından da aynı durum söz konusudur. Aslında bu beklenen bir durumdur. Aynı kompozit malzemelerde olduğu gibi UHMWPE’de bulunan düzenli zincirler çekme yükleri altında olduğu gibi kendi doğrultusunda uygulanan kuvvetlere karşı daha fazla direnç gösterir. Bu da çekme elastik ve akma dayanımlarını artırmaktadır. Basma yükleri altında ise bu durumun tam tersi gerçekleştiğinden dolayı basma elastik modülleri daha azdır.



Şekil 6.9. Basma hızına bağlı (a) akma dayanımı ve (b) basma elastik modülü karşılaştırması

Basma hızına bağlı olarak UHMWPE'nin akma dayanımı ve basma elastik modül değişimleri Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Çekme testlerinden elde edilen çekme dayanım değişimlerinde olduğu gibi benzer değişim basma altındaki akma dayanımlarında da gözlemlenmiştir. Yani burada Şekil 6.9'dan da anlaşılacağı gibi doğrusal olmayan bir değişim vardır. Çekme elastik modüllerinde farklı olarak (doğrusal değişim) hıza bağlı UHMWPE'nin basma elastik modülü oldukça nonlineardir. Tüm bu değişimler yapılacak tasarımlar için göz önünde bulundurulmak zorundadır. Özet olarak UHMWPE'nin malzeme davranışı çekme ve basma hızlarına göre çok değişiklik göstermektedir ve çekme elastik modülü hariç diğerleri oldukça nonlineardir.

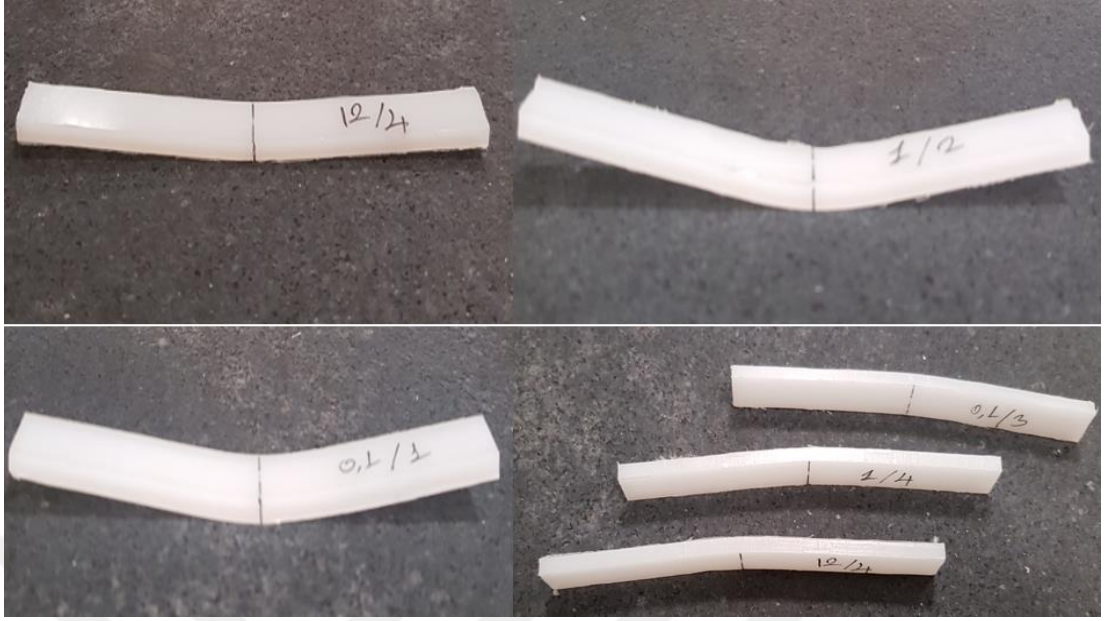
6.1.3 3 Nokta Eğme Deneyi



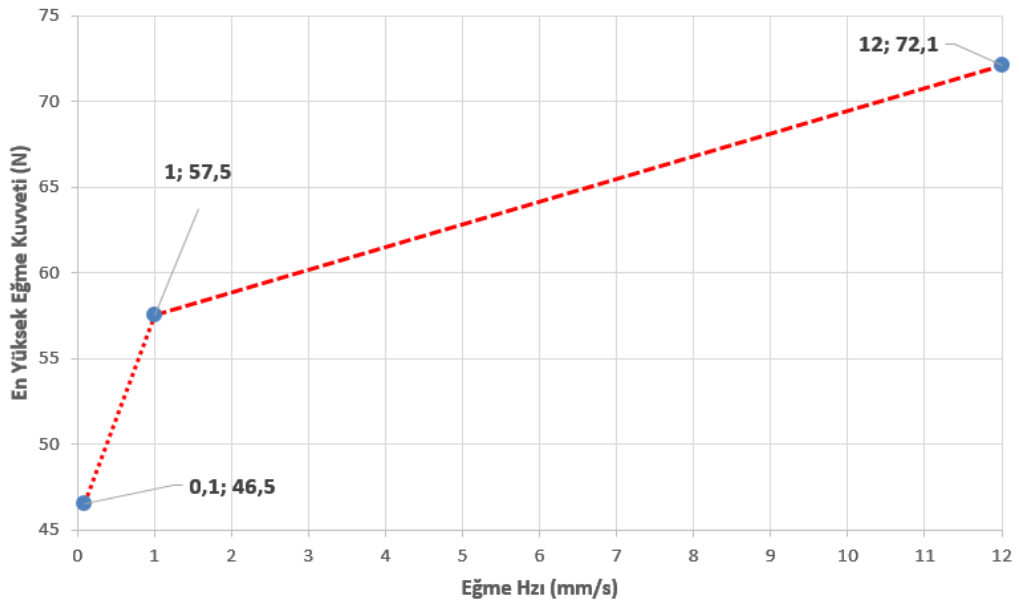
Şekil 6.10. Farklı hızlar için 3 nokta eğme test kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Üç farklı hız (0.1, 1 ve 12 mm/s) altında gerçekleştirilen 3 nokta eğme testlerinden elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Deformasyon hızının artması UHMWPE malzemesinin vermiş olduğu tepkiyi de arttırmıştır. Diğer bir ifade ile artan hız malzemenin üzerinden daha fazla kuvvet artışına neden olmuştur. Bu Şekil 6.10'dan da kolaylıkla anlaşılmaktadır. 3 nokta eğme altında malzeme çekme basma ve kayma gerilimlerine maruz kaldığından dolayı burada karşımıza çıkan sonuç malzemenin çekme, basma ve kayma altında değişik hızlarda göstermiş olduğu malzeme özellikleri ile doğrudan orantılıdır. Burada testlerde kullanılan 3 nokta eğme UHMWPE numunesinin kalınlığı 4 mm olduğundan dolayı kayma altındaki malzeme davranışı göz ardı edilebilir. Tablo 6.1'den de anlaşılacağı gibi hızlar arttıkça UHMWPE'nin elastik modülünde ciddi bir artış gözlemlenmektedir. Bu artış 3 nokta eğme altındaki ilk elastik ve toplamda da tüm tepkinin artmasında rol oynayan en büyük faktördür. Ayrıca basma altında UHMWPE'nin elastik modülü hıza bağlı olarak çekme ile kıyaslandığında çok büyük değişiklik göstermemektedir. Buradaki çekme elastik modülleri ve basma elastik modülleri arasındaki farkın (Tablo 6.1 ve Tablo 6.2) çok fazla olması ve çekme elastik modüllerinin büyük ölçüde çok daha büyük olması UHMWPE'nin 3 nokta eğme yükleri altındaki davranışını tespit etmede baskın hale

getirmiştir. Fakat UHMWPE'nin basma akma dayanımları ve basma elastik modüllerinin küçük olması da eğilme tepkisi üzerinde bir etkiye sahiptir ve özellikle bu etki teorik hesaplamalarda ve nümerik analizlerde kesinlikle göz önünde bulundurulmalıdır. UHMWPE'nin basma altındaki daha düşük elastik modülleri ve daha düşük akma dayanımları 3 nokta eğme kuvveti altında UHMWPE'nin eğilmeye karşı vermiş olduğu tepkisini düşürmeye çalışırken, çekme altındaki daha yüksek elastik ve akma dayanımları da bunun tam tersini yapmaya çalışmaktadır. Basma ve çekme altındaki bu değişik malzeme davranışı eğme altında oluşacak doğal eksenin malzemenin kesit alanının geometrik olarak tam ortasında değil de çekmenin baskın olduğu orta açıklığın altında doğru olacaktır. Diğer bir ifadeyle doğal eksen geometrik merkezden aşağıya doğru kayacaktır. Özet olarak burada artan hıza bağlı olarak UHMWPE'nin eğrisel tepkisinin artması gerinim oranına bağlı olarak değişen malzeme özellikleri (elastik modülü ve akma dayanımı) ve hidrostatik basınçtan kaynaklı çekme ve basma altındaki değişik malzeme davranışlarıdır. Şekil 6.11'de 3 nokta eğme testlerine tabi tutulana UHMWPE numunelerinin deforme olmuş şekilleri gösterilmiştir. 22 mm eğilmeye maruz bırakılan numuneler üzerinde hasar oluşumunu gösteren bir renk değişimi gözlemlenmemiştir. Ayrıca 22 mm eğilmeye maruz bırakılmalarına rağmen kuvvet kaldırıldıktan sonra plastik deformasyon kurtarma (geri hareket) özelliği göstermişlerdir. Buradan UHMWPE'nin çok eksenli yükler altında büyük plastik deformasyonlara dayanabildiği gerçekliği ortaya konmuştur. Bu da bu malzemenin gerçek dünyadaki uygulamalarda eğilme gibi çok eksenli yükleri taşıyabilecek yapı malzemesi olarak kullanılmasında çok cazip hale getirmektedir. Sağlıklı bir tasarım için değişik hızlar altında ilk önce eğilme testleri gerçekleştirilmeli ve daha sonrasında da eğilme mekaniğinin daha derinlemesine inceleme noktasında nümerik analizler gerçekleştirilmelidir. Nümerik analizlerde yukarıda belirtilen tüm malzeme özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 6.11. 3 nokta eğme deneyi sonrasında deforme olmuş numuneler



Şekil 6.12. 3 nokta eğme hızına bağlı en yüksek eğme kuvvet değişimi

Şekil 6.12’de eğme hızına bağlı olarak değişen en yüksek kuvvet değişimi gösterilmiştir. Bu grafikten de anlaşılacağı gibi eğme hızı artarken malzemenin eğilmeye karşı vermiş olduğu tepki de önemli ölçüde artmaktadır. Diğer bir ifadeyle deformasyon hızı arttıkça malzeme daha sert bir davranış göstermektedir. 0,1 mm/s ve 1 mm/s hızları arasında malzemenin vermiş olduğu tepki 1 mm/s ile 12 mm/s arasında vermiş olduğu tepkiden daha yüksektir. Yani hız yüksek değerlere çıkarken (12 mm/s)

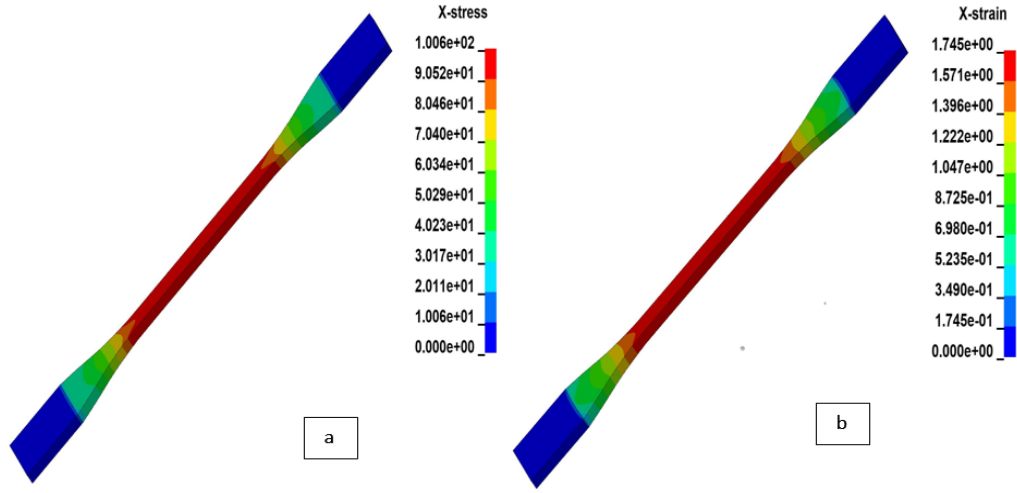
vermiş olduğu tepkide küçük hızlar ile kıyaslandığında bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu durumun tam olarak böyle olduğunu açıklayabilmek için çok daha yüksek hızlarda eğme testleri yapılmalı ve elde edilen veriler ışığında bu durumun gerçekten böyle olup olmadığı ortaya konulmalıdır. Burada yapılan çıkarım bizim bu çalışmada yapmış olduğumuz test hızlarına bağlı olarak yapılan bir çıkarımdır ve bu çalışma için geçerli olan hız aralığı için geçerlidir.

6.2 Nümerik Çalışma Bulguları ve Karşılaştırma

Nümerik çalışmalarda HyperMesh programında oluşturulan modeller LS-DYNA programında SAMP-1 malzeme modeli kullanılarak yapılmıştır. Yapılan nümerik çalışmalarında çekme simülasyonu için aynı şartlarda yapılan çekme deney eğrisi programa tanıtılmış ve gerekli deformasyon parametreleri sisteme girilmiştir. Benzer olarak basma simülasyonu içinde çekme ile aynı şekilde yol izlenerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Farklı olarak 3 nokta eğme simülasyon çalışmasında ise dışarıdan UHMWPE'e ait deneysel çoklu çekme ve en düşük hızda(0.1 mm/s) basma eğrisi girilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Burada çekme ve basmanın bir arada olduğu 3 nokta eğme testi aslında malzemelerin uygulama alanlarında çok eksenli yüklere maruz kaldığı deformasyon şeklidir. Nümerik çalışmalardan elde edilen bulgular ve deneysel veriler ile karşılaştırılmaları, devam eden bölümlerde gösterilmiştir.

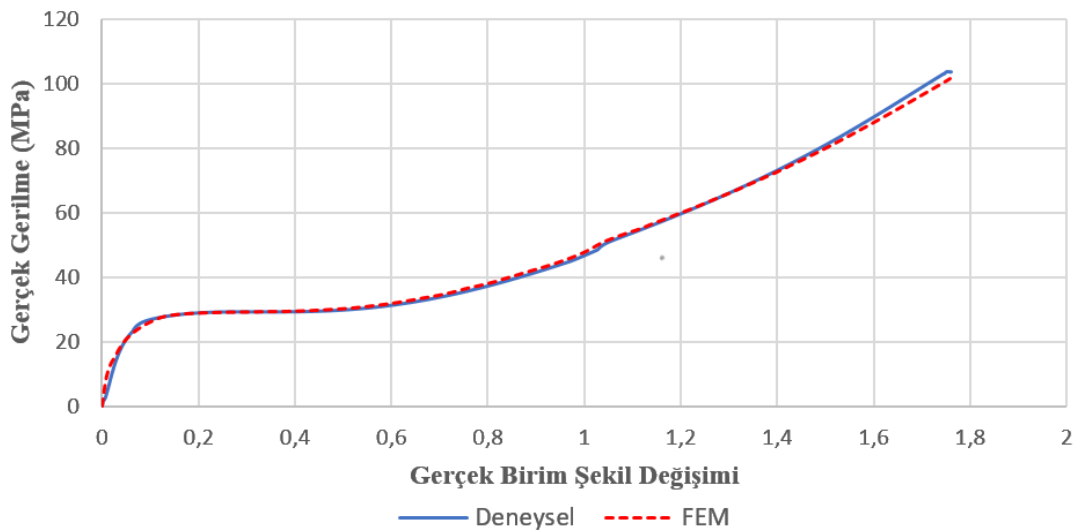
6.2.1 Çekme Deneyi

Şekil 6.13'de UHMWPE 0° çekme simülasyonlarından elde edilen normal gerilme ve buna karşılık gelen normal gerinim değerleri gösterilmiştir. Gerinim değerlerinden anlaşılacağı gibi UHMWPE 0° bu çekme hızı altında çok yüksek plastik deformasyona maruz kalabilme ve bu deformasyonu kırılma olmadan taşıyabilme kapasitesine sahiptir. Malzemenin ölçüm aralığı bölgesinden çok yüksek plastik deformasyondan kaynaklı incelme kolaylıkla görülebilmektedir.



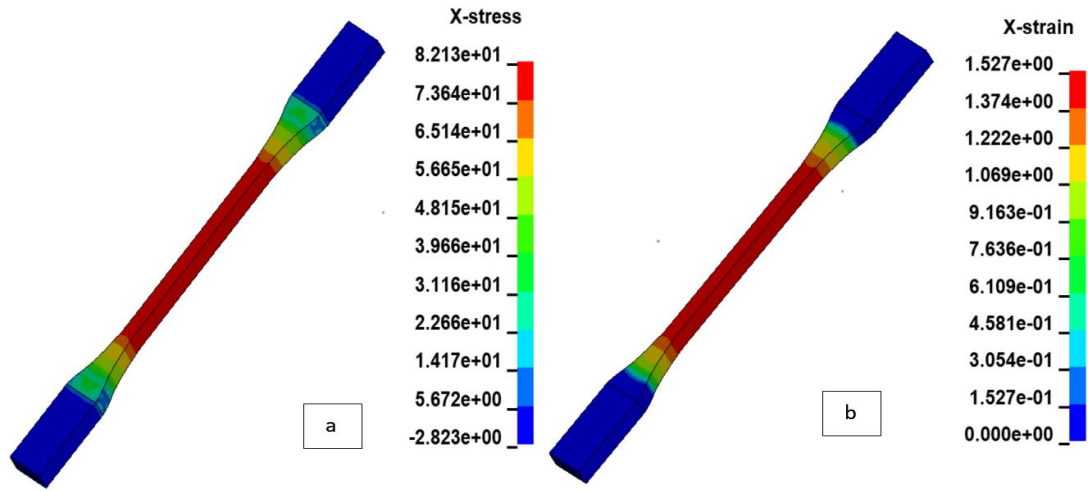
Şekil 6.13. 0.1 mm/s çekme hız için gerilme gerinim dağılımları a) X-stress (normal gerilme) ve b) X-strain değerleri

Şekil 6.14'de UHMWPE 0^0 için 0.1 mm/s çekme hızı altında deneysel olarak elde edilen gerçek gerilme-gerçek gerinim grafiği nümerik olarak elde edilen grafik ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonrasında deneysel gerçek gerilim gerçek gerinim değerleri elde edilen nümerik analiz sonuçları ile tam bir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. UHMWPE 0^0 'nin gerinim yumuşaması ve gerinim yumuşamasını takip eden gerinim sertleşmesi gibi bölgeler SAMP-1 malzeme modeli tarafından yüksek doğrulukla tahmin edilmiştir.

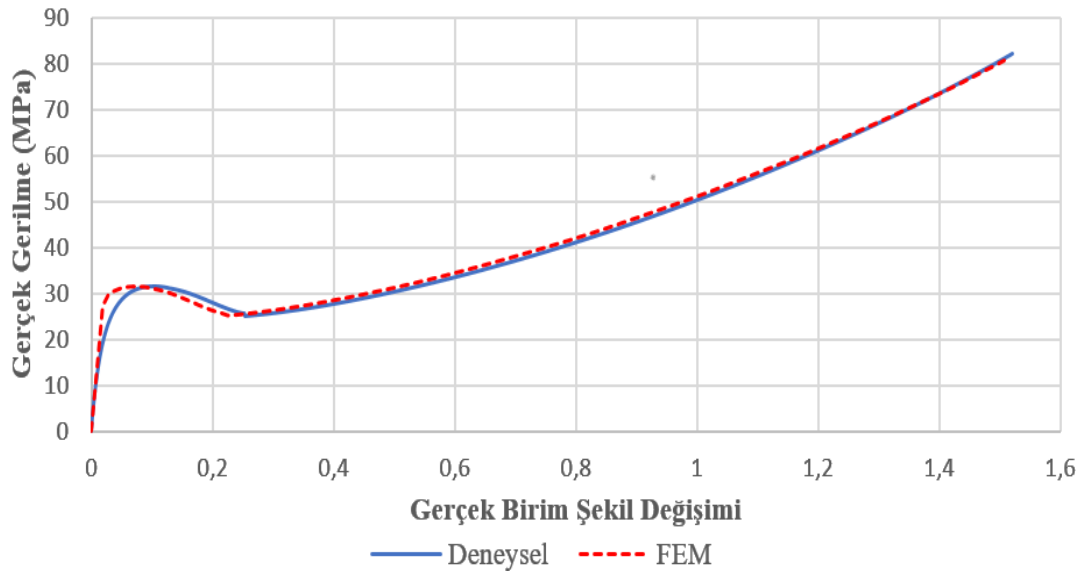


Şekil 6.14. 0.1 mm/s hız için çekme gerilim-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması

UHMWPE 0°'nin 1 mm/s çekme hızı altında gerçekleştirilen nümerik analizlerinden elde edilen normal gerilme buna karşılık gelen normal gerinim dağılımları Şekil 6.15'de gösterilmiştir. Normal gerilim ve buna karşılık gelen gerinim dağılımları ölçüm aralığı bölgesinde Şekil 6.15'den de görüleceği gibi uniformdur. Buradan elde edilen normal gerilim değerleri gerinim değerlerine karşı çizilerek grafiği oluşturulmuş ve elde edilen bu grafik deneysel grafik ile Şekil 6.16'da karşılaştırılmıştır.



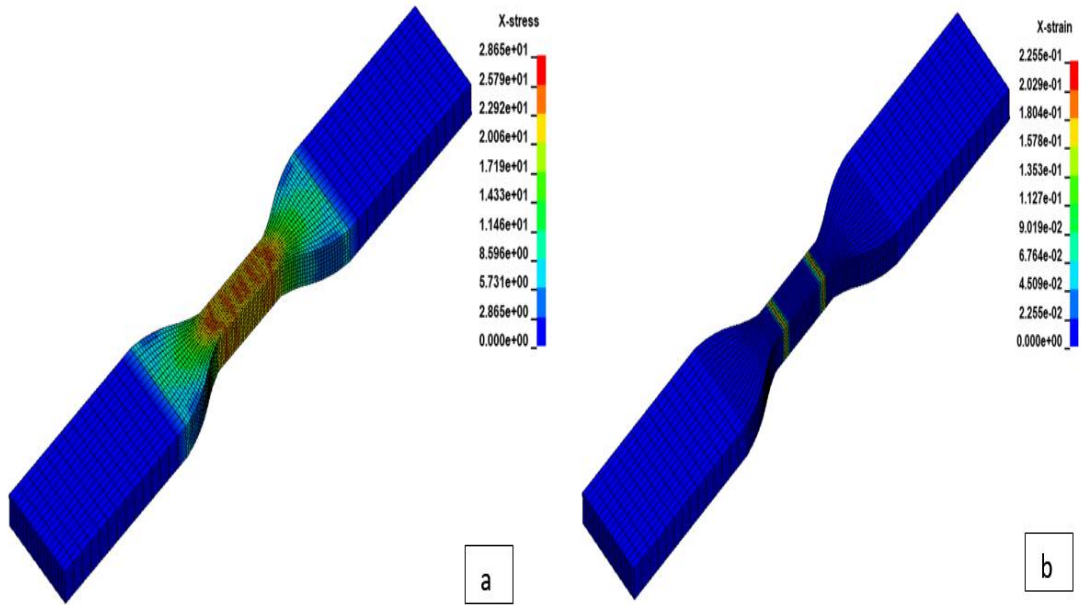
Şekil 6.15. 1 mm/s çekme hız için gerilme gerinim dağılımları a) X-stress (normal gerilme) ve b) X-strain değerleri



Şekil 6.16. 1 mm/s hız için çekme gerilim-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması

Bir önceki hız (0.1 mm/s) için yapılan karşılaştırılmada olduğu gibi burada da kullanılan SAMP-1 malzeme modeli deneysel verileri yakalayabilme de çok üstün bir performans göstermiştir. Bilhassa gerinim yumuşaması bölgesini yüksek doğrulukla yakalayabilmesi polimer malzemeler için yapılan nümerik analizlerde aranan önemli bir özelliktir.

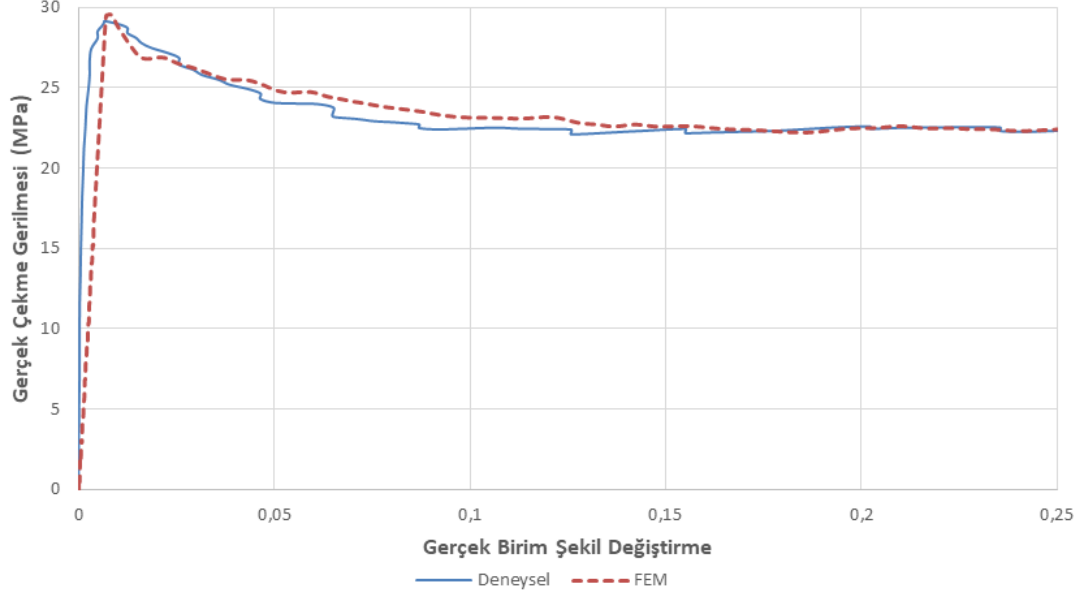
12 mm/s çekme hızı için gerçekleştirilen nümerik analizlerden elde edilen normal gerilme ve buna karşılık gelen normal gerinim dağılımları Şekil 6.17’de gösterilmiştir. Önce ki diğer iki hız ile kıyaslandığında bu hızda daha az plastik deformasyon olduğundan dolayı ölçüm aralığındaki daralma daha az belirgindir. Nümeriksel olarak elde edilen gerilme-gerinim eğrisi deneysel olarak elde edilen gerilme-gerinim eğrisi ile Şekil 6.18’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.17. 12 mm/s çekme hız için gerilme gerinim dağılımları a) X-stress (normal gerilme) ve b) X-strain değerleri

Şekil 6.18’den anlaşıldığı gibi 12 mm/s çekme hızı altında deneysel olarak elde edilen çekme gerilme-gerinim eğrisi nümerik analizler sonucunda çok yüksek uyumlulukla yeniden elde edilmiştir. Burada malzeme üst akma sınırından sonra gerilimde sürekli düşüş yaşadığından dolayı ve üst akma noktası yerel plastik deformasyonun başladığı yer olmasından dolayı Şekil 6.17’de gösterilen normal gerilim dağılımı ve buna karşılık gelen gerinim dağılımı uniform değildir. Diğer bir ifadeyle yerel plastik deformasyon başladığında zincirler etrafında oluşan boşluklar gerinim yumuşamasını

takip eden gerinim sertleşmesi özelliği bu hızda görünmediği için oluşan boşluklar ölçüm aralığına doğru ilerleme özelliği gösterememiştir. Bu durum 12 mm/s hızda çekme testine tabi tutulup kırılan gerçek test numunesinde de gösterilmiştir(Bkz. Şekil 6.3a).



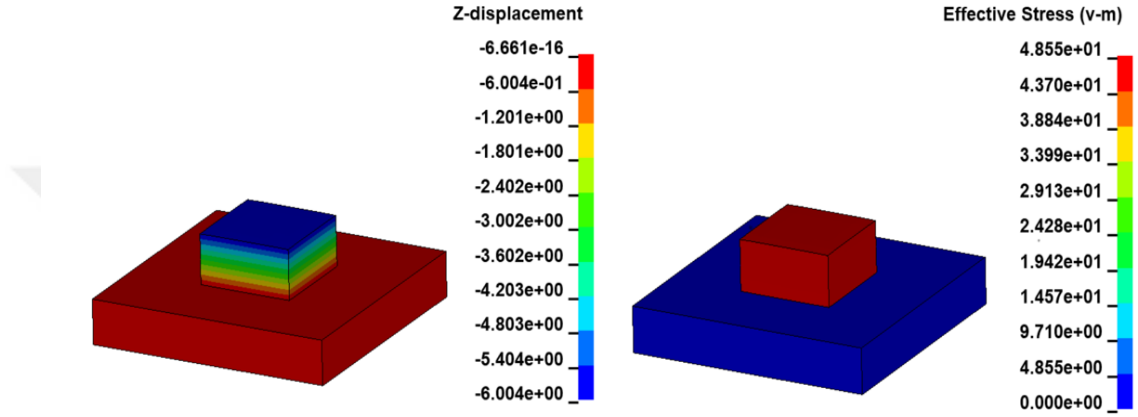
Şekil 6.18. 12 mm/s hız için çekme gerilim-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması

Burada yapılan nümerik analiz bulgularına ve karşılaştırmalara dayanarak özet olarak aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Tüm çekme hızları için deneysel olarak elde edilen gerçek gerilim-gerinim eğrileri SAMP-1 malzeme modeli tarafından yüksek doğrulukla elde edilmiştir.
- SAMP-1 malzeme modeli UHMWPE malzemesinin çekme altında göstermiş olduğu elastik ve özellikle gerinim yumuşaması ve gerinim yumuşamasını takip eden gerinim sertleşmesi malzeme özelliklerini yüksek uyumlulukla elde etmiştir.
- Gerinim yumuşaması malzemede yerel plastik deformasyonun başladığı bölgedir ve bu bölgenin yüksek doğrulukla nümerik analizler ile elde edilmesi nümerik analizlerin nihai sonucunu doğrudan etkilemektedir.
- Deneysel verilere dayanarak değişik hızlar için hesaplanmış olduğumuz çekme elastik modülleri burada yapılan simülasyonlar ile de doğrulanmıştır.

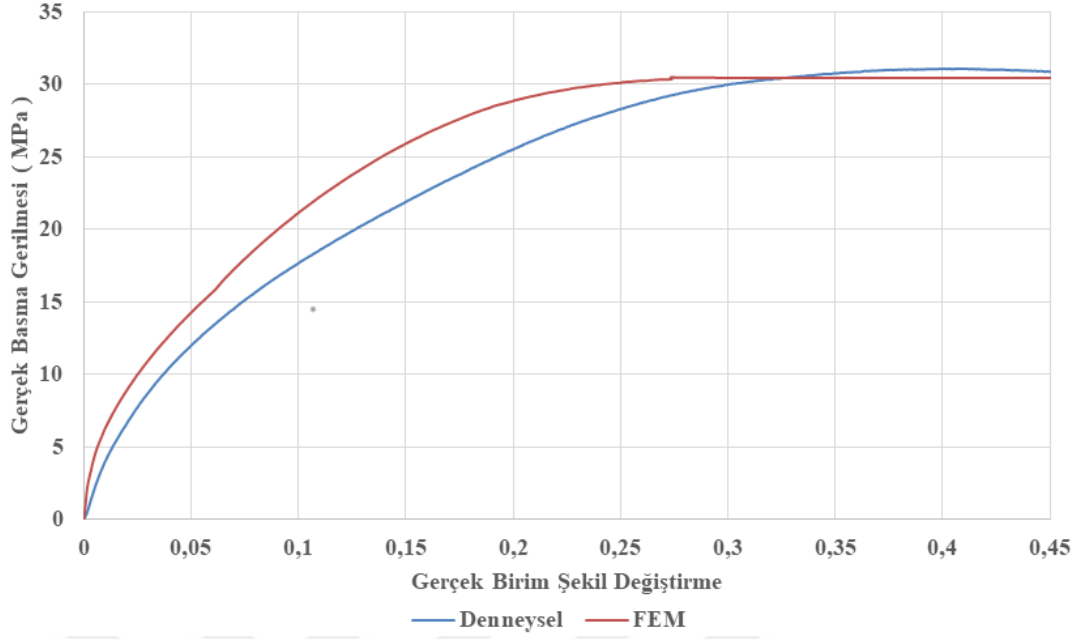
6.2.2 Basma Deneyi

Basma testlerinin nümerik analizlerinden elde edilen yer değiştirme efektif gerilim efektif gerilim dağılımları ve karşılaştırmaları bu bölümde aşağıdaki gibi verilmiştir. Şekil 6.19’da 0.1 mm/s hız altında gerçekleştirilen ve basma test simülasyonlarından elde edilen yer değiştirme ve buna karşılık gelen efektif gerilim dağılımları gösterilmiştir. Burada numune 6 mm basmaya zorlanmıştır.



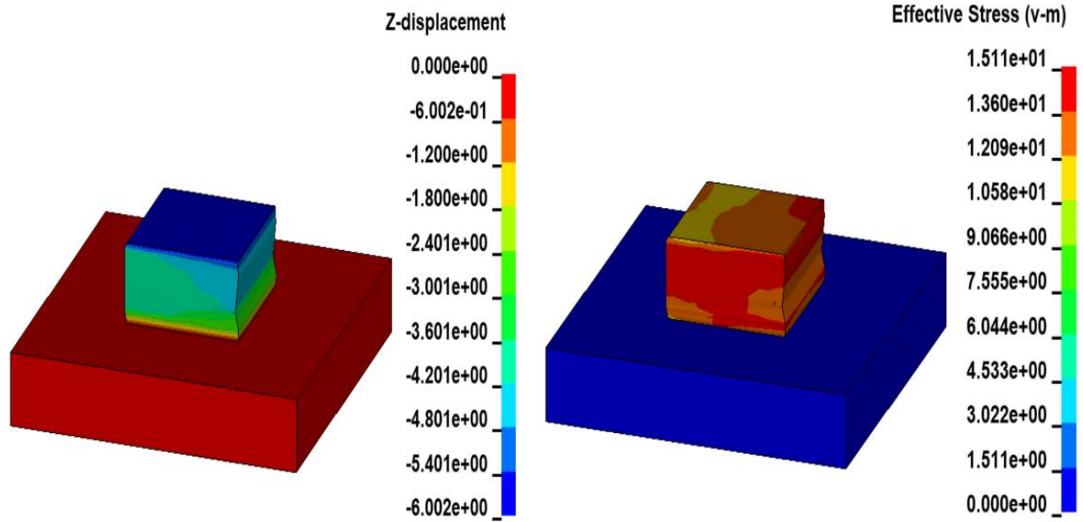
Şekil 6.19. 0.1 mm/s hız için yer değiştirme ve karşılık gelen von Mises gerilim dağılımları

Deneysel olarak elde edilen gerçe gerilim-gerinim eğrisi nümerik olarak elde edilen eęri ile Őekil 6.20’de gösterilmiştir. Őekil 6.20’de görüldüğü gibi basma altında gerçekleşen elastik tepki SAMP-1 malzeme modeli tarafından tutarlı bir şekilde yakalanamamıştır. Bunun nedeni Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de sırasıyla gösterilen çekme elastik modülü ve basma elastik modülü arasındaki büyük fark olmasıdır. Burada basma simülasyonlarında SAMP-1 malzeme modelinin genel özelliğinden dolayı basma akma modülü değil de çekme elastik modülünü kullanmasıdır. Burada simülasyonda elastik modülü olarak 1169 Mpa kullanılmıştır. Bu değer de 0.1 mm/s hız altında gerçekleştirilen çekme test verilerinden elde edilen değerdir. Burada bu değerin sečilmesinin nedeni çekme hızı arttıka çekme elastik modülünün büyümesi ve bu büyümenin de basma elastik modülü ile aralarında olan farkın büyümesidir. Özet olarak basma elastik modülüne en yakın olan çekme elastik modülü 0.1 mm/s hız altında gerçekleştirilen çekme test deneylerinden elde edilen modüldür.



Şekil 6.20. 0.1 mm/s hızda nümerik ve deneysel eğrilerin karşılaştırılması

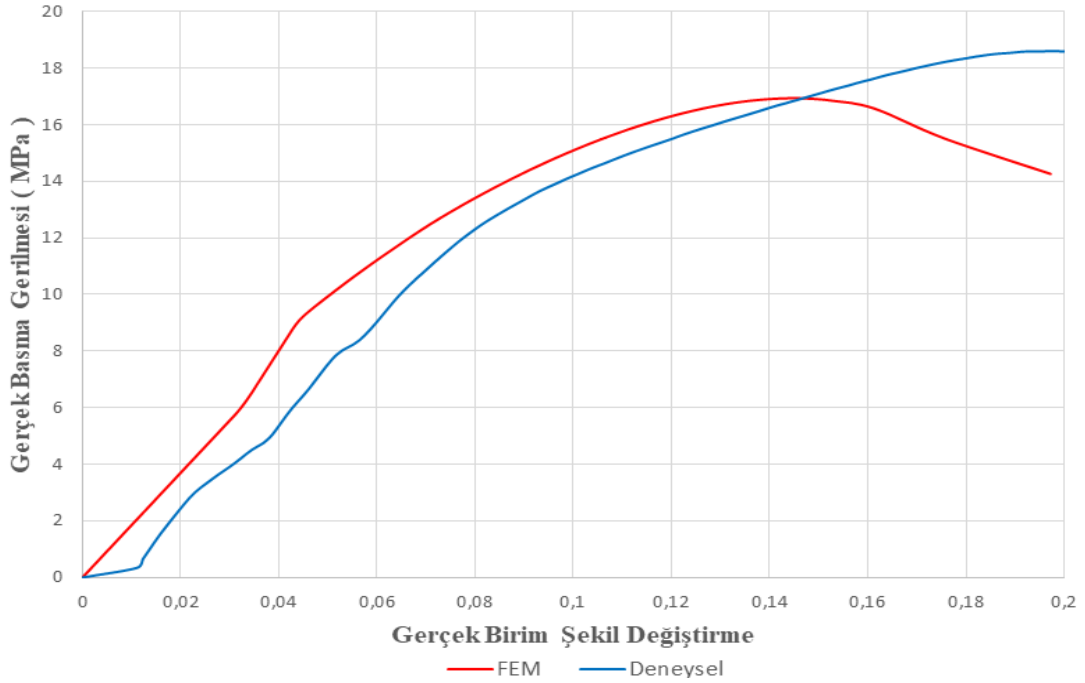
1 mm/s hız altında gerçekleştirilen basma test simülasyonlarına bağlı olarak elde edilen yer değiştirme ve karşılık gelen efektif gerilim Şekil 6.21’de gösterilirken, sonlu elemanlar bağlamında elde edilen gerilme-gerinim eğrisini deneysel olarak elde edilen eğri ile karşılaştırılması Şekil 6.22’de gösterilmiştir.



Şekil 6.21. 1 mm/s hız için yer değiştirme ve karşılık gelen von Mises gerilim dağılımları

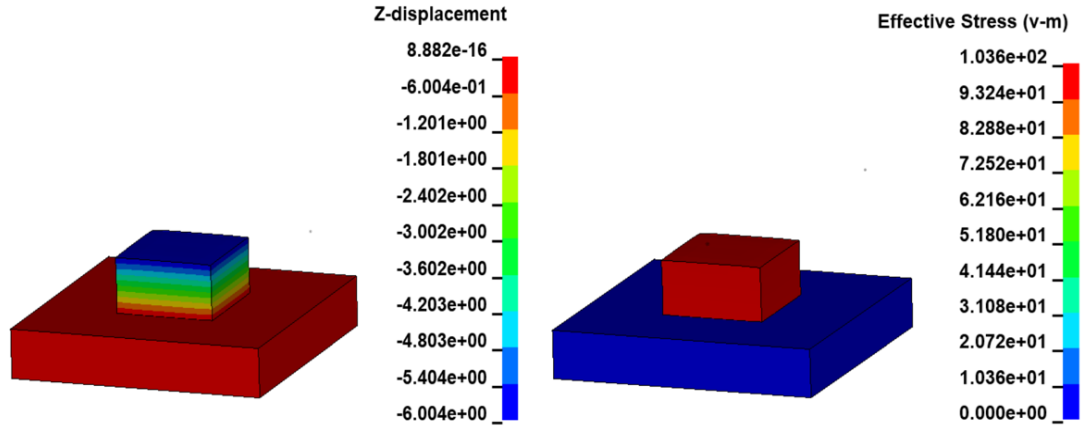
Bir önceki hızda (0.1 mm/s) olduğu gibi buradaki basma hızında da elastik bölgenin Şekil 6.22’den de anlaşılacağı gibi SAMP-1 tarafından yeterli doğrulukta

yakalanamadığı görülmektedir. Buradaki durum yine malzeme modelinde kullanılan elastik modülünün basma elastik modülü değil de çekme elastik modülü olmasından kaynaklanmaktadır. Buna rağmen genel olarak basma altında ki gerçek gerilim-gerinim eğrisi 1 mm/s hız için SAMP-1 malzeme modeli tarafından kabul edilebilir doğrulukta tespit edilmiştir. Burada bu modelin basma simülasyonlarında basma modülü yerine çekme modülü kullanması bu modelin bir kısıtlamasıdır. İlave olarak Tablo 6.2’de de daha önce verildiği gibi basma elastik modülü hıza göre değişmektedir ve bu değişimde SAMP-1 tarafından hesaplamaların içine dahil edilmektedir. Bu da SAMP-1 malzeme modeli bağlamında diğer bir kısıtlamadır.



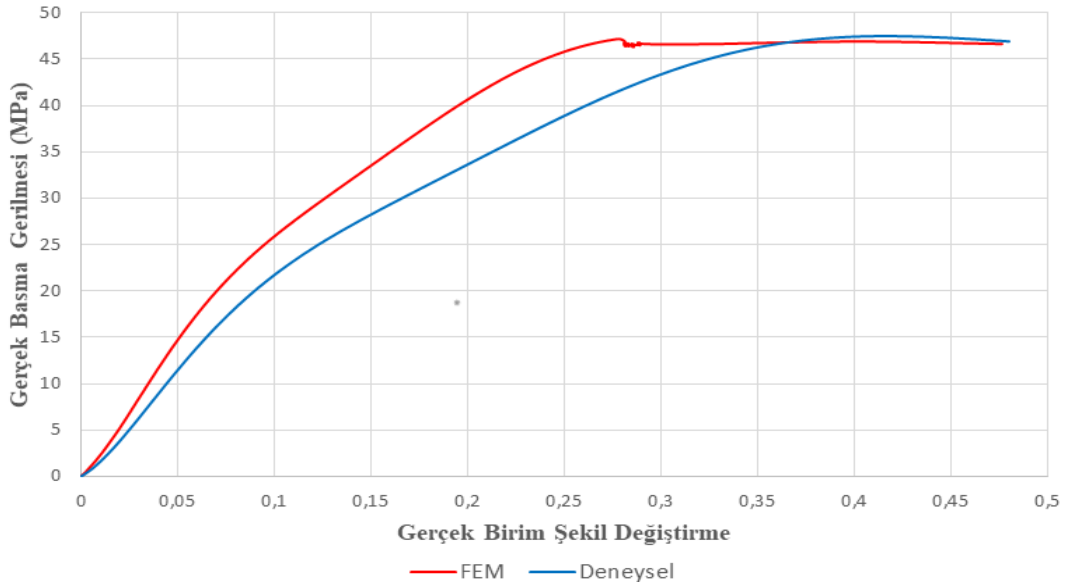
Şekil 6.22. 1 mm/s hızda nümerik ve deneysel eğrilerin karşılaştırılması

Şekil 6.23’de 12 mm/s basma hızı için sonlu elemanlar kapsamında elde edilen yer değiştirme ve buna karşılık gelen efektif gerilim dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 6.23. 12 mm/s hız için yer değiştirme ve karşılık gelen von Mises gerilim dağılımları

SAMP-1 malzeme modeli ile nümerik olarak elde edilen gerilme-gerinim eğrisi deneysel olarak ölçülen gerilme-gerinim eğrisi ile Şekil 6.24’de karşılaştırılmıştır. Diğer iki hızda da olduğu ve beklendiği gibi burada da elastik bölge malzeme modeli tarafından istenilen doğrulukta yakalanamamıştır. Fakat buradaki karşılaştırmadan SAMP-1 malzeme modelinin 12 mm/s basma hızı için UHMWPE’nin deneysel gerilme-gerinim eğrisini kabul edilebilir ölçüde yeniden elde edebildiği sonucu çıkarılabilir.



Şekil 6.24. 12 mm/s hızda nümerik ve deneysel verilerin karşılaştırılması

Basma testi nümerik verilerine ve bunların deneysel veriler ile karşılaştırılmasına bağlı olarak aşağıda yazılı olan çıkarımlar yapılabilir:

- Çekme ve basma altındaki elastik modüllerinin önemli ölçüde değişmesi basma gerilim-gerinim eğrilerindeki lineer elastik bölgeyi istenilen doğrulukta elde edememeye yol açmıştır. Bu SAMP-1 malzeme modelinde karşımıza çıkan ve modele has olan bir kısıtlamadır.
- Genel olarak tüm hızlar için deneysel basma gerilim-gerinim eğrileri, sonlu elemanlar bağlamında SAMP-1 malzeme modeli kullanılarak kabul edilebilir doğrulukta yeniden elde edilmiştir.

6.2.3 3 Nokta Eğme Deneyi

3 nokta eğme nümerik analizlerinde daha önce belirttiğimiz gibi dışarıdan çoklu çekme plastik gerinim-gerilim eğrileri ile birlikte en düşük basma hızı altında elde edilen basma plastik gerilim-gerinim eğrisi SAMP-1 malzeme modelinde kullanılmıştır. Burada dışarıdan verilen eğrilere göre SAMP-1 malzeme modeli Drucker-Prager akma yüzeyi formülasyonuna göre hesaplamaları yapmıştır. Burada Drucker-Prager formülasyonu aracılığı ile gerinim oranına bağlı UHMWPE'nin farklı davranışlarına ilave olarak basma ve çekme altındaki farklı davranışları da göz önünde bulundurulmuştur. Drucker-Prager'dan farklı olarak basma eğrisi SAMP-1 malzeme modelinden çıkarılarak nümerik analizlerin von Mises akma yüzeyine göre hesaplama yapılması sağlanmıştır. Burada amaçlanan von Mises basma ve çekme altında malzeme davranışlarını aynı kabul ettiğinden dolayı farklı davranışların eğme tepkisi üzerindeki etkisini nümerik analiz bağlamında ortaya koymaktır.

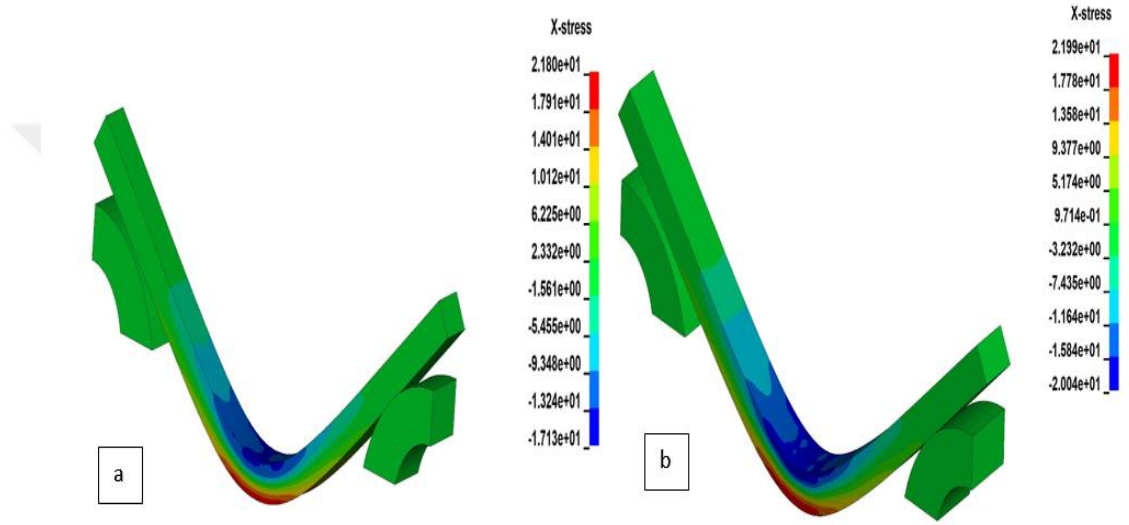
Tablo 6.3. Nümerik analizlerde kullanılan değerler tablosu

	E (Mpa)	Poisson Oranı	Çekme Eğrisi	Basma Eğrisi
Drucker-Prager	2275	0.46	Şekil 6.1a	Şekil 6.7
von Mises	2275	0.46	Şekil 6.1a	X

Drucker-Prager ve von Mises malzeme modelleri için SAMP-1 de kullanılan değerler tablo 6.3'de gösterilmiştir. Tablo 6.3'de gösterilen ve nümerik analizlerde kullanılan elastik modülü değeri olan E 2275 Mpa üç ayrı çekme hızı altında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen çekme elastik değerlerin ortalamasıdır. SAMP-1 malzeme modeli UHMWPE gibi polimer malzemelerin gerinim oranına bağlı elastik

modüllerini hesaplamalarda göz önünde bulundurmadığı için literatüre uygun olarak elastik modüllerinin ortalaması alınmıştır (Dundar ve ark., 2020; Dundar ve Dhaliwal, 2020b). İlave olarak poisson oranı UHMWPE için 0.46 olarak literatürden elde edilmiştir (Bartel DL, Rawlinson JJ, Burstein AH, Ranawat CS ve WF., 1995; Zhang ve ark., 2020).

Sonlu elemanlar bağlamında 0.1 mm/s eğilme hızı için elde edilen normal gerilme değerleri şekil 6.25’de gösterilmiştir.

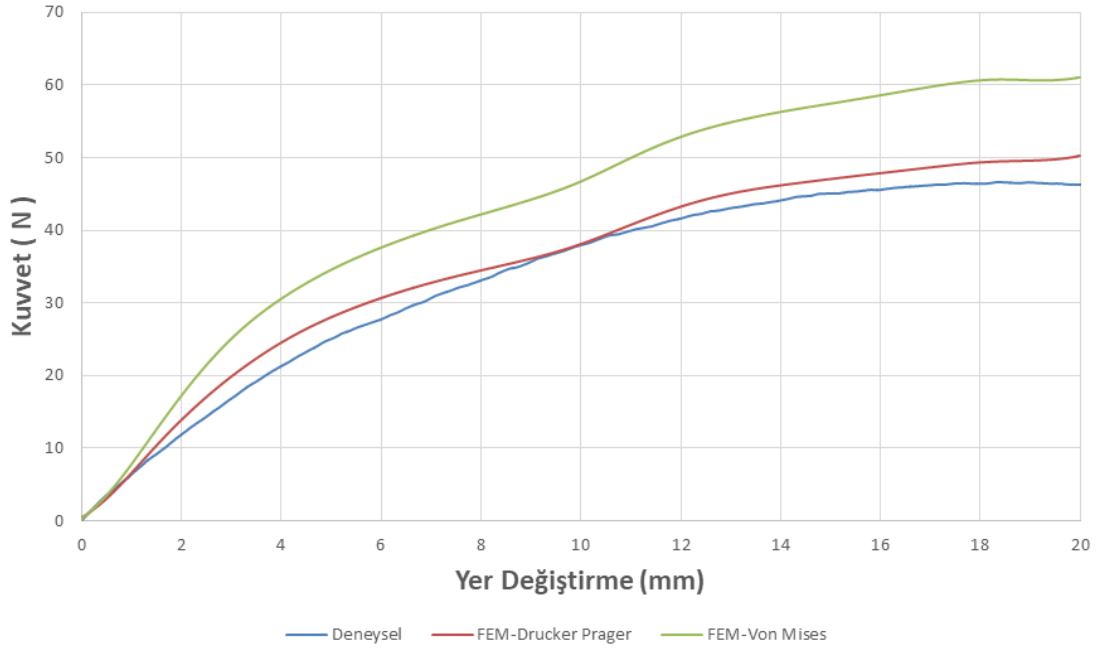


Şekil 6.25. 0.1 mm/s eğilme hızı altında (a) Drucker-Prager ve (b) von Mises çözümleri için X-stress dağılımı

Şekil 6.25’de görüldüğü gibi basma ve çekme altında farklı malzeme davranışlarını hesaplamaların içerisine alan Drucker-Prager formülasyonunda en yüksek basma ve çekme gerilmeleri arasında önemli bir fark oluşurken von Mises formülasyonunda bu durum gözlemlenmemektedir. Bu beklenen bir sonuçtur.

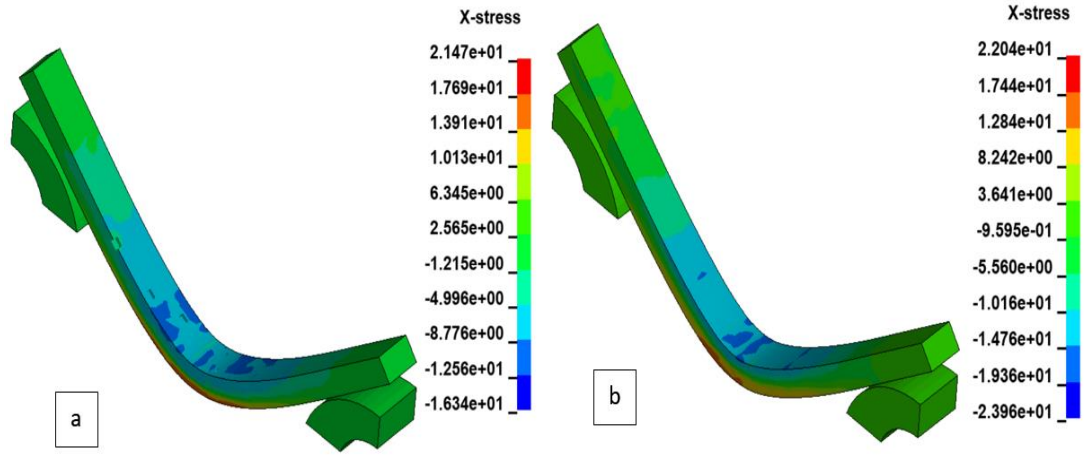
Şekil 6.26’da 0.1 mm/s eğilme hızı için deneysel kuvvet-yer değiştirme eğrisi nümerik analizlerden elde edilen eğriler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.26’dan da anlaşılabilirdiği gibi farklı malzeme davranışlarının SAMP-1 malzeme modeli ile hesaplamaların içerisine alınması deneysel veriler ile olan uyumu önemli ölçüde artırmıştır. Diğer bir ifadeyle nümerik analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile önemli bir uyum içerisindedir. Bu durum von Mises formülasyonu kullanılarak elde edilen nümerik analiz sonuçları için kesinlikle söylenemez. Burada von Mises formülasyonu en yüksek eğilme kuvvetinin deney ile karşılaştırıldığında çok yüksek olarak tahmin etmiştir. Bu yüksek

tahminin arkasında yatan temel sebep UHMWPE'nin çekme altında basmaya göre dayanımının yüksek olması ve bu yüksek dayanımın basma için de aynı kabul edilmesidir. Diğer bir ifadeyle UHMWPE'nin malzeme davranışı sadece çekme testlerinde elde edilen veriler kullanarak nümerik analizlerinin gerçekleştirilmesi bu malzemenin gerçekte çok eksenli yüklemeler altında daha düşük olması gereken dayanımını arttırmakta bu da yüksek eğilme kuvvetlerinin oluşmasına yol açmaktadır.

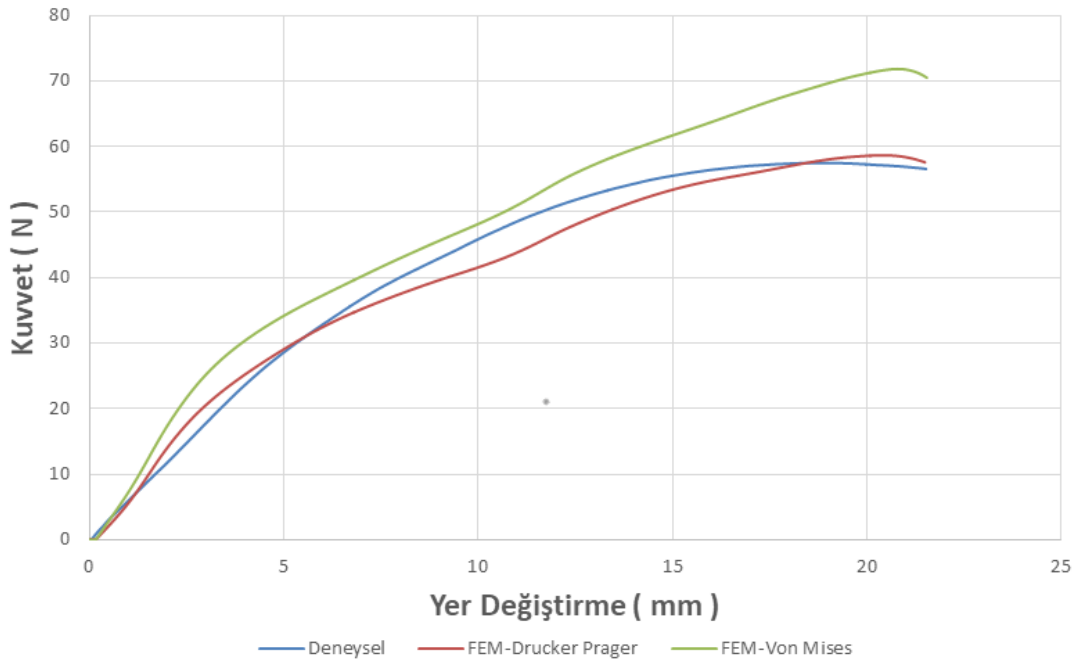


Şekil 6.26. 0.1 mm/s eğilme hızı altında deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması

1 mm/s eğilme hızı için gerçekleştirilen nümerik analizleri sonuçlarında elde edilen normal gerilme dağılımları von Mises ve Drucker-Prager için Şekil 6.27'de gösterilmiştir. Bir önceki eğilme hızında olduğu gibi burada da Drucker-Prager formülasyonu kullanıldığı noktada basma ve çekme altındaki en yüksek normal gerilim değerlerinin arasındaki farkın von Mises ile kıyaslandığında çok büyük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.27. 1 mm/s eğilme hızı altında (a) Drucker-Prager ve (b) von Mises çözümleri için X-stress dağılımı

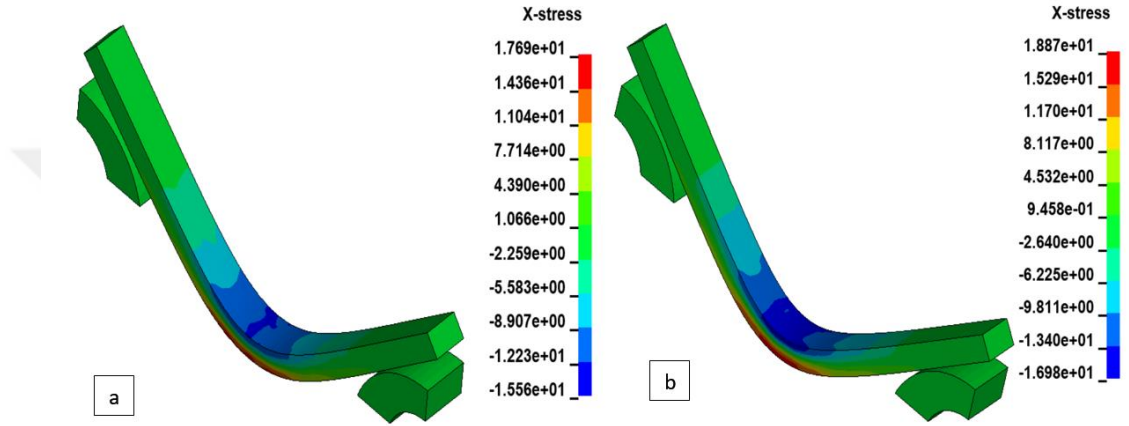


Şekil 6.28. 1 mm/s eğilme hızı altında deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması

Şekil 6.28’de deneysel olarak 1 mm/s eğilme hızı için elde edilen deneysel eğri ile nümerik analizlerden elde edilen eğrileri karşılaştırılmıştır. Burada von Mises formülasyonu deney verilerini sonlu elemanlar bağlamında kabul edilebilir bir doğrulukta tahmin edemezken, tam tersi durum Drucker-Prager formülasyonu için geçerlidir. Diğer bir ifadeyle deneysel veriler ile Drucker-Prager nümerik analiz sonuçları birbirleri ile çok yüksek bir uyum içerisindedir. Burada eğme hızını 0.1 mm/s den 1 mm/s ye çıkarmak deformasyon esnasında oluşan gerinim oranını da

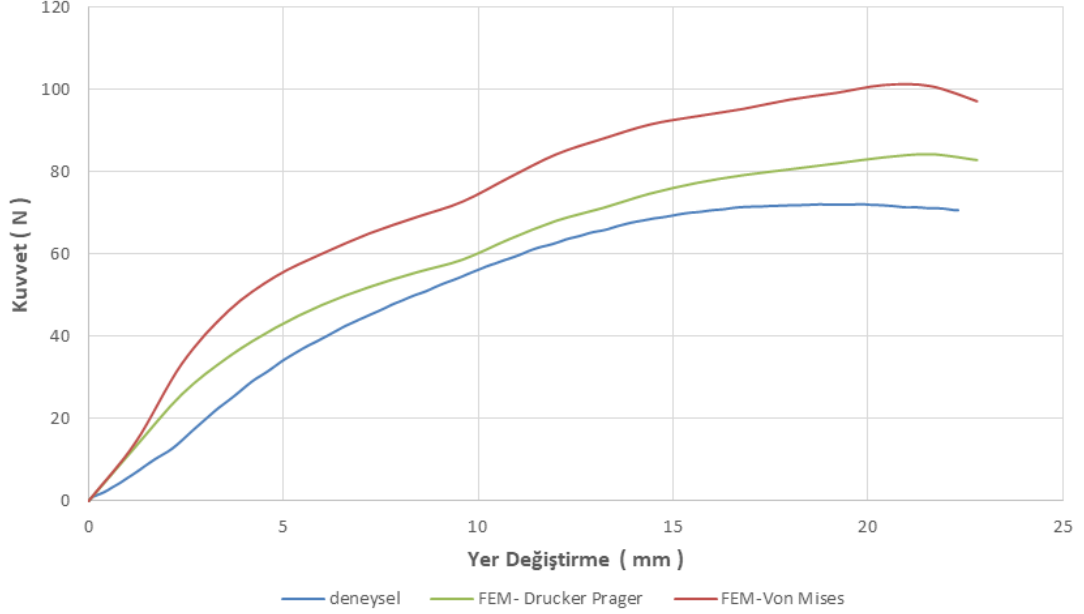
arttırmaktadır ve bu karşılaştırmaya göre UHMWPE'nin gerinim oranına bağlı değişik malzeme davranışı SAMP-1 malzeme modeli tarafından yakalanmıştır.

Sonlu elemanlar bağlamında SAMP-1 malzeme modelinde kullanılan Drucker-Prager ve von Mises formülasyonlarına göre elde edilen normal gerilme dağılımları Şekil 6.29'da gösterilmiştir. İlave olarak deneysel kuvvet yer değiştirme eğrisi bu hız için nümerik eğriler ile Şekil 6.30'da karşılaştırılmıştır.



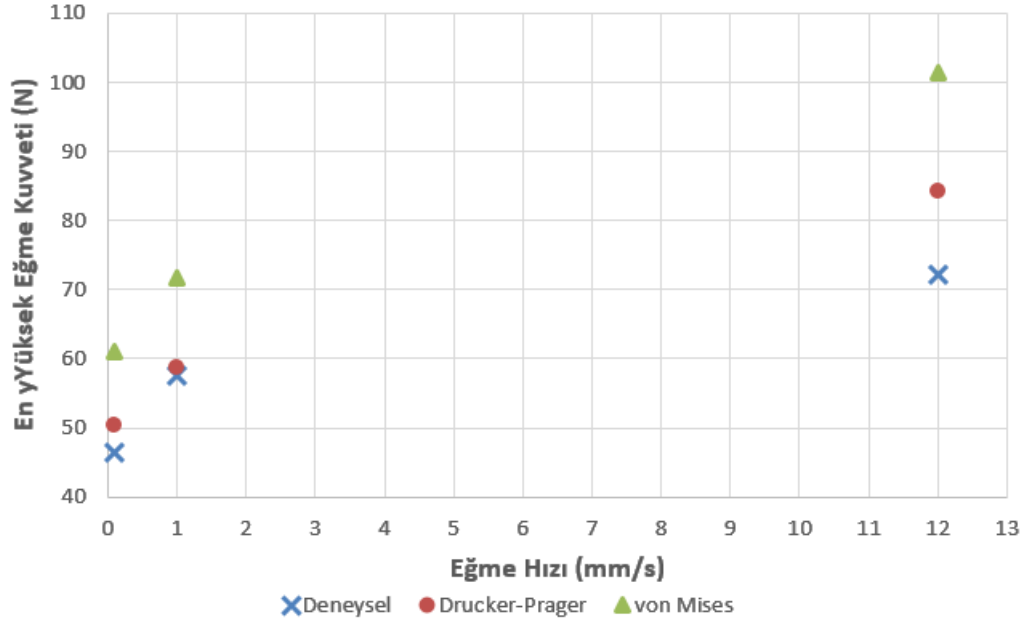
Şekil 6.29. 12 mm/s eğilme hızı altında (a) Drucker-Prager ve (b) von Mises çözüm yöntemleri için X-stress dağılımı

Drucker-Prager'a dayalı SAMP-1 malzeme tarafından hesaplamalardan elde edilen kuvvet yer değiştirme eğrisi deneysel eğri ile yüksek bir uyumluk içerisindeyken von Mises formülasyonuna dayalı eğri tam bir uyumsuzluk içerisindeydi. Diğer iki hız ile karşılaştırıldığında von Mises formülasyonuna dayalı elde edilen eğri, deneysel eğri ile kıyaslandığında çok daha fazla bir uyumsuzluk göstermiştir. Burada hız artarken von Mises formülasyonunun deneysel eğme kuvveti yer değiştirme eğrilerini tahmin edebilme kabiliyetinin daha da azaldığı çıkarımı yapılabilir. Drucker-Prager formülasyonu bağlamında sabit elastik modülün kullanılması 3 nokta eğme altında UHMWPE'nin vermiş olduğu ilk elastik tepkiyi yakalayamamasına neden olmuştur. Elastik tepki bağlamında bu hızda karşımıza çıkan durum önceki diğer iki hızda bu kadar belirgin değildir. Bunu sebebinin çok daha iyi irdelenebilmesi için çok daha yüksek hızlarda eğilme testleri ve bu testlerin nümerik analizleri yapılarak karşılaştırılmaları yapılmalıdır.



Şekil 6.30. 12 mm/s eğilme hızı altında deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması

Deneysel, Drucker-Prager ve von Mises en yüksek eğme kuvvetleri Şekil 6.31’de gösterildiği gibi birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Burada simülasyonlarda kullandığımız Drucker-Prager formülasyonu hata oranı (0.1 mm/s için %8, 1 mm/s için %2 ve 12 mm/s için %16) bakımından en yüksek eğme kuvvetleri açısından deneysel veriler ile tam bir mutabakat içerisinde iken von Mises yüksek hata oranları (0.1 mm/s için %31, 1 mm/s için %24 ve 12 mm/s için %40) ile en yüksek eğme kuvvetlerini hesaplamıştır. Özellikle en yüksek eğme hızı olan 12 mm/s’de von Mises en yüksek eğme kuvvetini çok yüksek hata oranı (%40) ile tahmin etmiştir. Yine aynı hızda Drucker-Prager formülasyonundaki hata oranı (%16) diğer daha küçük hız ile karşılaştırıldığında daha fazladır. Burada karşımıza çıkan bu durum SAMP-1 malzeme modelinin kısıtlaması ile alakalıdır. SAMP-1 malzeme modeli basma eğrisinin çoklu çekme eğrilerine göre sürekli yükselttiğinden dolayı burada en yüksek eğme kuvveti 12 mm/s için deneysel veriden kabul edilebilir seviyede yüksek hesaplanmıştır. Şekil 6.7’den de anlaşılacağı gibi UHMWPE’nin basma altındaki dayanımı basma hızına bağlı olarak sürekli artış göstermemektedir.

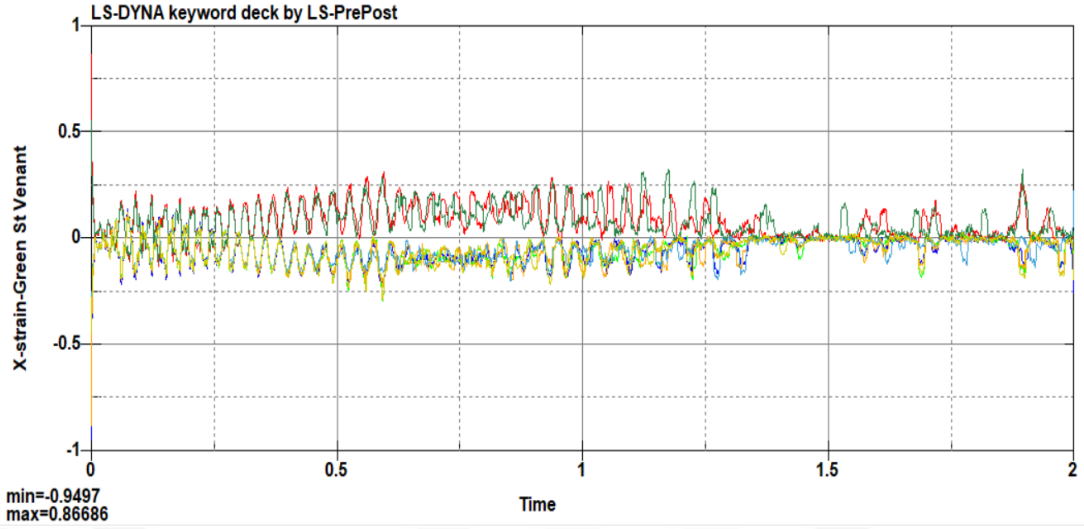


Şekil 6.31. En yüksek eğme kuvvetlerinin karşılaştırılması

Tablo 6.4. En yüksek eğme kuvvetlerinin karşılaştırma tablosu

	0,1 mm/s	1 mm/s	12 mm/s
Deneyisel	46.5	57.5	72.1
Drucker-Prager	50.3	58.6	84.2
Von Mises	61.1	71.8	101.4

Şekil 6.32’de 3 nokta eğilme testlerinde kullanmış olduğumuz malzeme üzerinde üretmiş olduğu gerinim oranı 0.9497 s^{-1} olarak bulunmuştur. Bu değer bizim SAMP-1 malzeme modelinde deneylerde kullandığımız en yüksek hız için gerinim oranımız olan 1.2 s^{-1} değerini geçmemektedir. Bu da nümerik analizlerimizde izlenen yolun doğruluğunu göstermektedir.



Şekil 6.32. 12 mm/s eğme hızı altında nümerik olarak elde edilen en yüksek gerinim oranı

Burada 3 nokta eğme testlerin nümerik analizlerinden elde edilen sonuçlara ve yapılan karşılaştırmalara dayanarak aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Artan 3 nokta eğme hızı ile birlikte UHMWPE'nin vermiş olduğu tepkide artmaktadır. 3 nokta eğme gibi çok eksenli yükler altında SAMP-1 malzeme modelinde kullanılan Drucker-Prager yaklaşımı deneysel veriler ile karşılaştırıldığında büyük uyumluluk sağlamaktadır. Buradan SAMP-1 malzeme modelinin UHMWPE'nin gerinim oranına bağlı malzeme davranışlarını ve basma ve çekme altındaki değişik davranışları hesaba katarak doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.
- Von Mises yaklaşımı deneysel veriler ile karşılaştırıldığında tutarlı sonuçlar vermemektedir. Bu duruma sebep olan etken von Mises yaklaşımının basma ve çekme altındaki değişik malzeme davranışlarını hesaba katmamasıdır.
- Burada SAMP-1 deki Drucker-Prager yaklaşımı kullanılarak 3 nokta eğme altındaki UHMWPE'nin mekaniksel davranışını yüksek doğrulukla tahmin etmek, kullanılan malzeme modelinin ve malzeme modelinde kullanılan test verilerinin(çoklu çekme ve basma) doğrulandığı anlamına gelmektedir.

7 SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALARA ÖNERİLERİ

Bu tez kapsamında UHMWPE yarı kristal malzemesi üzerinde yapılan mekanik testlerden ve gerçekleştirilen nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- UHMWPE'nin basma ve çekme altındaki elastik ve plastik malzeme özellikleri gerinim oranına bağlı olarak önemli değişiklikler göstermektedir. Çekme altındaki elastik modülü çekme hızına paralel olarak sürekli artış gösterirken basma altındaki değişim çok kararsız ve düzensizdir. İlave olarak çekme ve basma altındaki akma dayanımlarındaki değişimler gerinim oranına bağlı olarak çok düzensiz bir şekilde değişmektedir.
- Tüm hızlar için çekme altındaki elastik modülü basma altındaki elastik modülünden her zaman daha yüksektir. Ayrıca üst akma dayanımları içinde aynı durum söz konusudur. Buradan UHMWPE'nin çekme yükleri altında daha fazla yük taşıyabilme kapasitesine sahip olduğu çıkarımı çok rahatlıkla çıkarılabilir.
- Ekstrüzyon yönünün (UHMWPE 0° ve UHMWPE 90°) çekme altında malzemenin elastik ve plastik malzeme özelliklerini önemli ölçüde etkilemediği gözlemlenmiştir. Bu gözleme dayanarak UHMWPE'nin neredeyse hiç anizotropik malzeme özelliğine sahip olmadığı çıkarımına varılmıştır.
- 3 nokta eğme hızları arttıkça UHMWPE'nin eğilmeye karşı vermiş olduğu tepki de önemli ölçüde artmıştır. Diğer bir ifadeyle daha yüksek eğilme hızları altında UHMWPE daha dayanıklı bir malzeme özelliği göstermiştir. 3 nokta eğme testlerinde UHMWPE 22 mm eğilmeye zorlanmasına rağmen malzemede fiziksel olarak hiçbir hasar gözlemlenmemiştir. Değişik malzeme kullanımlarının olduğu ve eğilmeye karşı dirençli olmasının istendiği malzeme ihtiyacını karşılama noktasında, UHMWPE malzemesi bu özelliğinde dolayı uygun ve önemli bir alternatif olabilir.
- Çekme testlerinde kullanılan SAMP-1 malzeme modeli UHMWPE'nin vermiş olduğu elastik tepki ile birlikte gerinim yumuşaması ve gerinim yumuşamasını takip eden gerinim sertleşmesi gibi iki önemli malzeme davranışını çok yüksek hassasiyetle yakalamıştır.
- Basma testlerinin nümerik analizlerinden gelen sonuçlar neticesinde ilk basma elastik tepkisinin tüm hızlar için doğru bir şekilde yakalanamadığı

gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise SAMP-1 malzeme modelinin sabit bir elastik modülü kullanmasından kaynaklanmaktadır. Bu sabit elastik modülü SAMP-1 malzeme modelinin karakteristikliğinden kaynaklanan basma değil de çekme elastik modülünü kullanmasıdır.

- UHMWPE'nin 3 nokta eğilme altında göstermiş olduğu gerçek davranışı SAMP-1 malzeme modeli kullanılarak nümerik olarak incelenmiştir. SAMP-1 malzeme modelinde iki tane değişik yaklaşım kullanılmıştır. Bunlardan ilki gerinim oranına bağlı değişimleri ve basma ve çekme altındaki değişik davranışları göz önünde bulunduran Drucker-Prager yaklaşımı iken basma ve çekme altındaki değişik malzeme davranışlarını dikkate almayan von Mises yaklaşımıdır. Tüm 3 nokta eğme hızları için Drucker-Prager yaklaşımı kuvvet yer değiştirme değerleri açısından deneysel veriler ile çok büyük uyum sağlarken von Mises yaklaşımı büyük uyumsuzluklar göstermiştir. Buradan UHMWPE'nin 3 nokta eğme gibi çok eksenli yüklemelere maruz kaldığında vermiş olduğu mekaniksel tepkiyi nümeriksel olarak ta belirleyebilmek için basma ve çekme altındaki değişik malzeme davranışlarının kesinlikle dikkate alınması gerektiği çıkarımı tereddütsüz olarak yapılabilir.
- 3 nokta eğme test verileri ile nümerik analizlerin karşılaştırılması sonucu ortaya çıkan büyük uyumluluk burada nümerik analizlerde kullandığımız SAMP-1 malzeme modelinin doğrulanmasının ötesinde gerçekleştirilen çekme ve basma testlerinin de doğruluğunu göstermektedir.
- UHMWPE'nin çekme ve basma elastik modülü gerinim oranına bağlı olarak değişmekte iken SAMP-1 malzeme modeli sadece bir tane sabit elastik modülü kullanmaktadır. Bu durum SAMP-1 malzeme modelinde karşımıza çıkan en büyük kısıtlamalardan bir tanesidir. İlave olarak dışarıdan SAMP-1 malzeme modeline tanımlanan plastik basma eğrisi, çoklu çekme eğrilerine göre değiştirilmektedir. Fakat burada basma altında UHMWPE'nin malzeme özelliği basma hızına bağlı olarak artış ve azalış göstermektedir. SAMP-1 malzeme modelinde sadece bu eğriyi çoklu çekme eğrilerini baz alarak değiştirdiğinden dolayı bu özelliği yakalayamamaktadır. Bu da karşımıza çıkan ikinci bir büyük kısıtlamadır. 12 mm/s eğilme hızı altında SAMP-1 malzeme modelinin en

yüksek eğme kuvvetini diğer iki hızdan daha büyük bir hata oranı ile tahmin etmesinin arkasında yatan en büyük neden budur.

- 3 nokta eğme testlerinde UHMWPE'e üzerinde fiziksel olarak bir hasar gözlemlenmediğinden dolayı nümerik analizlerde herhangi bir hasar parametresi kullanılmamıştır. Burada fiziksel olarak bir hasarın görülmemiş olması malzeme içerisinde bir hasar meydana gelmediği anlamına gelmediğinden dolayı ileride çekme altında yükleme-kaldırma testleri yapılarak hasar parametrelerinin belirlenmesi ve bu hasar parametrelerini nümerik analizlere dahil edilerek 3 nokta eğme kuvvetleri üzerindeki etkisi araştırılmalıdır.
- Buradaki en yüksek çekme hızı olan 12 mm/s çekme hızı, 1.2 s^{-1} gerinim oranının oluşmasına yol açmıştır. Bu gerinim oranı orta dinamik gerinim oranı kategorisine girmesine rağmen ileride çok daha yüksek hızlarda testler gerçekleştirilmeli ve yüksek gerinim oranlarında UHMWPE'nin malzeme davranışları ortaya konmalıdır.
- 3 nokta eğme testlerinde kullanılan ve en yüksek eğme hızı olan 12 mm/s, 0.9497 s^{-1} gerinim oranı üretmiştir. Bu gerinim oranı her ne kadar orta dinamik gerinim oranı kategorisine girse de daha yüksek hızlarda testler gerçekleştirilebilir ve yine SAMP-1 malzeme modeli aracılığı ile nümerik analizleri yapılabilir.
- UHMWPE üzerinde değişik hızlarda çok eksenli darbe testlerinin gerçekleştirilmesi ve bu testlerin nümerik analizlerinin yapılması önemli olan ayrı bir çalışma konusu olarak ortaya çıkmaktadır.

Özet olarak burada UHMWPE'nin ilk olarak 3 nokta eğme testleri aracılığı ile değişik hızlar altındaki gerçek mekanik davranışı belirlenmiş ve daha sonra SAMP-1 malzeme modelindeki Drucker-Prager yaklaşımı kullanılarak bu testlerden gelen veriler başarıyla yeniden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- Alcock, C. B., Jacob, K. T. ve Zador, S. (1976) "Thermochemical properties", *Atom.Energy Rev.*, 14(Spec.No.6), 7–65.
- Anand, L. ve Gurtin, M. E. (2003) "A theory of amorphous solids undergoing large deformations, with application to polymeric glasses", *International Journal of Solids and Structures*, 40(6), 1465–1487.
- Argon, A. S. (1973) "A theory for the low-temperature plastic deformation of glassy polymers", *Philosophical Magazine*, 28(4), 839–865.
- Arruda, E. M. ve Boyce, M. C. (1991) "Evolution of Plastic Anisotropy in Amorphous Polymers during Finite Straining", *Anisotropy and Localization of Plastic Deformation*, 483–488.
- Arruda, E. M. ve Boyce, M. C. (1993) "Evolution of plastic anisotropy in amorphous polymers during finite straining", *International Journal of Plasticity*, 9(6), 697–720.
- Arruda, E. M., Boyce, M. C. ve Jayachandran, R. (1995) "Effects of strain rate, temperature and thermomechanical coupling on the finite strain deformation of glassy polymers", *Mechanics of Materials*, 19(2–3), 193–212.
- ASTM-D638 (2006) *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics1*.
- ASTM-D695 (2010) *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, ASTM International*.
- Ayoub, G., Zaïri, F., Naït-Abdelaziz, M. ve Gloaguen, J. M. (2010) "Modelling large deformation behaviour under loading-unloading of semicrystalline polymers: Application to a high density polyethylene", *International Journal of Plasticity*, 26(3), 329–347.
- Bartczak, Z. (2018) "Evaluation of effective density of the molecular network and concentration of the stress transmitters in amorphous layers of semicrystalline polyethylene", *Polymer Testing*, 68(March), 261–269.
- Bartczak, Z. ve Galeski, A. (2010) "Plasticity of semicrystalline polymers", *Macromolecular Symposia*, 294(1), 67–90.
- Bartel DL, Rawlinson JJ, Burstein AH, Ranawat CS, F. J. ve WF. (1995) "Stresses in polyethylene components of cotemporary total knee replacements", *Clin Orthop Relat Res*, 76–82.

- Bauwens-Crowet, C. (1973) “The compression yield behaviour of polymethyl methacrylate over a wide range of temperatures and strain-rates”, *Journal of Materials Science*, 8(7), 968–979.
- Bauwens-Crowet, C., Bauwens, J.-C. ve Homes, G. (1972) “The temperature dependence of yield of polycarbonate in uniaxial compression and tensile tests”, *Journal of Materials Science*, 7(2), 176–183.
- Bauwens, J. C. (1972) “Relation between the compression yield stress and the mechanical loss peak of bisphenol-A-polycarbonate in the β transition range”, *Journal of Materials Science*, 7(5), 577–584.
- Bauwens JC, Bauwens-Crowet C ve Homes G (1969) “Tensile Yield-Stress Behavior of Poly(Vinyl Chloride) and Polycarbonate in the Glass Transition Region”, *J Polym Sic Part A-2 Polym Phys*, 7(10), 1745–1754.
- Bergstrom, J. S. ve Bischoff, J. E. (2010) “An Advanced Thermomechanical Constitutive Model for UHMWPE”, *International Journal of Structural Changes in Solids*, 2(1), 31–39.
- Bergström, J. S., Kurtz, S. M., Rimnac, C. M. ve Edidin, A. A. (2002) “Constitutive modeling of ultra-high molecular weight polyethylene under large-deformation and cyclic loading conditions”, *Biomaterials*, 23(11), 2329–2343.
- Bernard, C. A., Lame, O., Deplancke, T., Cavaillé, J. Y. ve Ogawa, K. (2020) “From rheological to original three-dimensional mechanical modelling of semi-crystalline polymers: Application to a wide strain rate range and large deformation of Ultra-High Molecular Weight PolyEthylene”, *Mechanics of Materials*, 151(August 2019).
- Beşergil, B. (2020) *Mühendislik Plastikleri Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (Uhmwpe)*, C.B.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_719.
- Bois, P. a Du, Bois, P. a Du, Koesters, M., Koesters, M., Frank, T., Frank, T., Kolling, S., Kolling, S., Dynamics, S., Dynamics, S., Simulation, C., Simulation, C., Protection, P., Protection, P., Modeling, M. ve Modeling, M. (2004) “Crashworthiness analysis of structures made from polymers”, 1–12.
- Boyce, M. C., Parks, D. M. ve Argon, A. S. (1988) “Large inelastic deformation of glassy polymers. part I: rate dependent constitutive model”, *Mechanics of*

Materials, 7(1), 15–33.

- Boyce, M. C., Socrate, S. ve Llana, P. G. (2000) “Constitutive model for the finite deformation stress-strain behavior of poly(ethylene terephthalate) above the glass transition”, *Polymer*, 41(6), 2183–2201.
- Chen, L., Zheng, K. ve Fang, Q. (2017) “Effect of strain rate on the dynamic tensile behaviour of UHMWPE fibre laminates”, *Polymer Testing*, 63, 54–64.
- Chester, S. A. (2011) “Mechanics of amorphous polymers and polymer gels”.
- Daiyan, H., Grytten, F., Andreassen, E., Osnes, H. ve Lyngstad, O. V. (2012) “Numerical simulation of low-velocity impact loading of a ductile polymer material”, *Materials and Design*, 42(mm), 450–458.
- Daniel, I. M., Daniel, S. M. ve Fenner, J. S. (2018) “A new yield and failure theory for composite materials under static and dynamic loading”, *International Journal of Solids and Structures*, 148–149, 79–93.
- Defebvin, J., Barrau, S., Stoclet, G., Rochas, C. ve Lefebvre, J. M. (2016) “In situ SAXS/WAXS investigation of the structural evolution of poly(vinylidene fluoride) upon uniaxial stretching”, *Polymer*, 84, 148–157.
- Deplancke, T., Fivel, M. ve Lame, O. (2019) “1D strain rate-dependent constitutive model of UHMWPE: From crystalline network to fibrillar structure behavior”, *Mechanics of Materials*, 137(June), 103129.
- Diani, J. ve Gall, K. (2006) “Finite Strain 3D Thermoviscoelastic Constitutive Model”, *Society*.
- Dixit, D., Pal, R., Kapoor, G. ve Stabenau, M. (2016) *Lightweight composite materials processing, Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications: Second Edition*.
- Van Dommelen, J. A. W., Parks, D. M., Boyce, M. C., Brekelmans, W. A. M. ve Baaijens, F. P. T. (2003) “Micromechanical modeling of the elasto-viscoplastic behavior of semi-crystalline polymers”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51(3), 519–541.
- van Dommelen, J. A. W., Poluektov, M., Sedighiamiri, A. ve Govaert, L. E. (2017) “Micromechanics of semicrystalline polymers: Towards quantitative predictions”, *Mechanics Research Communications*, 80, 4–9.
- Drozdov, A. D. ve De Christiansen, J. C. (2011) “Mullins’ effect in semicrystalline

- polymers: Experiments and modeling”, *Meccanica*, 46(2), 359–370.
- Drozdov, A. D. ve Christiansen, J. de C. (2008) “Thermo-viscoelastic and viscoplastic behavior of high-density polyethylene”, *International Journal of Solids and Structures*, 45(14–15), 4274–4288.
- Du, S., Hamdi, M. ve Sue, H. J. (2020) “Experimental and FEM analysis of mar behavior on amorphous polymers”, *Wear*, 444–445(June 2019), 203155.
- Duckett, R. A., Rabinowitz, S. ve Ward, I. M. (1970) “The strain-rate, temperature and pressure dependence of yield of isotropic poly(methylmethacrylate) and poly(ethylene terephthalate)”, *Journal of Materials Science*, 5(10), 909–915.
- Dundar, M. A. (2017) *Strain Rate Dependence And Impact Behavior Of Abs (acrylonitrile-Butadiene-Styrene) Amorphous Thermoplastic*.
- Dundar, M. A. ve Dhaliwal, G. S. (2020a) “Investigation for impact behavior of acrylonitrile-butadiene-styrene amorphous thermoplastic”, *Polymer Testing*, 89(May), 106624.
- Dundar, M. A. ve Dhaliwal, G. S. (2020b) “Investigation for impact behavior of acrylonitrile-butadiene-styrene amorphous thermoplastic”, *Polymer Testing*, 89(January), 106624.
- Dundar, M. A., Dhaliwal, G. S. ve Ayorinde, E. (2020) “Experimental and numerical investigation on flexural behavior of acrylonitrile-butadiene-styrene polymer”, *Polymer Engineering and Science*, 60(11), 2930–2944.
- Dusunceli, N. ve Colak, O. U. (2008) “Modelling effects of degree of crystallinity on mechanical behavior of semicrystalline polymers”, *International Journal of Plasticity*, 24(7), 1224–1242.
- Eddin, A. A. ve Kurtz, S. M. (2000) “Influence of mechanical behavior on the wear of 4 clinically relevant polymeric biomaterials in a hip simulator”, *Journal of Arthroplasty*, 15(3), 321–331.
- Eddin, A. A. ve Kurtz, S. M. (2001) “Development and validation of the small punch test for UHMWPE used in total joint replacements”, *Key Engineering Materials*, 199(198–199), 1–40.
- Eyring, H. (1936) “Viscosity, plasticity, and diffusion as examples of absolute reaction rates”, *The Journal of Chemical Physics*, 4(4), 283–291.
- Foot, J. S., Truss, R. W., Ward, I. M. ve Duckett, R. A. (1987) “The yield behaviour

- of amorphous polyethylene terephthalate: An activated rate theory approach”, *Journal of Materials Science*, 22(4), 1437–1442.
- Fouad, H. (2010) “Experimental and numerical studies of the notch strengthening behaviour of semi-crystalline ultra-high molecular weight polyethylene”, *Materials and Design*, 31(3), 1117–1129.
- Frank, T., Kurz, A., Pitzer, M. ve Söllner, M. (2003) “Development and validation of numerical pedestrian impactor models”, *4th European LS-DYNA Users Conference*, 1–18.
- G’Sell, C., Boni, S. ve Shrivastava, S. (1983) “Application of the plane simple shear test for determination of the plastic behaviour of solid polymers at large strains”, *Journal of Materials Science*, 18(3), 903–918.
- G’sell, C. ve Dahoun, A. (1994) “Evolution of microstructure in semi-crystalline polymers under large plastic deformation”, *Materials Science and Engineering A*, 175(1–2), 183–199.
- Galeski, A. (2003) *Strength and toughness of crystalline polymer systems, Progress in Polymer Science (Oxford)*.
- Galeski, A., Bartzak, Z., Argon, A. S. ve Cohen, R. E. (1992) “Morphological Alterations during Texture-Producing Plastic Plane Strain Compression of High-Density Polyethylene”, *Macromolecules*, 25(21), 5705–5718.
- Garcia-Gonzalez, D., Zaera, R. ve Arias, A. (2017) “A hyperelastic-thermoviscoplastic constitutive model for semi-crystalline polymers: Application to PEEK under dynamic loading conditions”, *International Journal of Plasticity*, 88, 27–52.
- Geyer, R., Jambeck, J. R. ve Law, K. L. (2017) “Production, use, and fate of all plastics ever made”, *Science Advances*, 3(7), 25–29.
- Gu, G., Xia, Y., Lin, C. H., Lin, S., Meng, Y. ve Zhou, Q. (2013) “Experimental study on characterizing damage behavior of thermoplastics”, *Materials and Design*, 44, 199–207.
- Gueguen, O., Ahzi, S., Makradi, A. ve Belouettar, S. (2010) “A new three-phase model to estimate the effective elastic properties of semi-crystalline polymers: Application to PET”, *Mechanics of Materials*, 42(1), 1–10.
- Hasan, O. A. ve Boyce, M. C. (1995) “A constitutive model for the nonlinear

- viscoelastic viscoplastic behavior of glassy polymers”, *Polymer Engineering & Science*, 35(4), 331–344.
- Haward, R. N. ve Thackray, G. (1968) “The use of a mathematical model to describe isothermal stress-strain curves in glassy thermoplastics”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 302(1471), 453–472.
- Hossain, M. M., Minkwitz, R., Charoensirisomboon, P. ve Sue, H. J. (2014) “Quantitative modeling of scratch-induced deformation in amorphous polymers”, *Polymer*, 55(23), 6152–6166.
- Huang, W., Wang, Y. ve Xia, Y. (2004) “Statistical dynamic tensile strength of UHMWPE-fibers”, *Polymer*, 45(11), 3729–3734.
- Jatin, Sudarkodi, V. ve Basu, S. (2014) “Investigations into the origins of plastic flow and strain hardening in amorphous glassy polymers”, *International Journal of Plasticity*, 56, 139–155.
- Katagiri, T., Sugimoto, M., Nakanishi, E. ve Hibi, S. (1993) “Orientation behaviour of crystallites in cylindrical polyethylene rods under tension-torsion combined stress”, *Polymer*, 34(3), 487–493.
- Kitagawa, M., Onoda, T. ve Mizutani, K. (1992a) “Stress-strain behaviour at finite strains for various strain paths in polyethylene”, *Journal of Materials Science*, 27(1), 13–23.
- Kitagawa, M., Onoda, T. ve Mizutani, K. (1992b) “Stress-strain behaviour at finite strains for various strain paths in polyethylene”, *Journal of Materials Science*, 27(1), 13–23.
- Kolling, S., Haufe, A., Feucht, M. ve Du Bois, P. a. (2005) “SAMP-1: A Semi-Analytical Model for the Simulation of Polymers”, *4. LS-DYNA Anwenderforum*, 27–52.
- Kurtz, S. M. (2015) *UHMWPE Biomaterials Handbook: Ultra High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices: Third Edition*, *UHMWPE Biomaterials Handbook: Ultra High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices: Third Edition*.
- Kurtz, S. M., Foulds, J. R., Jewett, C. W., Srivastav, S. ve Edidin, A. A. (1997) “Validation of a small punch testing technique to characterize the mechanical

- behaviour of ultra-high-molecular-weight polyethylene”, *Biomaterials*, 18(24), 1659–1663.
- Kurtz, S. M., Jewett, C. W., Bergström, J. S., Foulds, J. R. ve Edidin, A. A. (2002) “Miniature specimen shear punch test for UHMWPE used in total joint replacements”, *Biomaterials*, 23(9), 1907–1919.
- Kurtz, S. M., Pruitt, L., Jewett, C. W., Crawford, R. P., Crane, D. J. ve Edidin, A. A. (1998) “The yielding, plastic flow, and fracture behavior of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements”, *Biomaterials*, 19(21), 1989–2003.
- Kurtz SM, Bergström JS, Rimnac CM, E. A. (2001) “Multiaxial validation of constitutive theories for UHMWPE”, *Transactions of the 27th Annual Meeting of the Society for Biomaterials*, 310.
- L. G. Malito (2016) “The Deformation, Yielding, and Fracture of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene for Use in Total Joint Replacements”, *DNA Mediated Assembly of Protein Heterodimers on Membrane Surfaces*, 67.
- Liang, X., Wu, X., Zeng, K., Xu, B., Wu, S., Zhao, H., Li, B. ve Ruan, S. (2014) “Micro ultrasonic powder molding for semi-crystalline polymers”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 24(4).
- Liu, Q., Subhash, G. ve Gao, X. L. (2005) “A parametric study on crushability of open-cell structural polymeric foams”, *Journal of Porous Materials*, 12(3), 233–248.
- Lucas, A. de A., Ambrósio, J. D., Otaguro, H., Costa, L. C. ve Agnelli, J. A. M. (2011) “Abrasive wear of HDPE/UHMWPE blends”, *Wear*, 270(9–10), 576–583.
- Manaia, J. P., Pires, F. A., de Jesus, A. M. P. ve Wu, S. (2020) “Mechanical response of three semi crystalline polymers under different stress states: Experimental investigation and modelling”, *Polymer Testing*, 81(October 2019).
- Mary C. Boyce (1986) “Large inelastic deformation of glassy polymers 11”, *Mechanics of materials*, 15–33.
- Maurel-Pantel, A., Baquet, E., Bikard, J., Bouvard, J. L. ve Billon, N. (2015) “A thermo-mechanical large deformation constitutive model for polymers based on material network description: Application to a semi-crystalline polyamide 66”, *International Journal of Plasticity*, 67, 102–126.
- Mortensen, A. (2007) *Concise Encyclopedia of Composite Materials Second Edition*.

- Mulliken, A. D. (2006) “Mechanics of amorphous polymers and polymer gels”.
- Mulliken, A. D. ve Boyce, M. C. (2006) “Mechanics of the rate-dependent elastic-plastic deformation of glassy polymers from low to high strain rates”, *International Journal of Solids and Structures*, 43(5), 1331–1356.
- Nikolov, S., Doghri, I., Pierard, O., Zealouk, L. ve Goldberg, A. (2002) “Multi-scale constitutive modeling of the small deformations of semi-crystalline polymers”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 50(11), 2275–2302.
- Nikolov, S., Lebensohn, R. A. ve Raabe, D. (2006) “Self-consistent modeling of large plastic deformation, texture and morphology evolution in semi-crystalline polymers”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 54(7), 1350–1375.
- Official, Of ve Kolloid (1975) “COLLOID AND POLYMER SCIENCE KOLLOID-ZEITSCHRIFT & ZEITSCHRIFT FOR POLYMERE Plastic deformation of polymers with fibrous structure”, 253(10).
- Ousji, H., Belkassam, B., Louar, M. A., Reymen, B., Martino, J., Lecompte, D., Pyl, L. ve Vantomme, J. (2017) “Air-blast response of sacrificial cladding using low density foams: Experimental and analytical approach”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 128–129, 459–474.
- Peterlin, A. (1971) “Molecular model of drawing polyethylene and polypropylene”, *Journal of Materials Science*, 6(6), 490–508.
- Popa, C. M., Fleischhauer, R., Schneider, K. ve Kaliske, M. (2014) “Formulation and implementation of a constitutive model for semicrystalline polymers”, *International Journal of Plasticity*, 61, 128–156.
- Pulungan, D., Yudhanto, A., Goutham, S., Lubineau, G., Yaldiz, R. ve Schijve, W. (2018) “Characterizing and modeling the pressure- and rate-dependent elastic-plastic-damage behavior of polypropylene-based polymers”, *Polymer Testing*, 68(January), 433–445.
- Regrain, C., Laiarinandrasana, L., Toillon, S. ve Sai, K. (2009) “Multi-mechanism models for semi-crystalline polymer: Constitutive relations and finite element implementation”, *International Journal of Plasticity*, 25(7), 1253–1279.
- Richeton, J., Ahzi, S., Vecchio, K. S., Jiang, F. C. ve Adharapurapu, R. R. (2006) “Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of three amorphous polymers: Characterization and modeling of the compressive yield

- stress”, *International Journal of Solids and Structures*, 43(7–8), 2318–2335.
- Richeton, J., Ahzi, S., Vecchio, K. S., Jiang, F. C. ve Makradi, A. (2007) “Modeling and validation of the large deformation inelastic response of amorphous polymers over a wide range of temperatures and strain rates”, *International Journal of Solids and Structures*, 44(24), 7938–7954.
- Robertson, R. E. (1965) “Theory for the plasticity of glassy polymers”, *The Journal of Chemical Physics*, 44(10), 3950–3956.
- Roesler, J., Harders, H. ve Baeker, M. (2006) *Mechanical Behavior of Engineering Materials*.
- Roetling, J. . (1965) “Yield Stress Behaviour of Polyme th ylme thacrylate”, 311–317.
- Roetling, J. A. (1965) “Yield stress behaviour of poly(ethyl methacrylate) in the glass transition region”, *Polymer*, 6(11), 615–619.
- Ryu, J., Lim, H., Lee, S. H. ve Lee, J. (2015) “Polymer filling behaviors and imprinting velocities with pressure variation rates in nanoimprint lithography”, *Microelectronic Engineering*, 140, 67–71.
- Sælen, K. (2012) “Validation of material model for polypropylene (PP)”, (June).
- Sedighiamiri, A., Senden, D. J. A., Tranchida, D., Govaert, L. E. ve Van Dommelen, J. A. W. (2014) “A micromechanical study on the deformation kinetics of oriented semicrystalline polymers”, *Computational Materials Science*, 82, 415–426.
- Senden, D. J. A., van Dommelen, J. A. W. ve Govaert, L. E. (2010) “Strain hardening and its relation to Bauschinger effects in oriented polymers”, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 48(13), 1483–1494.
- Serdeczny, M. P., Comminal, R., Mollah, M. T., Pedersen, D. B. ve Spangenberg, J. (2020) “Numerical modeling of the polymer flow through the hot-end in filament-based material extrusion additive manufacturing”, *Additive Manufacturing*, 36(May), 101454.
- SONGHAN (2021) *MarkeTech Silica Aerogel Contact Songhan Plastic Technology Co ., Ltd .*
- Sun, Y. ve Li, Q. M. (2018) “Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling”, *International Journal of Impact Engineering*, 112(October 2017), 74–115.

- Teoh, S. H., Chan, W. H. ve Thampuran, R. (2002) “An elasto-plastic finite element model for polyethylene wear in total hip arthroplasty”, *Journal of Biomechanics*, 35(3), 323–330.
- Toda, M. (1958) “On the Theory of the Brownian Motion”, *Journal of the Physical Society of Japan*, 13(11), 1266–1280.
- Truss, R. W., Clarke, P. L., Duckett, R. A. ve Ward, I. M. (1984) “Dependence of Yield Behavior on Temperature, Pressure, and Strain Rate for Linear Polyethylenes of Different Molecular Weight and Morphology.”, *Journal of polymer science. Part A-2, Polymer physics*, 22(2), 191–209.
- Wang, F., Liu, L., Xue, P. ve Jia, M. (2017) “Crystal structure evolution of UHMWPE/HDPE blend fibers prepared by melt spinning”, *Polymers*, 9(3).
- Xu, M. M., Huang, G. Y., Feng, S. S., McShane, G. J. ve Stronge, W. J. (2016) “Static and dynamic properties of semi-crystalline polyethylene”, *Polymers*, 8(4).
- Xue, Y. Q., Tervoort, T. A. ve Lemstra, P. J. (1998) “Welding behavior of semicrystalline polymers. 1. The effect of nonequilibrium chain conformations on autoadhesion of UHMWPE”, *Macromolecules*, 31(9), 3075–3080.
- Yang, W. ve Chen, M. X. (2001) “Modeling of large plastic deformation in crystalline polymers”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49(11), 2719–2736.
- Yang, Z., Peng, H., Wang, W. ve Liu, T. (2010) “Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites”, *Journal of Applied Polymer Science*, 116(5), 2658–2667.
- Zhang, K., Li, W., Zheng, Y., Yao, W. ve Zhao, C. (2020) “Dynamic constitutive model of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE): Considering the temperature and strain rate effects”, *Polymers*, 12(7), 1–15.