İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AMBALAJDA KULLANILAN KÖPÜK MALZEMELERDE DÜŞME VE ÇARPMANIN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Gürhan KUZGUN

(503041309)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 2007

Tez Danışmanı : **Yrd.Doç.Dr. Muzaffer ERTEN**

Diğer Jüri Üyeleri **Prof.Dr. Barlas ERYÜREK (İ.T.Ü)**

Prof.Dr. Uğur Güven (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi tarafından oluşturulan ve desteklenen bir projedir.

Yüksek lisans tez çalışmama danışmanlık yapan, olumlu eleştiri ve önerileri ile yol gösteren değerli hocam Sn. Yrd. Doc. Dr. Muzaffer ERTEN'e teşekkür ederim

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan ve her zaman destek olan Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ne, Sn Ertan ÇETİNKAYA, Sn. Mehmet DURMAZ , Sn Fatih ÖZKADI ve Sn. Cemil İNAN'ın, şahsında teşekkür ederim.

Çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen proje liderim Sn. Umud E. ÖZTÜRK, değerli fikir ve çalışmalarından dolayı Sn. Osman G. ERSOY, Sn. S. Can MEYDANLI ve Ömer AKBAŞ'a ve tüm Arçelik ARGE Yapısal Tasarım ve Malzeme Teknolojisi Ailesi çalışanlarına teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarım boyunca verdikleri destekten dolayı Sn Ertuğrul KETENCİ , ağabeyim Gökhan KUZGUN ve anneme teşekkürlerimi sunarım.

HAZİRAN 2007 **Gürhan KUZGUN**

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**

TABLO LİSTESİ **vi**

ŞEKİL LİSTESİ **vii**

ŞEKİL LİSTESİ **vii**

SEMBOL LİSTESİ **xi**

1. GİRİŞ **1**

1.1 Giriş 1

1.2 Çalışmanın Amacı 3

1.3 Literatür Araştırması 3

1.4 Genişletilmiş Polisitren 12

1.4.1 Genişletilmiş Polisitren İmalatı 13

1.4.2 Strafor geri dönüşümü 14

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **15**

2.1 Açık Hücre Miktarını Ölçme 15

2.1.1 Gaz Piknometresinin Çalışma Prensibi 16

2.1.2 Açık Hücre Miktarı Ölçme Deney Sonuçları 17

2.2 Mikroskop Çalışması 17

2.2.1 Optik Mikroskop Çalışması 18

2.2.2 Elektron mikroskobu çalışması 19

2.3 Basma Deneyleri 22

2.3.1 Basma deney cihazı 22

2.3.2 Düz basma deneyleri 23

2.3.3 Silindirik çene ile basma deneyleri 29

3. DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI VE KURULUMU **35**

3.1 Genel Tasarım Kriterleri 35

3.2 Deney Düzeneğinin Kısımları 38

3.2.1 Düzenek Konstrüksiyonu 38

3.2.2 Düşürülen Kirişler 43

3.2.3 Veri Toplama Sistemi 44

3.3 Deney Düzeneği Çalışma Yöntemi 50

4. MATEMATİKSEL MODEL VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI52

4.1 Matematiksel modelin çıkarılması 52

4.2 Matematiksel Modelin Karşılaştırması 57

5. DENEYLERİN NÜMERİK KARŞILAŞTIRMASI^ 60

5.1 Düz Plaka ile Tek Eksen Basma Deneyi Simülasyonu 60

5.2 ABAQUS Nümerik Çözüm Sonuçları ve Karşılaştırmaları 63

5.3 Silindirik Çene ile Basma Simülasyonları 67

6. KAYNAKLAR 72

EK-A 74

EK-B 78

ÖZGEÇMİŞ 84

KISALTMALAR

EPS	: Expanded Polystyrene (Şişirilmiş Polisitren)
PE	: Polyethylene (Polietilen)
FEA	: Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Standartları)

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1: Açık Hücre Ölçümü Deney Sonuçları 17
Tablo 2.2 : Optik Mikroskop da Tanecik Çapı Ölçümleri 18
Tablo 3.1 : Alüminyum Profillerin Teknik Özellikleri 40
Tablo 3.2: Kiriş Ağırlıkları..... 43
Tablo 3.3: Yük ölçer teknik verileri 45

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 : Tek Eksen Basma Altında Polisitren Köpüğün Gerilme-Şekil Değişimi Davranışı 4
Şekil 1.2 : Küre Basma Deneyinde Polisitren Köpüğün Temas Kuvveti-Deplasman Davranışı 5
Şekil 1.3 : Yükleme Ve Yük Kaldırılırken Basit Kayma Davranışı 6
Şekil 1.4 : EPS 35 Köpüğün 50 mm Kenarlı Küp İle Ezilmesinin Video Kareleri ... 6
Şekil 1.5 : Düşme Düzeneği **(a)** Genel Tasarım **(b)** Düşen Kiriş 7
Şekil 1.6 : Deney Düzeneğinde Rohacell 51 Köpüğün 2 M/S Ve 20 C^o Dinamik Yük Etkisi 8
Şekil 1.7 : BASF EPP55 Dinamik Test Sonuçları **(a)** 1,4 m/s **(b)** 3 m/s **(c)** 5 m/s . 8
Şekil 1.8 : Ambalajlama Tipleri **(a)** Köşe Kapatmalı **(b)** Kenar Kapatmalı 9
Şekil 1.9 : Ürünün Köpükle ve Kartonla Ambalajlanmış Durumu 9
Şekil 1.10 : Ethafoam 220 ile Ambalajlanmış Köşe Kapamalı Tasarımın 1'inci, 3'üncü ve 5'inci Çarpma ve Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları 10
Şekil 1.11 : Ethafoam 400 ile Ambalajlanmış Köşe Kapamalı Tasarımın 1'inci, 3'üncü ve 5'inci Çarpma ve Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları 11
Şekil 1.12 : Ethafoam 220 ile Ambalajlanmış Kenar Kapamalı Tasarımın 1., 3., 5. Çarpma Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları 11
Şekil 2.1 : Kullanılan gaz piknometresi AccuPyc 1330 16
Şekil 2.2 : Gaz Piknometresinin Çalışma Prensibi 16
Şekil 2.3 : EPS30'un Optik Mikroskopda 7 Kat Büyütülmüş Fotoğrafı 18
Şekil 2.4 : JSM-6400 Elektron Mikroskobu 19
Şekil 2.5 : EPS 20 15 Kat Büyütülmüş Elektron Mikroskobu Fotoğrafı 20
Şekil 2.6 : EPS 30 Elektron Mikroskobu Fotoğrafları (a) x15, (b) x30, (c) x100 Kat Büyütme 20
Şekil 2.7 : PE 24 Elektron Mikroskobu Fotoğrafları (a) x15 (b) x30 Kat Büyütme 22
Şekil 2.8 : Zwick Z020 Basma ve Çekme Cihazı 23
Şekil 2.9 : 50x50x50 mm boyutlarında hazırlanan numune 24
Şekil 2.10 : Düz basma çeneleri 24
Şekil 2.11 : EPS 30 Düz Basma Deney Sonuçları 25
Şekil 2.12 : PE 58 Düz Basma Deney Sonuçları 26
Şekil 2.13 : EPS 30 Düz Basma Deney Fotoğrafları 29

Şekil 2.14 : Silindirik Basma Çenesi 30
Şekil 2.15 : Silindirik Basma Deneylerinde Kullanılan 150x50x50 mm Numune.. 30
Şekil 2.16 : Silindirik Basma Deneyinin Yapılış Şekli 31
Şekil 2.17 : EPS Köpüklerine Silindirik Çene ile Basma Deney Sonuçları 32
Şekil 2.18 : PE Köpüklerine Silindirik Çene ile Basma Deney Sonuçları 33
Şekil 2.19 : EPS 30 Silindirik Çene Basma Deneyi Sonrası Kırılmış Durumu..... 34
Şekil 3.1 : Düşme Deney Düzeneği CAD Modeli 36
Şekil 3.2 : Düşme Deney Düzeneği Dar ve Geniş Aralıklar 37
Şekil 3.3 : Düşme Deney Düzeneği Genel Resmi 37
Şekil 3.4 : Alüminyum Profiller (a) 90x90 mm Profil Resmi (b) 90x90 mm Kesit Teknik Resmi 38
Şekil 3.5 : Alüminyum Profillerin Montaj Şekli 39
Şekil 3.6 : Köşe Bağlantı Elemanları..... 39
Şekil 3.7 : Dar ve Geniş Aralık Ölçülerinin Gösterimi 40
Şekil 3.8 : Ray ve Araba Resimleri 42
Şekil 3.9 : Kullanılan Ray ve Hareketli Yatak Teknik Özellikleri 42
Şekil 3.10 : Rayın Üzerindeki Hareketli Yatak Bağlantısı 43
Şekil 3.11 : Kirişler ve Çenelerin CAD Modeli (a) Dar Aralık Kirişi ve Çenesi (b) Geniş Aralık Kirişi ve Çenesi..... 44
Şekil 3.12 : Dar Aralık Kiriş Montajı 44
Şekil 3.13 : Deney Düzeneğinde Yük Ölçerlerin Yerleşimi..... 45
Şekil 3.14 : Yük Ölçer 46
Şekil 3.15 : Lazer Deplasman Ölçme Kafası..... 47
Şekil 3.16 : Lazer Deplasman Yerleşimi 47
Şekil 3.17 : Lazer Deplasman Ölçer Kalibrasyonu 48
Şekil 3.18 : Kullanılan ivmeölçer 49
Şekil 3.19 : Veri toplama sistemi..... 50
Şekil 3.20 : Deney Düzeneği – Kirişin Kaldırılma Konumu..... 51
Şekil 3.21 : Deney Düzeneği – Kirişin Kaldırılma Konumu (Yakın) 51
Şekil 4.1 EPS30 İçin 200, 600 ve 1000 mm/dak Şekil Değişim Hızlarının Verilerine Türetilen Denklemler 53
Şekil 4.2 : EPS12 ve 30 İçin 1000 mm/dak Hızlarda Deney Sonuçlarının Matematiksel Model ile Karşılaştırması 59
Şekil 5.1 : ABAQUS'de Oluşturulan Ağ Yapısı 60

Şekil 5.2 : EPS30 İçin Gerilme-Şekil Değişimi Grafiği Bölgeleri 61
Gerilme şekil değişimi eğrisinde elastik, plato, sertleşme bölgesi Şekil 5.2'de gösterilmiştir. 61
Şekil 5.3 : ABAQUS'de Kullanılan "Crushable Foam" Malzeme 61
Şekil 5.4 : Sınır Koşulları 62
Şekil 5.5 : Kontak Yüzey Tanımlaması 63
Şekil 5.6 : ABAQUS Simülasyonu %80 Şekil Değişimi Durumu 64
Şekil 5.7 : ABAQUS Simulasyonu %80 Şekil Değişimi Sonrası Yükün Kaldırılmış Durumu 64
Şekil 5.8 : EPS 30 1000 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması 65
Şekil 5.9 : PE 58 600 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik karşılaştırması 66
Şekil 5.10 : Silindirik Çene ile Basma Simülasyonu Modeli 67
Şekil 5.11 : Silindirik Çene ile Basma Simülasyonu Sonuçları 68
Şekil 5.12 : Silindirik Çene ile Basma Simülasyonu Sonuçları 68
Şekil 5.13 : EPS 30 100 mm/dak Hızda Silindirik Çene ile Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması 70
Şekil 5.14 : PE 32 ve PE 58 100 mm/dak Hızda Silindirik Çene ile Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması 71
Şekil A.1 : EPS 12 Düz Basma Deney Sonuçları 74
Şekil A.2 : EPS 20 Düz Basma Deney Sonuçları 75
Şekil A.3 : PE 24 Düz Basma Deney Sonuçları 76
Şekil A.4 : PE 32 Düz Basma Deney Sonuçları 77
Şekil B.1 : EPS 30 600 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması 78
Şekil B.2 : EPS 30 200 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması 79
Şekil B.3 : EPS 12 600 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması 80
Şekil B.4 : EPS 20 600 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması 81
Şekil B.5 : PE 24 600 mm/dak hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması 82

Şekil B.6 : PE 32 600 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması 83

SEMBOL LİSTESİ

σ	**:** Gerilme
ε	**:** Şekil değişimi
k	**:** Şekil değişim hızı
y	**:** Yoğunluk
σ_c	**:** Basma gerilmesi
σ_{c0}	**:** İlk çökme gerilmesi
ρ_0	**:** Efektif köpük hücre gaz basıncı
R	**:** Köpük bağıl nemi

AMBALAJDA KULLANILAN KÖPÜK MALZEMELERDE DÜŞME VE ÇARPMANIN İNCELENMESİ

ÖZET

Nakliye sırasında ürünlerin hasar görmesi sonucu kullanılamaz hale gelmesi veya bakım görmek zorunda kalması maliyet kriterlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Üretim yerinden son kullanıcıya kadar ürünler farklı taşıma araçlarına yüklenmekte ve indirilmektedir. Bu esnada birçok kez düşme ve çarpmaya uğramaktadırlar. Bununla birlikte kullanılan ambalaj malzemesi ve taşıma sırasında en az hacmi kaplaması maliyeti etkileyen diğer faktörlerdir.

Ürünün ambalajı düşme ve çarpmaya karşı gerekli dayanımı gösterirken, taşınma sırasında en az ambalaj malzemesi kullanarak en az hacmi kaplayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bunun içinde kullanılacak ambalaj malzemesinin dinamik davranışı iyi tespit edilmelidir. Her ürün için farklı ambalaj tasarımı gerektiğinden tasarımın bilgisayar ortamında analiz edilmesi uygun olacaktır. Kullanılacak sonlu elemanlar analiz programında ambalaj malzemesinin doğru bir şekilde tanıtılması gerekmektedir.

Günümüzde ambalaj malzemesi olarak en çok kullanılan şişirilmiş polisitren ve polietilen malzemedir. Bu malzemelerin dinamik davranışını incelemek için bu çalışmada öncelikle içyapısı ortaya koyulmuştur. Elektron mikroskobu ve açık gözenek ölçümleri ile malzeme sıkıştırıldığında içyapısının nasıl davrandığı açıklanmıştır. Düşük hızlarda standart basma deneyleri ile gerilme şekil değişimi incelenmiştir. Düşme ve çarpmanın etkisinin iyi incelenmesi için deney düzeneği kurulmuştur. Belli ağırlıktaki çenelerin belli yükseklikten düşürülmesi sonucu polisitren ve polistilen malzemelerin dinamik davranışı incelenmiştir. Bu deneylerde sıcaklık parametresi de değiştirilerek farklı nakliye koşulları simüle edilmiştir.

Bu çalışma da polisitren ve polietilen malzeme modellerinin sonlu elemanlar analizi programlarında modellenmesi için ön çalışma yapılmıştır. Ortaya koyulan dinamik davranış eğrileri ve denklemleri ile kısa sürede basit kuvvet hesaplarıyla ya da daha uzun sürede sonlu elemanlar programlarıyla malzeme davranışı verileri girerek ambalaj tasarım kriterleri oluşturulabilir.

INVESTIGATION ON DROP AND STRIKE FOR FOAM IN USED PACKAGING

SUMMARY

During transport of products, be out of use after suffering damage or necessary to maintenance influences excessively cost criterions. From manufacture place to end-user products are loaded different transport vehicle. While this operation many drop or strike can be become fact. In addition to this, packaging material and taking over minimum area are other cost criterions.

Products packaging must be designed for taking over least area while supplies enough strength for drop and strike. For this target, dynamical behaviors of packaging materials must be known very well. Analyzing packaging design in FEA software is more productive because there are a lot of different types of design. Packaging material properties must be correctively introduced in used FEA software.

Nowadays expanded polystyrene and polythene are most used packaging materials. In this study first of all inside structure of them are put forward by observation in electron microscope and measure open cell percentage for examine dynamic behavior of material. To get stress and strain data standard compression tests are done in low deformation velocities. Test mechanism is set up for drop and strike effect. With falling jaws in known weight from known height onto polystyrene and polythene materials, dynamic behavior of material are researched. In this tests temperature parameters are changed for simulating different transport conditions.

In this study pre-study are done for developing material model about polystyrene and polythene for finite element analysis programs. Packaging design criterions are formed in short time with putting forward equations and curve line or in more time using FEA software with using materials behavior data.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Günümüzde ürünlerin nakliyesi önemli maliyetler oluşturmaktadır. Bu maliyet iki madde de değerlendirebilir. Birincisi taşıma türü ne olursa olsun ambalajlanmış bir ürün, en az hacmi kaplayarak, taşıma alanını verimli şekilde kullanılmasını sağlamalıdır. Bu konu ürünün tasarımıyla ilgili olduğu kadar, ambalajının da en az hacim kaplayacak şekilde tasarlanmasına bağlıdır. İkinci maliyet unsuru ise ürünün minimum hasar görecek şekilde taşınabilmesidir. Dünya pazarında ihracat ve ithalatın mesafe tanınmadan yapılır olması, her ülkede farklı taşınma ve depolanma koşullarının olması ve taşıma sırasında birden fazla taşıma sisteminin kullanılması düşme ve çarpma sonucu hasar oluşma riskini arttırmaktadır. Bu konuyla ilgili Türkiye'de üretilen bir beyaz eşyayı ele alırsak, öncelikle üretim yerinde depolanma koşulları ilk karşılaşılan hasar riskidir. Daha az yer kaplaması için beyaz eşyalar tipine göre 4 veya 5 adet üst üste istiflenerek depolarda bekletilmektedir. Bu durum en alttaki ürüne kendisinin 3 veya 4 katı ağırlığında bir yüke maruz bırakmaktadır. Buna ek olarak istiflenme sırasında ürünlerin forklift gibi cihazlarla yandan baskı uygulayarak taşınması ve üst üste koyulurken belli bir çarpışmaya uğraması hasar riskine katkıda bulunmaktadır. Ürünün satış yerine götürülürken kullanılan kara, hava ve deniz yolculuğu sırasında birçok kez depolanma koşullarındaki duruma maruz kalacaktır. Bu duruma taşıma sırasındaki titreşim ve taşındığı coğrafyadaki hava koşulları da etkimektedir. Hava sıcaklığının yüksek ya da düşük olması, havadaki nemim miktarı ambalaj malzemesinin sönümleme davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Birçok ülkede taşıma kalite standartları çok düşüktür. Beyaz eşya kamyon gibi taşıyıcılardan direk atılarak indirilmektedir. Yaklaşık 1 metre yükseklikten düşme ile ambalaj malzemesi tekrarlı olarak baskı kuvvetinin etkisi altında kalmaktadır.

Ürünün en az hacim kaplayarak bahsedilen taşıma koşullarında en az hasarı görmesini sağlamak maliyetleri önemli ölçüde düşürmek için ölçüttür. Bu da kullanılan ambalaj malzemesinin sönümleme özelliklerinin iyi tespit edilmesine bağlıdır. Dinamik davranışı doğru tespit edilen malzeme verilerine göre ürün daha tasarım aşamasındayken gövde mukavemeti için iyileştirmeler yapılabilmektedir. Birçok ürünün gövde mukavemeti çalışma koşullarında öte taşınma sırasında hasar görmemesi koşuluna göre tasarlanır. Buda daha fazla bağlantı elemanı ve malzeme kullanılmasını gerektirmektedir. Ürünün taşınması sırasında doğabilecek gerilme değerlerlerinin bir kısma ambalaj malzemesinin karşılaması yapısal tasarımında gereksiz kuvvetlendirmeleri önleyebilir. Ürünün ilk tasarım modeli ile ambalaj tasarımı da yapılarak sonlu elemanlar yazılımlarında verilen koşullar altındaki davranışı incelenebilir. Çıkan sonuçlara göre, sağlanabilecek minimum yapısal mukavemet değeri ile ürün tasarımı yapılabilir. Bu aşamada ambalaj tasarımı da irdelenerek en az malzeme kullanılması ve ürünün kritik bölgelerinin kuvvetlendirilmiş ambalajlama tasarımının sağlanması düşünülmelidir.

Nakliye sırasında oluşan hasarlardan ötürü birçok ürün son kullanıcısına ulaşmadan kullanılmaz hale gelmektedir. Bitmiş ürünün satılamadan ıskartaya çıkarılması, tasarımı ve üretimi sırasında doğabilecek maliyet risklerinden bile daha fazla önemlidir. Nakliyesi sırasında ürünün onarılabilir hasar görmesi de, servis maliyetlerini artırmaktadır.

Bu çalışmada ambalaj malzemesi olarak kullanılan genişletilmiş polisitren ve polietilen malzemelerin farklı yoğunluklarının dinamik davranışı incelenmiştir. EPS için 12 kg/m^3, 20 kg/m^3, 30 kg/m^3 polietilen malzeme için ise 24 kg/m^3, 32 kg/m^3 ve 58 kg/m^3 yoğunluklarındaki malzemelere değişik çeneler kullanılarak basma deneyleri uygulanmıştır. Standart basma deneyi cihazları ortalama 1000 mm/dakika gibi düşük hızlarda çalıştığı için daha yüksek hızlarda gerçekleşecek düşme deneyleri için deney düzeneği kurulmuştur. Bu deney düzeneğinde belli ağırlıktaki çene belli bir yükseklikten serbest düşme yapılarak köpüğe çarptırılıyor. Çarpışma sırasında kuvvet, deplasman ve ivme verileri toplanarak dinamik davranışı ortaya koyulabilmektedir.

1952 yılında BASF firması tarafından alınan "Polimerlerden gözenekli kütleler elde etme metotları" patenti ile endüstriyel anlamda kullanılmaya başlanan köpük malzemelerin ancak 1990'lı yıllarda teorik çalışmalar yapılarak malzeme davranışı incelenmiştir. BASF firmasının tescilli ürünü olan strafor genişletilmiş polisitren köpüğe verdikleri isimdir.

1.2 Çalışmanın Amacı

Çalışmanın amacı polimerlerden üretilmiş köpüklerin dinamik davranışının deneysel ve sayısal yöntemlerle irdelenmesi, ambalaj malzemesi olarak kullanıldıklarında düşme ve çarpma sonucunda oluşabilecek plastik ve elastik şekil değişimin öngörülebilmesidir. Bu öngörü sayesinde ürünlerin ambalaj tasarımları henüz ürün tasarım aşamasındayken yapılabilecek ve kontrol edilebilecek, ürünün depolanma ve nakliye sırasında düşme ve çarpma sonucu hasar alması en aza indirgenecektir.

En çok kullanılan ambalaj malzemesi olan polimer esaslı köpükler düşük maliyetleri ve farklı geometrilerde üretilebilme özelliği ile tercih edilmektedir. Bu çalışmada genişletilmiş polisitren ve polietilen köpükler üzerinde dinamik davranışını tespit amaçlı çalışmalar yapılmıştır.

Ortalama bir çamaşır makinesinin ambalajı için 900 gram strafor malzemesi gerekmektedir. Hazırlanmış 1 kg strafor malzeme maliyeti 2,3 Euro'dur. Doğru yapılacak ambalaj tasarımı ile kullanılacak strafor miktarında azaltma ve makinenin gövdesel parçalarında malzeme ve işlem azaltma ile önemli bir maliyet ucuzlatma unsuru oluşturulmuş olur. Yılda 1 milyon üretilecek bir makine için sadece strafor malzeme miktarındaki %5'lik azaltma ile 10000 Euro tasarruf sağlanmış olacaktır.

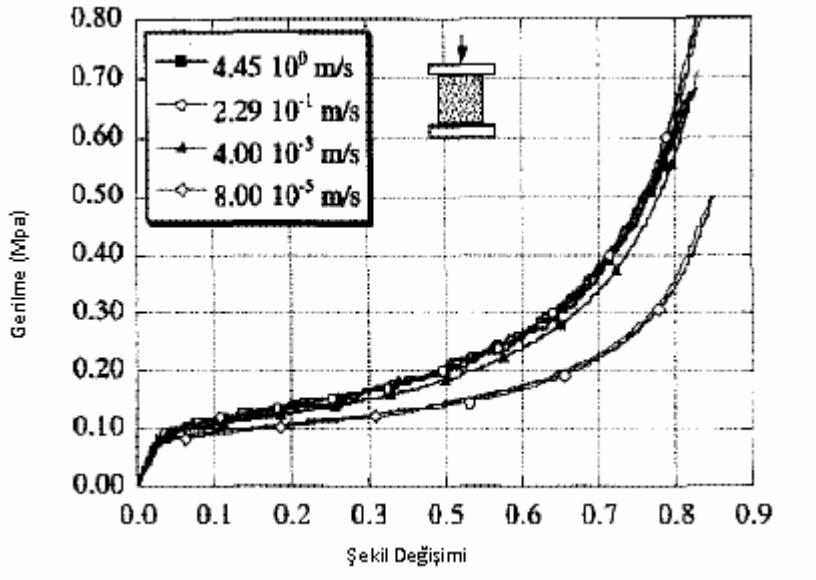
1.3 Literatür Araştırması

Zhang ve diğerleri düşük yoğunluklu polimerik köpüklerin malzeme modelinin oluşturulmasına çalışılmıştır [1]. Poliüretan(PU), polipropilen(PP), polisitren(PS) malzemelerin yüksek hızlı çarpışma altındaki davranışları şekil değişim hızı ve sıcaklık etkisi değişkenlerine odaklanarak, deneysel çalışmalarla formüle edilmiştir.

Sonuçlar sonlu elemanlar programları ile malzeme modeli yazılımı geliştirilerek simüle edilmiştir.

[1] Deneysel çalışmada düşük hızlı deneyler için Instron 1331 test cihazı, yüksek hızlı deneyler içinde Pnömatik ICI çarpışma makinesi kullanılmıştır. Instron cihazında 0,08 mm/saniye ile 250 mm/s arasında ASTM D1621 standardına göre deneyler yapılmıştır. Yüksek hızlar için ise 3–10 m/s değerlerinde, kuvartz yükölçer ve ivmeölçer ile veri toplanmıştır. Basit kayma deneyleri için numuneler L şeklindeki aparatlara yapıştırılarak kaymaya maruz bırakılmıştır. Hidrostatik basınç deneylerinde ise numuneler basıncı kontrol edilebilen su dolu haznenin içinde kauçuk bir paketleme ile sabitlenerek sıkıştırılmıştır.

[1] Oda sıcaklığında(20 ºC) yapılan deneyler sonucunda; PP köpüğün %80 şekil değişiminden sonra %20 kalıcı şekil değişimi göstererek yarı–rijit, PS malzeme ise esneklik göstermeden rijit ve PU köpük ise esnek olarak nitelendirilmiştir. Zhang ve diğerleri tek eksenli basma testlerinde gerilme-şekil değişimi grafiğinde (Şekil1.1) yükleme sonucu 3 rejim gözlemlemiştir. 1. rejim, hücresel duvarların bükülmesine kadar olan lineer elastik bölge, 2. rejim, esnek PU köpük için hücre duvarlarının bükülmesi, rijit PP ve PS köpük için plastik akmanın gerçekleştiği plato rejimidir. Son rejim ise artarak oluşan sertleşme bölgesidir.

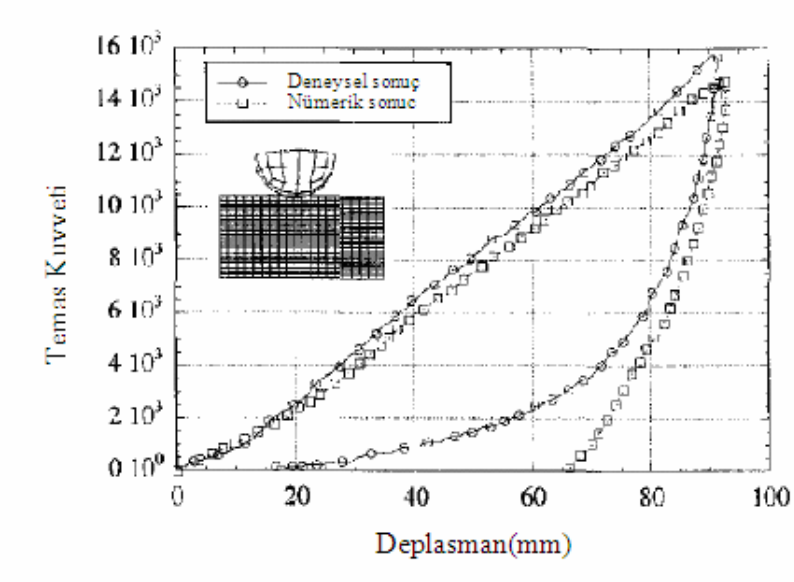


Şekil 1.1 : Tek Eksen Basma Altında Polisitren Köpüğün Gerilme-Şekil Değişimi Davranışı

Zhang ve diğerlerinin yaptığı deneysel çalışma sonucunda şekil değişiminin hızla ve sıcaklıkla olan bağlantısı malzeme sabitlerini de içerecek şekilde Denklem 1.1 formüle edilmiştir [1].

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0(\varepsilon) L(T) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{a+b\varepsilon} \tag{1.1}$$

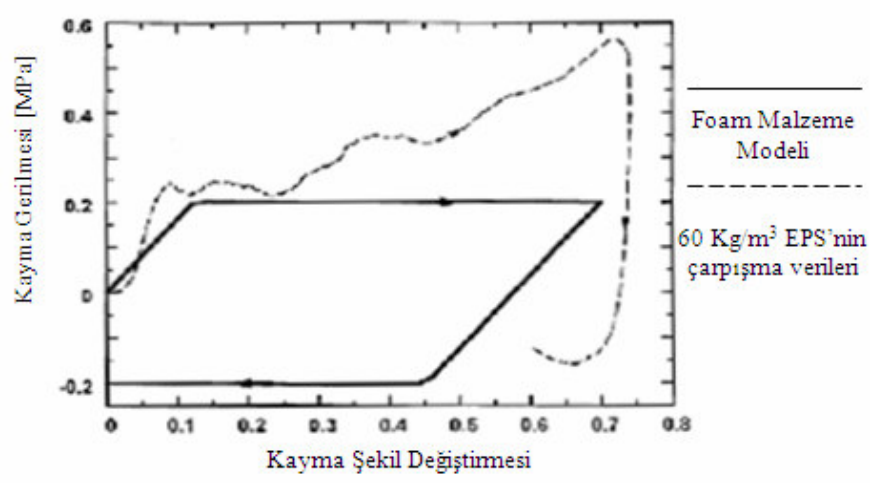
Deney sonuçları, LS-Dyna sonlu elemanlar yazılımında yapılan simülasyonlar ile karşılaştırıldığında yükleme sırasında önemli farklılıklar olmamasına rağmen, yükleme kaldırıldığında veriler birbirini tutmamaktadır (Şekil 1.2). Sonuçta polimerik köpük malzemenin şekil değişim hızına ve sıcaklığa bağlı, izotropik şekil değişimi yaptığı görülmüştür[5,6,7,8,9].



Şekil 1.2 : Küre Basma Deneyinde Polisitren Köpüğün Temas Kuvveti-Deplasman Davranışı

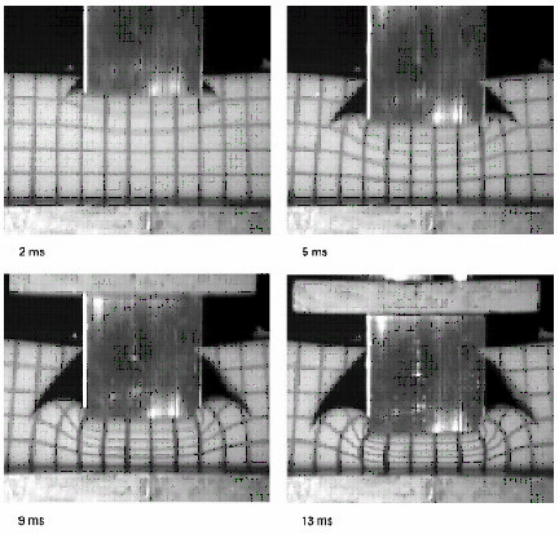
Mills ve Gilchrist araştırmalarında PS35 malzeme üzerinde çeşitli basma ve kayma deneyleri yaparak ABAQUS sonlu elemanlar yazılımının köpükler için yazılmış malzeme modeliyle simüle etmeye çalışmışlardır [2]. Köpüğün kırılmasından kaçınmak için basma deneylerinde piramit şeklinde köpük ve basma çenesi olarak ise dikdörtgen kesitli blok ve küre şekillerini kullanmışlardır. Mills ve Gilchrist deney sonuçlarını FOAM malzeme modelini kullanarak ABAQUS yazılımında simüle

etmişlerdir. Çıkan sonuçlardan malzeme modelinde özellikle kayma ve çekme deneylerinde akma sonrası sertleşme etkisinin olmadığı ve yükleme kaldırıldıktan sonraki davranışın test sonuçları ile örtüşmediği Şekil 1.3'de görülmektedir.



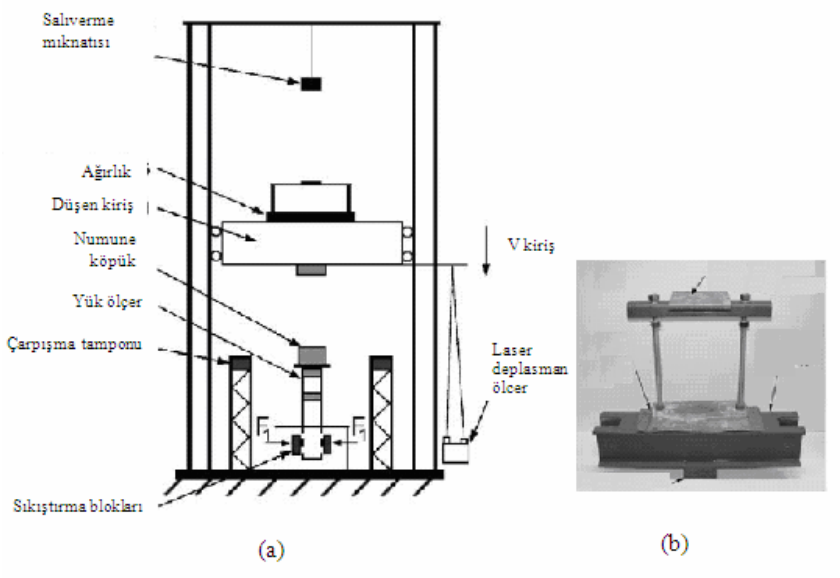
Şekil 1.3 : Yükleme Ve Yük Kaldırılırken Basit Kayma Davranışı

[2] Basma testlerinin gerilme-şekil dağılımını simüle etmekte uygun yöntem olduğunu belirten Mills ve Gilchrist, FOAM malzeme modelinin köpüğün sertleşmesi ve yükleme sonrasındaki davranışı dikkate alınarak iyileştirilebileceğini göstermişlerdir. Çalışmalarında dikdörtgen kesitli çene kullanarak basma testlerinin hızlı kamera çekimleri Şekil 1.4'de görülmektedir.



Şekil 1.4 : EPS 35 Köpüğün 50 mm Kenarlı Küp İle Ezilmesinin Video Kareleri

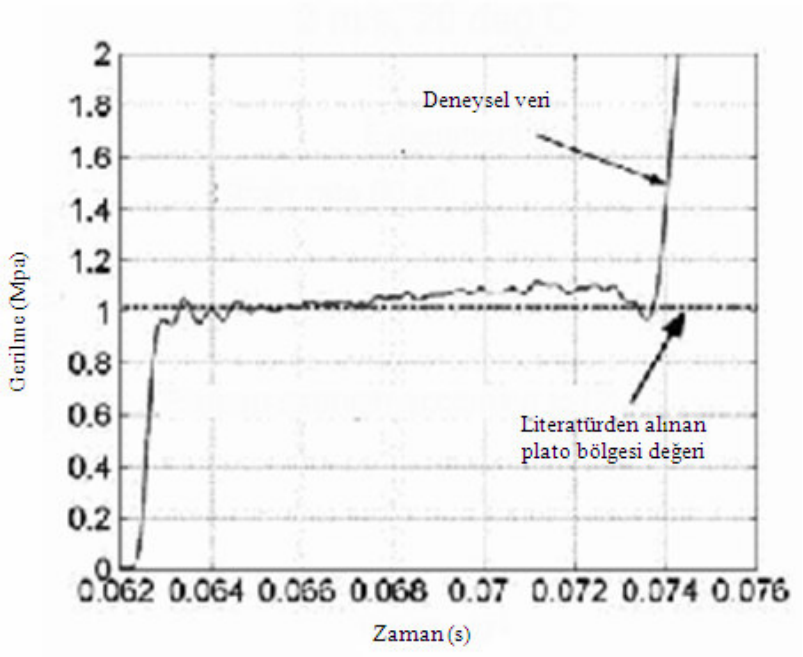
Hafif yük düşme testi ile köpüğün dinamik davranışını çıkarmaya çalışan Hallström ve Juntikka kendi deney düzeneklerini kurmuşlardır (Şekil 1.5) [3]. Özellikle otomotiv endüstrisi için gerekli sonlu elemanlar metoduyla yapılan çarpışma simülasyonları için köpüğün sıcaklıkla ve şekil değişim hızıyla değişen dinamik davranışını deneysel yöntemlerle ortaya çıkarmaya çalışmışlardır.



Şekil 1.5 : Düşme Düzeneği **(a)** Genel Tasarım **(b)** Düşen Kiriş

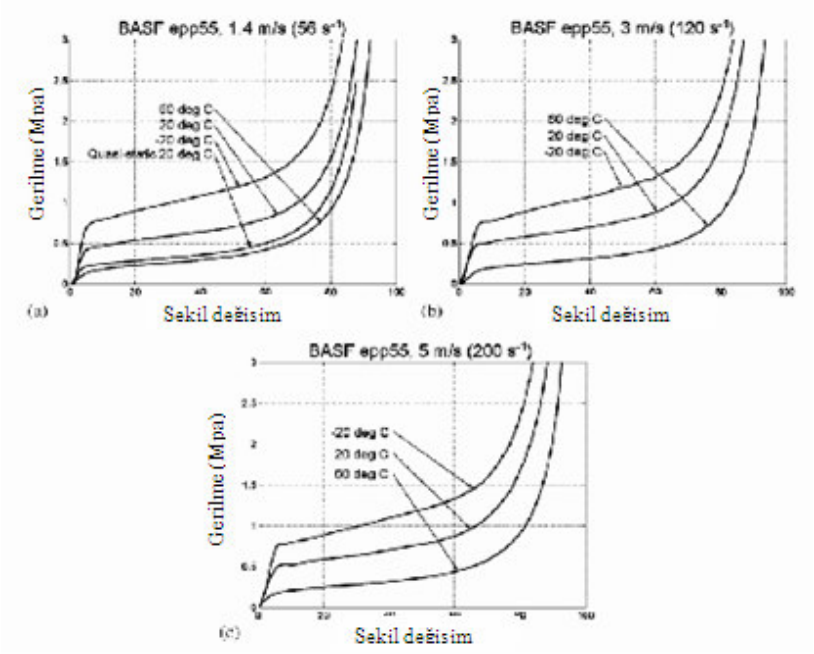
Kurdukları deney düzeneğinde 60 kN'luk yük ölçer kullanmışlardır. Düşen ağırlığın lazer ölçme cihazı ile aldığı mesafeyi ölçerek kuvvet-deplasman grafikleri çıkarmışlardır. Deney sonuçlarını daha önceki çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Şekil 1.6'da hidrolik test cihazıyla yapılan deneyin sonucuyla, kendi yaptıkları deney düzeneğinin sonuçlarını karşılaştırmışlardır [3].

Karşılaştırmadan da görüleceği üzere çok ufak farklılıklar görülmektedir. Bu farklılıklarda deney düzeneklerindeki titreşimim veri toplama üzerindeki etkisinden kaynaklandığını belirtmişlerdir [3].



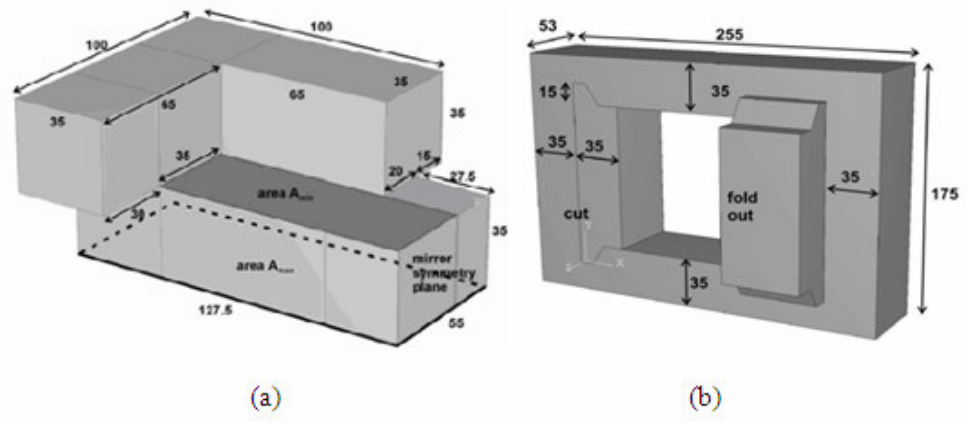
Şekil 1.6 : Deney Düzeneğinde Rohacell 51 Köpüğün 2 M/S Ve 20 C^o Dinamik Yük Etkisi

Sıcaklık parametresini değiştirerek yaptıkları deneylerde köpüğü dış ortamda koşullandırarak deney düzeneğinde test yapmışlardır. Köpüğün sıcaklıkla, dinamik davranışının değiştiğini Şekil 1.7'de ortaya koymuşlardır [3].



Şekil 1.7 : BASF EPP55 Dinamik Test Sonuçları **(a)** 1,4 m/s **(b)** 3 m/s **(c)** 5 m/s

[4] Mills ve diğerleri bir başka çalışmada iki farklı ambalajlama çeşidine 1 metre yükseklikten serbest düşme deneyi uygulayarak zaman-ivmelenme verisi toplamışlardır. Bu verilerden çarpma anındaki çarpma kuvveti değişimini elde etmişlerdir. Şekil 1.8 kullandıkları farklı ambalajlama tasarımları gösterilmiştir.



Şekil 1.8 : Ambalajlama Tipleri **(a)** Köşe Kapatmalı **(b)** Kenar Kapatmalı

5,6 kg ağırlığındaki cihazı polietilen köpükle korumaya aldıktan sonra karton kutu içine yerleştirerek kurdukları deney düzeneğinde düşme testi uygulamışlardır (Şekil 1.9). Amaçları polietilen malzemenin üretici tarafından hazırlanan yastıklama grafiklerini kullanarak doğru parametrelerle uygun köpük tasarımını bulmaktır. Yastıklama grafiklerinde; statik gerilme, çarpışma ivmesinden doğan "G" değeri ve düşme yüksekliğinin köpük kalınlığına oranı değerlerini için genelleştirilmiş grafiklerden bilinmeyen parametreyi bulmak mümkündür. Mills ve diğerleri yaptıkları deneylerden G değerini tahmin edip, yastıklama grafiklerinden uygun köpük kalınlığı değerlerini elde etmişlerdir [4].



Şekil 1.9 : Ürünün Köpükle ve Kartonla Ambalajlanmış Durumu

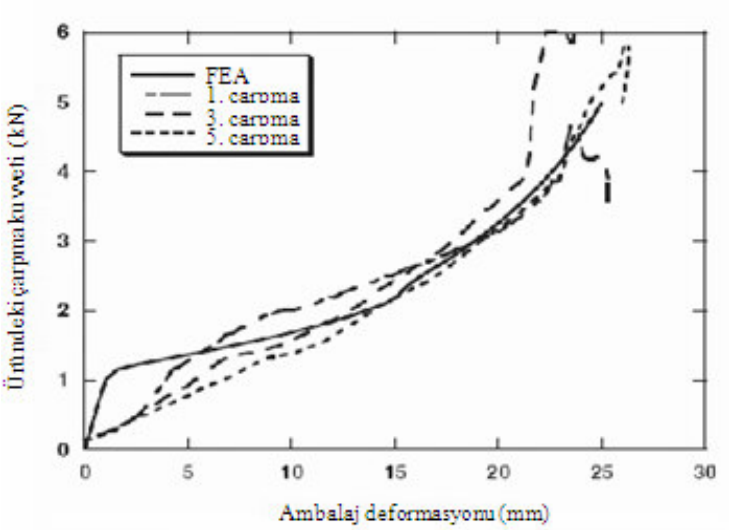
Köpüğün düşme sırasındaki davranışı, hücreleri içindeki gazın davranışına göre Denklem 1.2'deki eşitliğe uyarlanmıştır [4].

$$\sigma_c = \sigma_{c0} + \frac{\rho_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon - R} \tag{1.2}$$

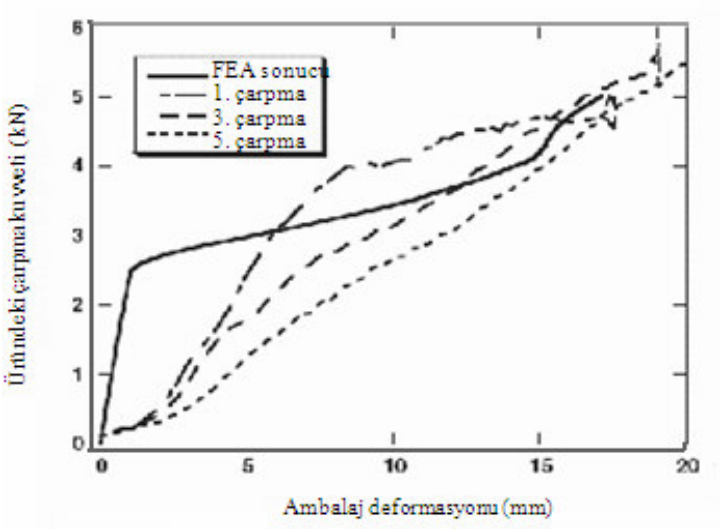
Denklem 1.2'deki ρ_0 ifadesi hücre içindeki gaz basıncını ifade etmektedir. Bu değer atmosferik basınç değeri olan 101 kPa 'dan düşük bir değer kabul edilmiştir. *R* değeri ise köpüğün bağıl nemini göstermektedir.

Yaptıkları deneyleri ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında simüle ederek karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda, deneylerde kullandıkları iki farklı yoğunluktan, 25 kg/m^3 yoğunluğa sahip malzeme, 35 kg/m^3 yoğunluğa sahip malzemeye göre daha fazla uyum olduğu görülmüştür [4].

Şekil 1.10 ve Şekil 1.11'de Ethafoam 220 ile ambalajlanmış köşe kapamalı tasarımın 1'inci, 3'üncü ve 5'inci çarpma ve sonlu elemanlar analizi sonuçları ve Ethafoam 400 ile ambalajlanmış köşe kapamalı tasarımın 1'inci, 3'üncü ve 5'inci çarpma ve sonlu elemanlar analizi sonuçları gösterilmiştir.

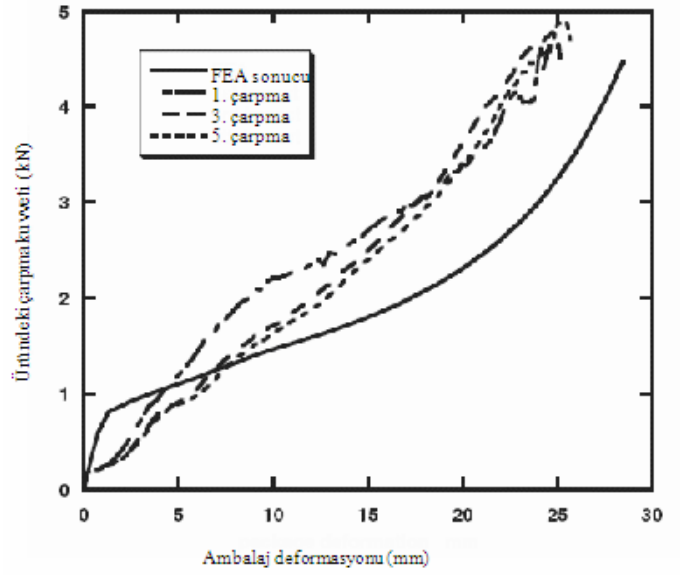


Şekil 1.10 : Ethafoam 220 ile Ambalajlanmış Köşe Kapamalı Tasarımın 1'inci, 3'üncü ve 5'inci Çarpma ve Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları



Şekil 1.11 : Ethafoam 400 ile Ambalajlanmış Köşe Kapamalı Tasarımın 1'inci, 3'üncü ve 5'inci Çarpma ve Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

İki farklı ambalajlama tasarımında ise kenar kapatmalı olarak tasarlanan ambalaj, köşeleri kapatacak şekilde tasarlanana göre daha uygun sonuçlar vermiştir (Şekil 1.12). Bunun nedeni olarak köşe kapatmalı tasarımdaki geometrinin daha karışık olması, kayma gerilmelerinin ve sürtünmenin daha fazla etkide bulunması olarak gösterilmiştir [4].



Şekil 1.12 : Ethafoam 220 ile Ambalajlanmış Kenar Kapamalı Tasarımın 1., 3., 5. Çarpma Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

1.4 Genişletilmiş Polisitren

1952 yılında BASF şirketi genişletebilir polisitren malzemesine strafor adını vererek üretmeye başlamıştır. Strafor pentan katkılı monositrenin polimerizasyonu ile elde edilen içi hava dolu hücresel parçacıklardan meydana gelir. Fiziksel özellikleri yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir. Hücre duvarlarının havayla dolması sonucu incelmesinden dolayı kimyasallara karşı polisitrenin kendisi kadar dayanıklı değildir. Organik çözücüler ve boya ile temasından etkilenir. Su ve birçok aside karşı ise polisitren kadar dayanıklılık gösterir. Strafor çoğunlukla yanıcı bir maddedir. Bileşimindeki değişiklikler ile aleve karşı dayanıklı olan tipleri BASF tarafından üretilmiştir. Strafor ambalaj malzemesi olarak kullanıldığı gibi ısı yalıtımı için binalarda da kullanılmaktadır. İçi hava dolu hücreli yapısı düşük ısı yalıtımı katsayısı oluşturur. Tablo 1.1'de genişletilmiş polisitrenin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Hafif ve maliyeti düşük olan strafor kalıp içinde şekil verilerek farklı geometrilere şekillendirilebilir. Kalıptan çıkan straforun kesilerek şekil verilebilmesi, onu her konum için uygulanabilir kılmaktadır (Şekil 1.13)[10,12,13].



Şekil 1.13 : Polimerik Köpüklerin Farklı Kullanım Alanları

Tablo 1.1 Ambalajlama Uygulamaları için Genişletilmiş Straforun Fiziksel Özellikleri

Özellikler[1)]	Test Standardı	Birim	Test Sonuçları		
Yoğunluk	EN ISO 845	kg/m³	20	25	30
10 °C 'deki Isıl iletkenlik	DIN 52612	mW/(M·K)	33–36	32–36	31–35
%10 Basınçta Basma Gerilmesi	EN 826	kPa	110–140	150–200	200–250
Ambalajlama Hesabı için izin verilen basma gerilmesi	DIN 55471, Kısım 2[2)]	kPa	39	55	71
Esneklik Mukavemeti	EN 12089	kPa	260–360	360–460	460–560
Kesme Mukavemeti	EN 826	kPa	230–330	300–400	380–480
Çekme Mukavemeti	DIN 53427	kPa	120–180	160–200	210–260
Elastizite Modülü	EN 826	MPa	3.5 – 4.5	5.0 – 8.5	7.5 – 11.0
Ozgül yastıklama faktörü, c*	DIN55 471, Kısım 2[2)]	1	2.5	2.5	2.5
Ozgül darbe direnç kapasitesi, e*	DIN55 471, Kısım 2[2)]	kJ/m²	150	200	250
Doğrusal genleşme katsayısı		1/K	5–7·10⁻⁶	5–7·10⁻⁶	5–7·10⁻⁶
Ozgül ısı kapasitesi	DIN 53765	J/(kg · K)	1210	1210	1210
Suya daldırıldıktan 7 gün sonraki Su emmesi	DIN 53 434	% Hacim	0.5 – 1.5	0.5 – 1.5	0.5 – 1.5
28 gün sonraki,		% Hacim	1.0 – 3.0	1.0 – 3.0	1.0 – 3.0
Su buharının yayılma akış yoğunluğu	DIN 52615	1	55	75	85

** 23 °C 'de, r.h. Bir yüzeyde % 0, diğerinde % 85.*
1) Test standardına göre
2) DIN 55 471 de bildirilen değer, Kısım 2

1.4.1 Genişletilmiş Polisitren İmalatı

Strafor belli kalınlıklarda blok levha ya da kalıp içinde şişirilerek elde edilir. Üretimi esnasında 3 adım vardır

1- Ön şişirme, 2- Yaşlandırma 3- Kalıplama

1.4.1.1 Ön Şişirme

Polisitren hammadde olarak buharla özel köpük ünitelerinde 80 ^{o}C ile 110 ^{o}C arasında ısıtılır. Bu işlem boyunca ısıtma süresine ve sıcaklığa göre malzemenin yoğunluğu 630 kg/m^3 'den 10 kg/m^3 'e kadar düşer. Strafor kalıp içinde üretileceği zaman genellikle 18 ile 30 kg/m^3 yoğunluğuna kadar ön şişirilme yapılır. Ön köpüklendirme işlemi yoğun strafor tanelerini küçük ve kapalı hücreli hale çevirir.

1.4.1.2 Yaşlandırma

Ön şişirme sonrası yoğunlukları düşen taneler ince hücre duvarlarına sahiptir. Bu haldeki taneler kolay olarak deforme olabilir. Yaşlandırma işlemindeki amaç kalıp

için taneleri uygun hale getirmektir. Ön şişirmeden konveyörlerle taşınarak gelen tanelerin içinde %5 miktarında su buharı ve daha fazla miktarda pentan vardır. Soğumayla birlikte tanelerin içinden çıkan pentan ve su buharının oluşturduğu vakum ile birlikte tanelere hava dolar. Havalandırmalı silolarda gerçekleşen bu işlem tane duvarlarını mekanik olarak kuvvetlendirir.

1.4.1.3 Şişirme

Yaşlandırmadan çıkan taneler kalıp içine alınır. Kalıpların yüzeylerindeki deliklerden buhar basılarak tanelerin biraz daha şişmesi sağlanır. Buhar taneleri tekrar yumuşatarak şişebilmesini sağlar. Kalıp içinde şişen taneler birbirine kaynayarak yapışır. Şişme işlemi için yeterli süre verildikten sonra buhar basılan deliklerden su basılarak soğuması sağlanır ve kalıptan çıkarılır.

1.4.2 Strafor geri dönüşümü

Strafor geri dönüştürülebilir bir malzemedir. Birçok yöntemle atık strafor farklı alanlarda kullanılabilir. Mekanik olarak 4–25 mm parçalara bölünen strafor drenaj malzemesi ve bitkileri toprak gibi tutucu olarak kullanılır. 1–4 mm arasında daha da ufaltılan strafor polisitren ilave edilerek tekrar kalıp içinde şekil verilerek kullanılabilir. Gözenekli tuğla birçok yapı malzemesine katkı maddesi olarak katılır.

Yanma sonucu çıkan ısı değeri yüksektir. Buhar ve elektrik santrallerinde yanıcı madde olarak kullanılabilir. Eğer hava basıncı yeterli olur ve yaklaşık 1000 ^{o}C sıcaklıkta yağyakıt(fuel oil) olarak geri dönüşümü yapılabilir. 1 kg EPS 1,2–1,4 litre yağ yakıta dönüşebilir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Açık Hücre Miktarını Ölçme

Polimerik köpükler küçük boşlukları veya hücreleri ayıran membran veya hücre duvarlarından meydana gelmiştir. Bu hücreler birbirleri ile bağlantılı (açık hücreler) veya kapalı, ya da her iki türün karışımından oluşuyor olabilir. ASTM D 2856–87 metodu ile nümerik olarak malzeme içerisinde bulunan açık hücre yüzdesi hesaplanabilmektedir. 100 % açık hücreli bir malzemede hücre duvarları kapalı hücre olarak düşünülür. Ayrıca uygun boyutlarda kesilmiş bir malzemeyi ancak bazı kesim proseslerinden geçirdikten sonra elde etmek mümkün olduğu için, bu esnada bir miktar kapalı hücreler açılır ve açık hücre olarak kabul edilir.

Kapalı hücre hücrenin tüm duvarları kapalıdır ve bu nedenle diğer hücreler ile bir bağlantısı yoktur. Açık hücrede ise hücrenin tüm duvarları kapalı değildir ve bu nedenle diğer hücreler ile bağlantısı vardır.

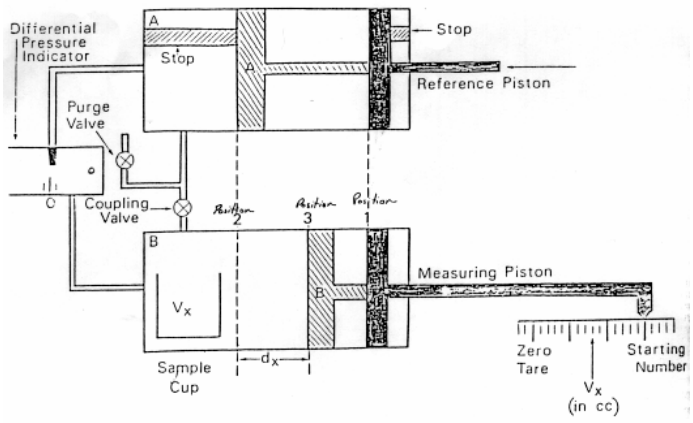
Bu test metodu; sıkıştırılmış bir gazın hacmi azaldığı zaman, basıncının artma prensibine dayanan Boyle kanununun uygulanmasıyla, polimerik köpüğün açık hücrelerinin hacminin hesaplanmasına dayanır. Cihaz; aynı hacme sahip iki silindire sahiptir. Silindirlerden bir tanesinde test edilecek numunenin konulması için dizayn edilmiş odacık vardır. Her iki silindirde bulunan pistonlar hacim değişimine izin verirler. Numune haznesinde numune varken, her iki silindirin de basıncı; hacimlerinin pistonlar sayesinde düşürülmesi ile eşit bir şekilde artırılır. Numunenin bulunduğu haznenin hacim değişimi, boş olan referans haznesinin (diğer silindir) hacim değişiminden daha azdır. Bunun nedeni de (bu hacim farkı) numunenin kapsadığı hacimdir. Numunenin kapsadığı hacim ile numunenin geometrik hacmi arasındaki fark, açık hücre hacmidir. Açık hücre miktarı gaz piknometresi cihazı ile ölçülür. Deneyde AccuPyc 1330 modelindeki piknometre kullanılmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Kullanılan gaz piknometresi AccuPyc 1330

2.1.1 Gaz Piknometresinin Çalışma Prensibi

Şekil 2.2'de cihazın iki haznesini göstermektedir (Numune haznesi boş). Haznelerin hacimleri birbirlerinin aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Basınç göstergesinin her iki tarafında da aynı basınç değerini sağlayabilmek için, bir pistonun herhangi bir hareketini, diğer piston da basınç tekrar dengeye gelene kadar tekrarlamalıdır. Eğer numune, numune odacığının içerisindeyken, iki piston da 2. pozisyonda ise ve aradaki vana kapalıysa, iki haznedeki basınç aynı olamayacaktır. Ancak, aradaki vana açılırsa, piston B, 2. pozisyondan 3. pozisyona geçer ve numune yerleştirilmesi ile B tarafında artan basınç tekrar diğer tarafın basıncıyla eşit konuma getirilebilir. Dijital bir sayaç sayesinde B pistonunun ne kadar hareket ettiği tespit edilebilir (d_x). Taban alanı da sabit olduğu için, yer değiştiren hacim (kapalı hücrelerinin kapladığı hacim) hesaplanabilir.



Şekil 2.2 : Gaz Piknometresinin Çalışma Prensibi

2.1.2 Açık Hücre Miktarı Ölçme Deney Sonuçları

Deneyde 10x10x30 mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır. Açık hücre miktarı köpüğün ısı yalıtımı özelliğinin yanı sıra dinamik davranışına etki etmektedir. Açık hücreler sayesinde sıkıştırma sırasında rahat gaz çıkışı olmakta ve sönümleme yeteneği iyileşmektedir. Aynı şekilde yük kalktıktan sonrada açık hücreli yapı kapalı hücreli yapıya göre daha az şekil değişimine uğrayacağından daha az kalıcı deformasyon oluşmaktadır. Bu durum açık hücre miktarının artması sönümleme yeteneğinin artması anlamına gelmekle birlikte sönümlenebilecek yük miktarını azalttığından olumsuz etkide yapmaktadır. Açık hücreli yapı yüke karşı daha az direnç gösterebilecektir. Pratikte %100 açık yada kapalı polimerik köpük bulunmamaktadır. Köpüğün dayanacağı yük, sönümleme yeteneği ve yük kalktıktan sonraki kalıcı deformasyonu kullanıldığı yerde istenilen değerlerde olması için uygun açık hücre miktarlı köpük kullanılmalıdır. Deneyler EPS 12, 20 ve 30 polietilen 24, 32 ve 58 için yapılmıştır. Sonuçlar tabloda özetlenmiştir.

Tablo 2.1: Açık Hücre Ölçümü Deney Sonuçları

Malzeme	Açık hücre miktarı (%) Deney 1	Açık hücre miktarı (%)
EPS12	29,09	27,86
EPS20	13,2	12,12
EPS30	10,88*	11,2*
PE24	73,02	70,2
PE32	37,73	36,94
PE58	26,1	23,72

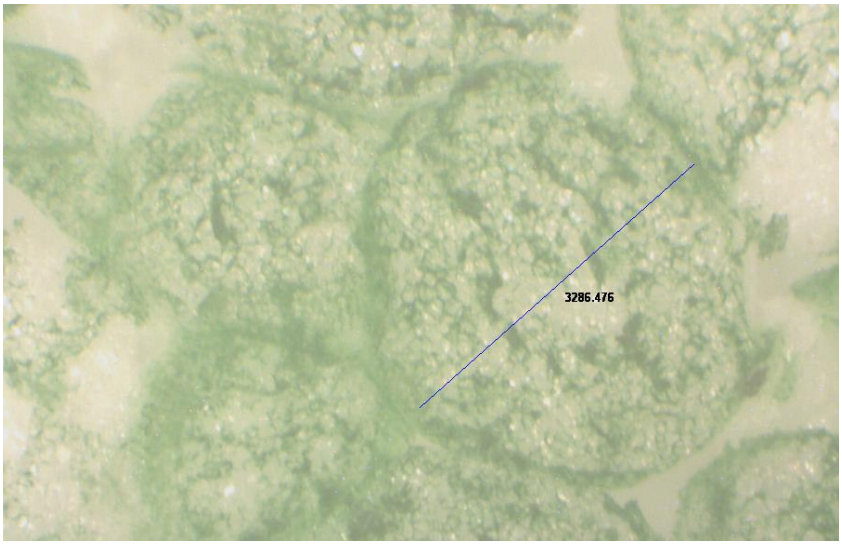
Açık hücre miktarının polietilen köpüklerde daha fazla olduğu görülmektedir. Yoğunluk açık hücre miktarıyla doğru orantılıdır. Yoğunluk fazlalaştıkça açık hücre miktarı azalmaktadır.

2.2 Mikroskop Çalışması

Polimerik köpüklerin içyapılarının anlaşılması için mikroskop çalışması yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında optik ve elektron mikroskobu kullanılmıştır.

2.2.1 Optik Mikroskop Çalışması

Bu çalışmada EPS 30 kg/m^3 yoğunluklu köpüğün optik mikroskopta fotoğrafları çekilmiştir. Kullanılan mikroskop optik olarak 7 kat büyütüldüğünde net görüntü vermektedir. 5 adet 30x30x30 mm olarak hazırlanan EPS30 mikroskopta incelenmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : EPS30'un Optik Mikroskopda 7 Kat Büyütülmüş Fotoğrafı

Köpük temel olarak tanecik adı verilen küresel yapıların birbirine yapışmasından oluşur. Bu taneciklerin çapını belirlemek üzere 5 tane numunede deney yapılmış ve mikroskobun kendi yazılımında ölçümler yapılmıştır. Numunelerin net olarak görülebilmesi için üzerleri renkli kalemle boyanmıştır. Sonuçlar Tablo 2.2'de özetlenmiştir.

Tablo 2.2 : Optik Mikroskop da Tanecik Çapı Ölçümleri

Numune No	Tanecik çapı (mm)
1	3,286
2	3,356
3	3,258
4	3,189
5	3,468
Ortalama	3,311

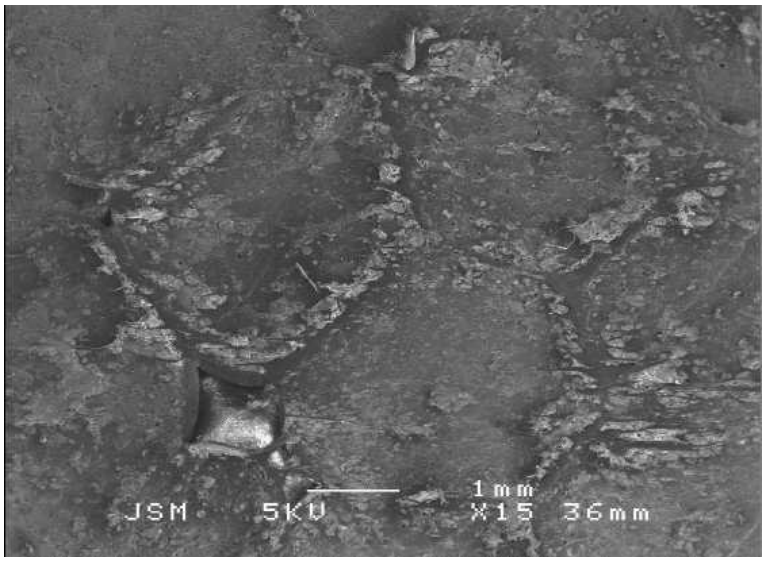
Ortalama tane çapı değeri 3,311 mm olarak bulunmuştur. Fakat bu değer deney sayısının arttırılmasıyla değişebilecektir. EPS malzemede olan tanecikler imalat sırasında farklı şişme oranları elde etmesinden ötürü boyut olarak homojen yapı göstermezler.

2.2.2 Elektron mikroskobu çalışması

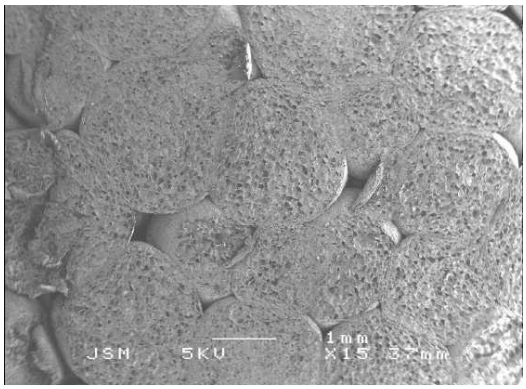
Bu çalışmada polimerik köpüklerin mikro yapılarının görüntülenmesi hedeflenmiştir. Elektron mikroskobu kullanılarak yapılan gözlemlerde 10x10x10 mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır. JSM-6400 elektron mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 2.4). EPS 20 ve 30 kg/m^3 ile polietilen 24 kg/m^3 yoğunluklarında 15,30 ve 100 kat büyütme yapılarak gözlem yapılmıştır (Şekil 2.5).[11]



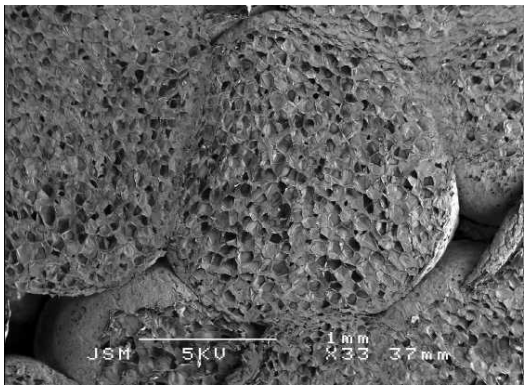
Şekil 2.4 : JSM-6400 Elektron Mikroskobu



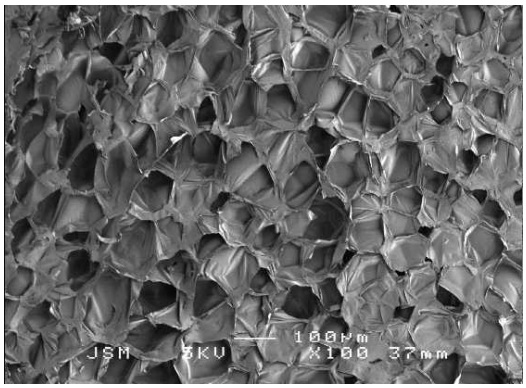
Şekil 2.5 : EPS 20 15 Kat Büyütülmüş Elektron Mikroskobu Fotoğrafı



(a)



(b)



(c)

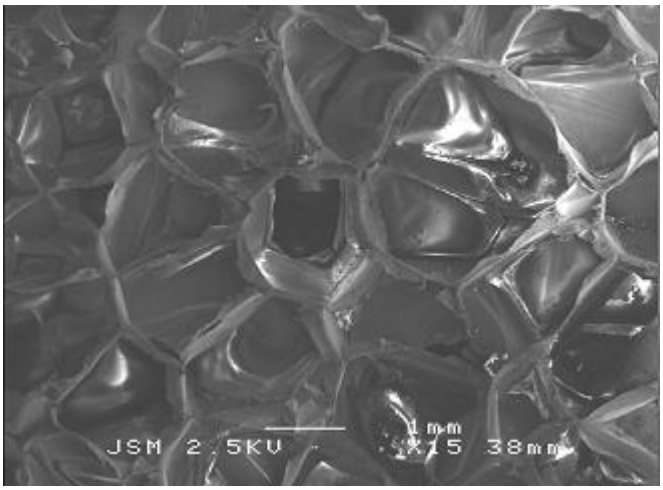
Şekil 2.6 : EPS 30 Elektron Mikroskobu Fotoğrafları (a) x15, (b) x30, (c) x100 Kat Büyütme

Şekil 2.6.a'da 15 kat büyütülen EPS malzemenin tanecik yapısı görülebilmektedir. Optik mikroskopta belirlendiği üzere tanecik boyutları homojen yapıda değildir. 100 kat büyütmede EPS30'un tanesinin içyapısı görülebilmektedir (Şekil 2.6.e). Taneciklerin içinde açık ve kapalı hücre duvarları petek doku şeklinde iken sıkıştırma işleminden sonra hücre duvarları arasındaki boşluklar kaybolmakta ve duvarlar birbirine değmeye başlamaktadır (Şekil.2.6.f). Köpüğün çarpmayı sönümlemesi bu içyapı davranışı sayesinde olmaktadır. Tanelerin içindeki hücre duvarları içinde var olan gazlar sıkıştırma işleminde kırılan hücre duvarlarından çıkarak köpüğün sıkışmasına izin vermektedir. EPS malzeme içinde az miktarda bulunan açık hücreler sıkışma işlemini kolaylaştırmaktadır.

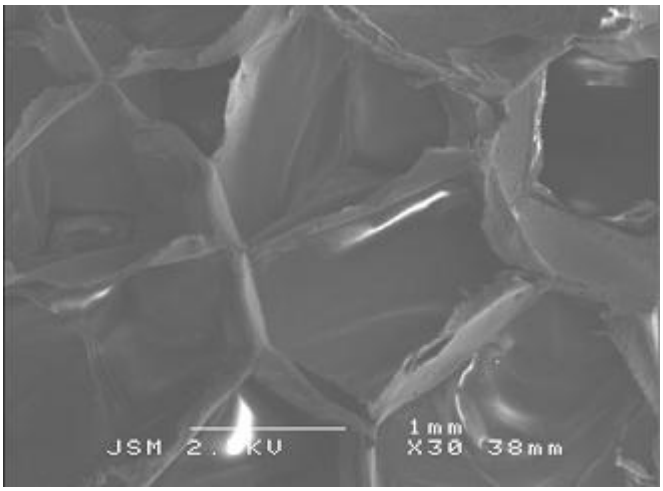
Yük kaldırıldıktan sonra EPS malzeme sıkışma esnasında oluşan vakumlama basıncı ile tekrar hücre içine gaz doldurarak şişebilmektedir. Hücre duvarlarında eğilme ve bükülme sonucu bir kısım kalıcı deformasyon olmaktadır. Şekil değişimi hızının hücre içindeki gaz çıkışına etkisi olacağından, sıkıştırma sonunda var olan kalıcı deformasyon bu durumdan etkilenmektedir. Şekil değişim hızı yüksek olduğunda, hücre içindeki gaz duvarlara daha fazla zarar vererek dışarı çıkmakta ve hücre duvarlarında daha fazla kalıcı deformasyon yapmaktadır.

Hücre duvarlarının imalat sırasında kazandıkları esneklik özelliği burada önem kazanmaktadır. Esnek olan hücre duvarları formunu koruyarak tekrar gazı içine alıp şişebilmektedir. Sıkıştırma sonrasında açık hücre miktarı artmaktadır ve ikinci bir sıkıştırma işleminde köpüğün sönümleme yeteneği azalacaktır.

Şekil 2.7'de Polietilen 24'ün mikroskop incelenmesinde, açık hücre oranının EPS'ye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Sıkıştırma kalktıktan sonra açık hücreler kolayca içine gaz doldurup tekrar şişebilmektedir. Hücre duvarlarında EPS deki gibi kalıcı deformasyon oluşmaktadır. Polietilen hücre duvarlarının açık yapısı sayesinde eski formuna daha iyi dönebilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.7 : PE 24 Elektron Mikroskobu Fotoğrafları (a) x15 (b) x30 Kat Büyütme

2.3 Basma Deneyleri

2.3.1 Basma deney cihazı

Köpüğün dinamik davranışını belirlemek için basma deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler için Zwick Z020 basma ve çekme cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.8). Bu cihaz vidalı mil üzerinde çeneyi hareket ettirerek basma yapmaktadır. Cihaz maksimum 1000 mm/dak sabit hızla çalışmaktadır. Deneylerde düz ve silindirik basma çeneleri

kullanılmıştır. Deney sonucunda cihazın yazılımı kuvvet ve şekil değişimi verilerini vermektedir.



Şekil 2.8 : Zwick Z020 Basma ve Çekme Cihazı

2.3.2 Düz basma deneyleri

Düz basma deneyleri sabit ve düz bir plaka üzerine koyulan ve Şekil 2.9'da görülen 50x50x50 mm boyutlarındaki numunenin, Şekil 2.10'da görülen hareketli düz bir çene ile ezilmesi ile gerçekleşmektedir. Basma hızı olarak 200, 600 ve 1000 mm/dak hızları kullanılmıştır. Deneyler EPS 12, 20 ve 30 Polietilen 24, 32 ve 58 için yapılmıştır (Ek A). Deney için numuneler elektrikli testere ile kesilerek hazırlanmıştır.

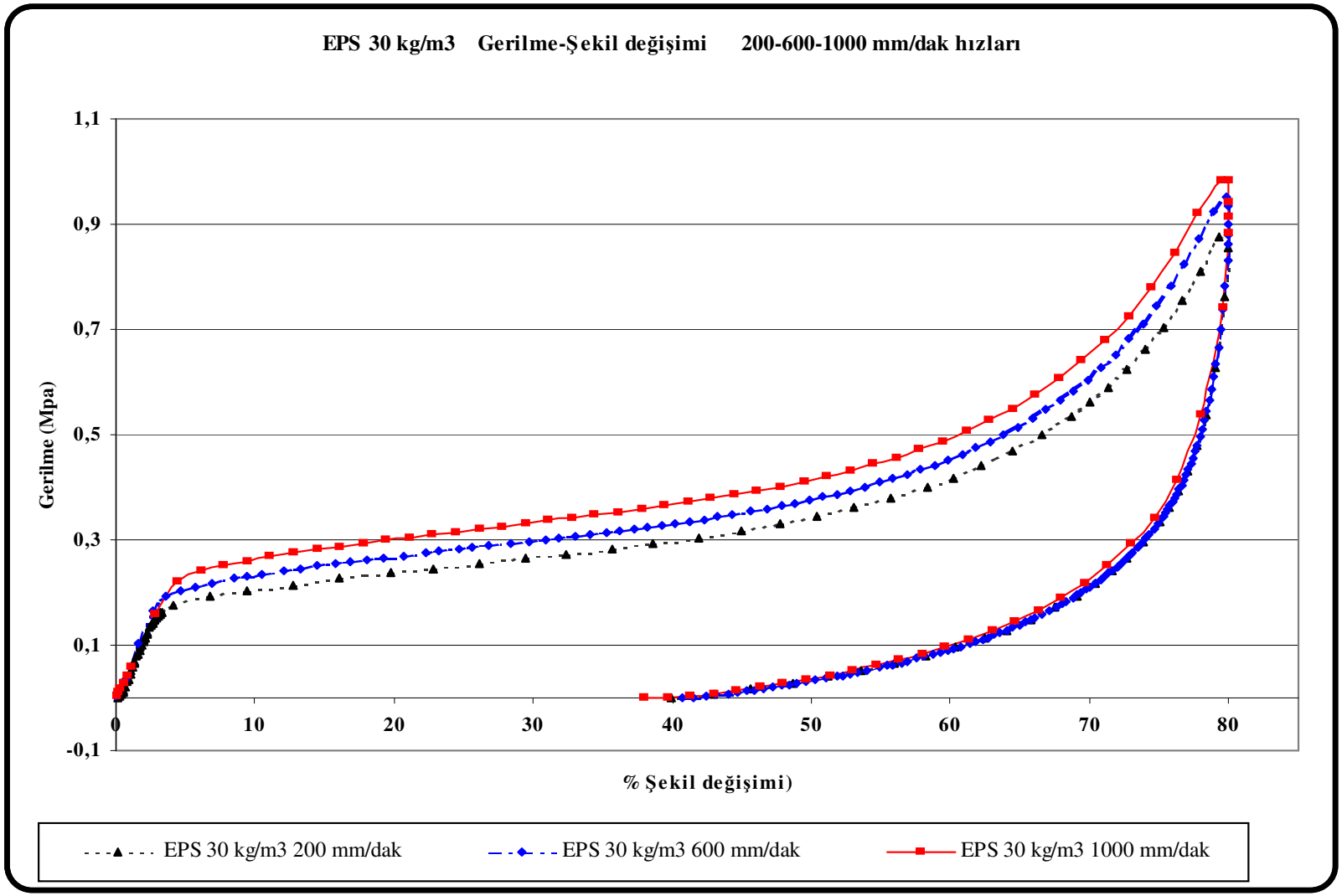


Şekil 2.9 : 50x50x50 mm boyutlarında hazırlanan numune

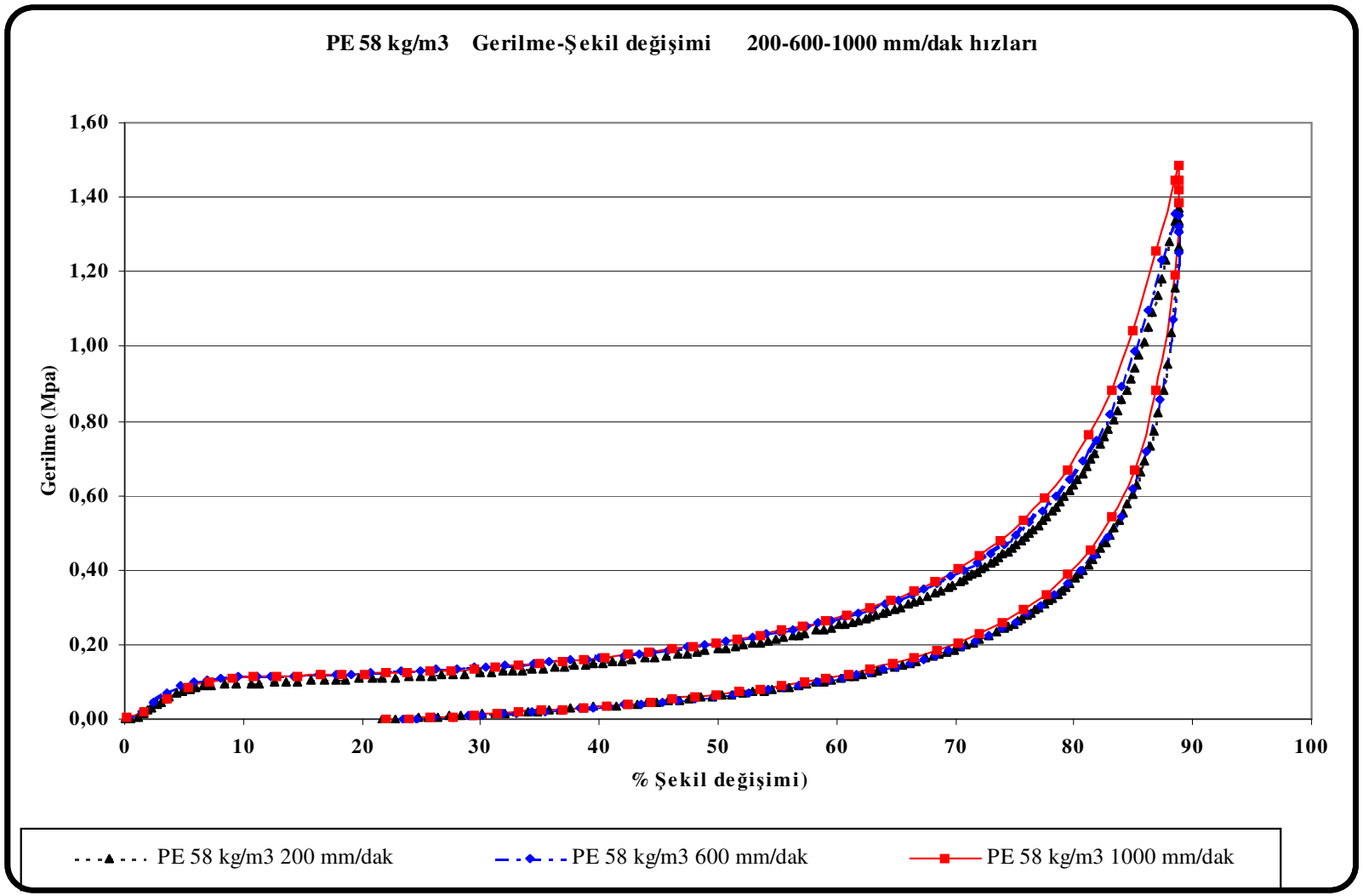


Şekil 2.10 : Düz basma çeneleri

Deneylerde %80 şekil değişimi yapılmıştır. %80 şekil değişiminden sonra yük aynı hızda kalkarken de veri alınmıştır. Yükleme ve yükün kaldırılması olarak 1 çevrimlik deneyler yapılmıştır. Deneylerden elde edilen kuvvet ve deplasman verileri kullanılarak gerilme-şekil değişimi verileri hesaplanmıştır. Deney sonuçları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : EPS 30 Düz Basma Deney Sonuçları



Şekil 2.12 : PE 58 Düz Basma Deney Sonuçları

Deney sonuçları incelendiğinde EPS köpüklerde şekil değişim hızının gözle görülür bir etkisi bulunmaktadır (Şekil 2.11). 1000 mm/dak hızda yapılan basma deneyinde 200 mm/dak hızla yapılan deneye göre aynı deplasman için daha fazla gerilme oluşmuştur. Yani hız arttıkça şekil değişimi zorlaşmaktadır. Bu etki hızlı şekil değişiminde hücreler içindeki gaz çıkışının daha fazla zorlamalı olmasıdır. Düşük hızlarda gaz çıkımı daha kolay olduğundan köpük daha az direnç göstermektedir. Bu durum çarpma gibi yüksek hızlarda oluşan basmada köpüğün sönümleme etkisini azaltacaktır. Ambalajı olarak kullanılan ürün yüksek hızlı çarpmada daha fazla kuvvete maruz kalacaktır. Bu durumda hasar olasılığını arttırmaktadır. Bu etki polietilen de fazla görülmemektedir. Şekil değişim hızının değişmesi oluşan gerilme değerlerini fazla etkilememektedir. Bu durumu polietilenin açık hücre miktarının daha fazla olmasıyla açıklayabiliriz. Açık hücre duvarlarından kolayca çıkan gaz basma hızı artsa bile ek bir gerilim oluşturmamaktadır.

EPS 30 1 Mpa ‘gerilim göstererek %80 şekil değişimi yapmaktadır. Bu değer EPS 12’de 0,5 Mpa ‘a kadar düşmektedir. Yoğunlukla köpüğün dayanımı doğru orantılı olarak artmaktadır. Polietilen de ise PE 58 1,6 Mpa gerilme değerlerine dayanım gösterse de şekil değişimiyle artan eğrinin eğimi sönümleme yeteneğinin az olduğunu göstermektedir. Polietilen açık hücre miktarının fazla olmasından ötürü kolayca şekil değiştirebilmektedir. Bu durum onun sönümleme yeteneğini düşürüyor.

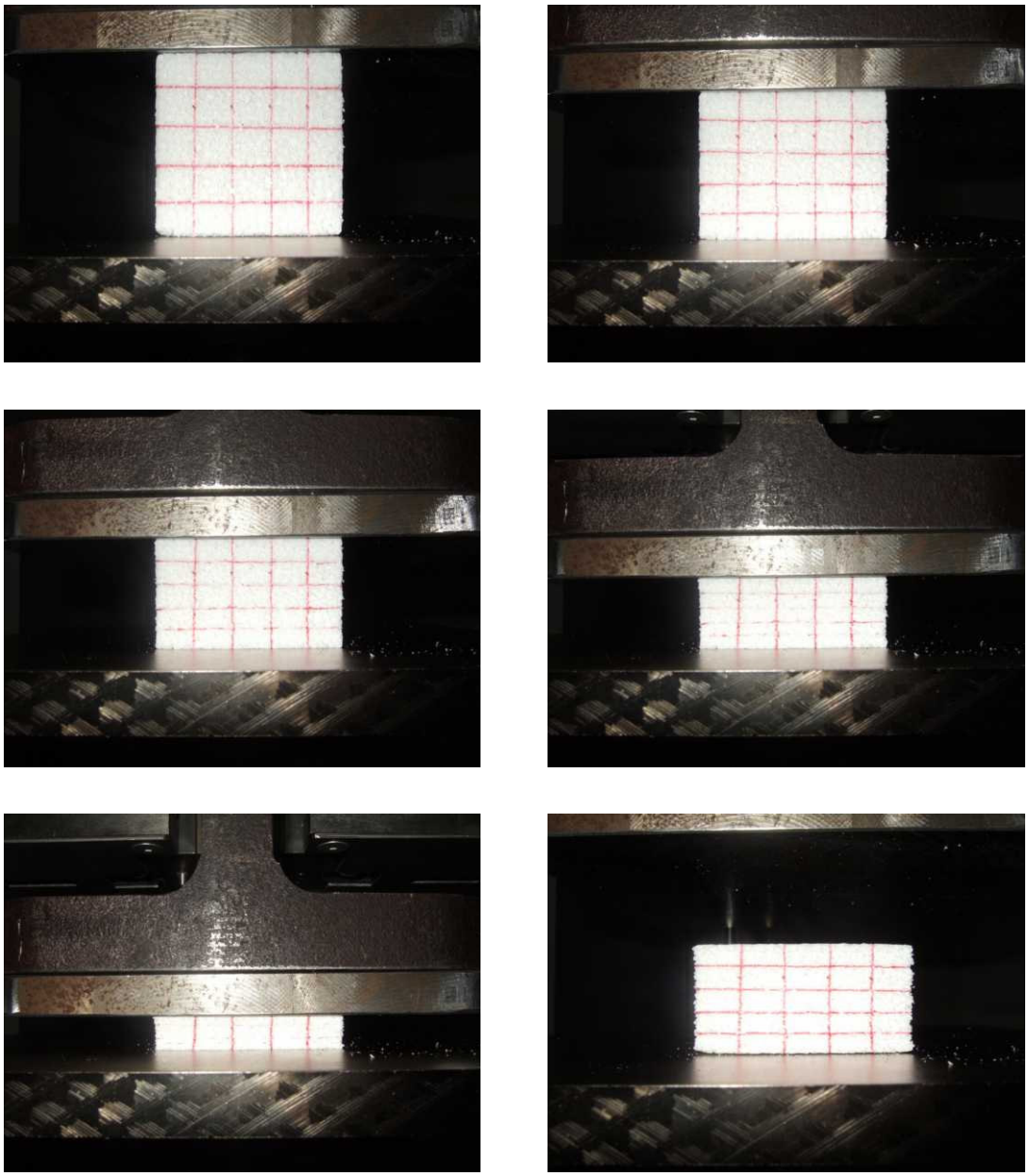
EPS köpüklerde kuvvet-şekil değişimi eğrisinin ilk kısmında elastik bölge olarak tanımlayabileceğimiz doğrusal bir kısım bulunmaktadır. Bu kısım polietilen de çok az sürmektedir. Elastik bölgenin bitimiyle kuvvet sönümlemenin en fazla görüldüğü daha yatay olan plato bölgesi başlamaktadır. Polietilen ile EPS arasındaki sönümleme yeteneklerini en iyi % 50 şekil değişimi sırasında sahip oldukları gerilme ile karşılaştırabiliriz. EPS polietilene göre daha fazla gerilmelere ulaşabilmektedir. Polietilen üzerine uygulanan kuvvet karşısında hemen ezilerek plato bölgesinde küçük kuvvetleri sönümleyebilmektedir (Şekil 2.12). Pratikte de polietilen daha az ağırlığa sahip ürünlerin ambalaj malzemesi olarak kullanılmaktadır. EPS ise büyük yükleri plato bölgesinde sönümleme yeteneğine sahiptir.

Plato bölgesinden sonra sertleşme bölgesi başlar. Köpük bu bölgede içindeki boşluk miktarını iyice azaltmıştır. Daha fazla yer bulamayan hücre duvarları gözeneksiz bir

malzeme gibi davranarak dayanımını arttırmaktadır. Bu bölgede gerile değerlerinin hızla artması sönümleme yapamayacak kadar fazladır. Ambalaj tasarımı yaparken de köpükten % 80 şekil değişimi beklenmez. % 20 ile % 50 oranlarında ezilme miktarı öngörüsüyle kullanılacak köpük kalınlığı ve yoğunluğu belirlenir.

Şekil değişimi hızı arttıkça yükleme kaldırıldıktan sonra köpüğün tekrar eski şeklini kazanması sonucunda oluşan plastik şekil değişimi de artmaktadır. Yüksek hızlı basmada hücre duvarlarının kalıcı şekil değişimi artmaktadır. Çarpma etkisi sonucu hücre duvarlarında kalıcı şekil değişimi artmaktadır. Bu durum daha yüksek hızlı deneylerde daha net görülebilecektir.

Aynı hızda yapılan basma deneylerinde EPS 30 diğer yoğunluklara göre daha fazla gerilmeye maruz kaldığı için plastik şekil değişimi miktarı da artmaktadır. Yoğunlukla birlikte yapıdaki hücre sayısının artması sıkışma sonucunda daha fazla gerilme yaratmaktadır. Daha dar alanda bükülen hücre duvarları oluşan fazla gerilme ile kalıcı şekil değişimi göstermektedir. Bu durum polietilende fazla görülmemektedir. Aynı hızdaki basma deneylerinde polietilen yükleme kaldırıldıktan sonrada aynı plastik şekil değişimini göstermişlerdir. Bunun sebebi de açık hücrelere sıkışma sırasında çıkan gaz kapalı hücrelere nazaran daha kolay geri dolmakta ve köpük şişmektedir.



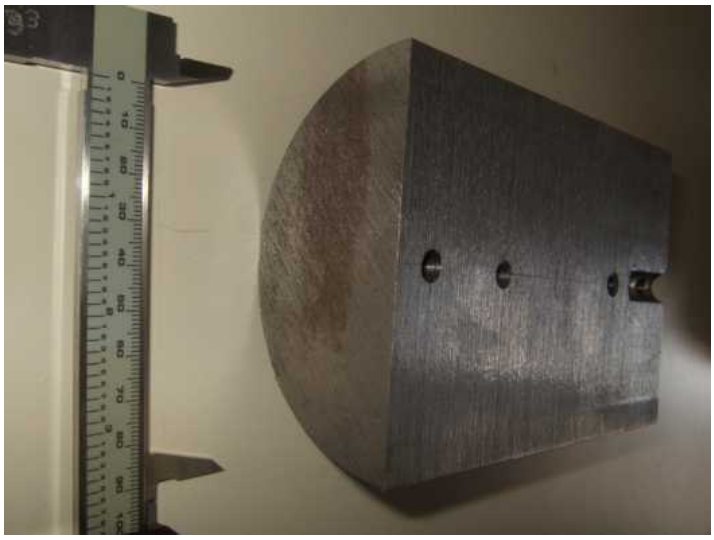
Şekil 2.13 : EPS 30 Düz Basma Deney Fotoğrafları

Şekil 2.13'deki düz basma deneyi fotoğraflarında da görüleceği üzerine köpük basma yönündeki kesitinde homojen bir şekil değişimi göstermektedir.

2.3.3 Silindirik çene ile basma deneyleri

Zwick basma cihazında yapılan silindirik basma deneylerinde 100 mm çaplı silindirik bir çene kullanılmıştır (Şekil 2.14). 150x50x50 mm boyutlarındaki

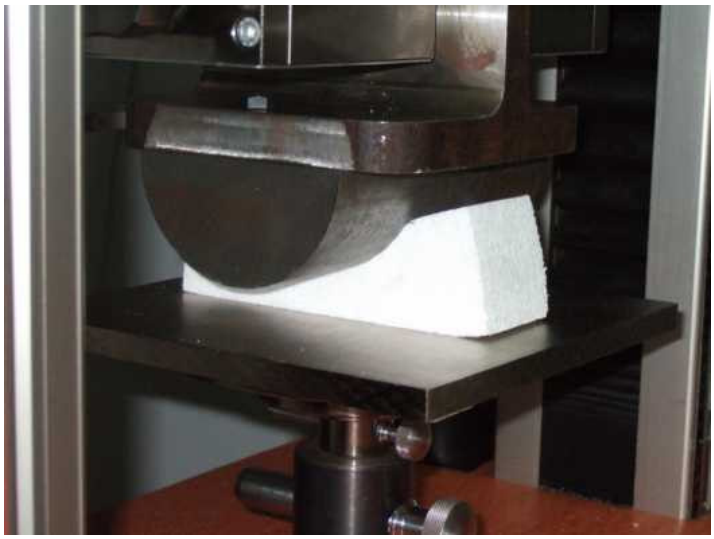
numuneler elektrikle testere ile kesilerek elde edilmiştir (Şekil 2.15). 150 mm genişliğinin orta noktasına silindirik çenenin basılması ile kuvvet-şekil değişimi verileri elde edilmiştir (Şekil 2.16). Silindirik basma deneyleri 100 mm/dak basma hızıyla yapılmıştır.



Şekil 2.14 : Silindirik Basma Çenesi

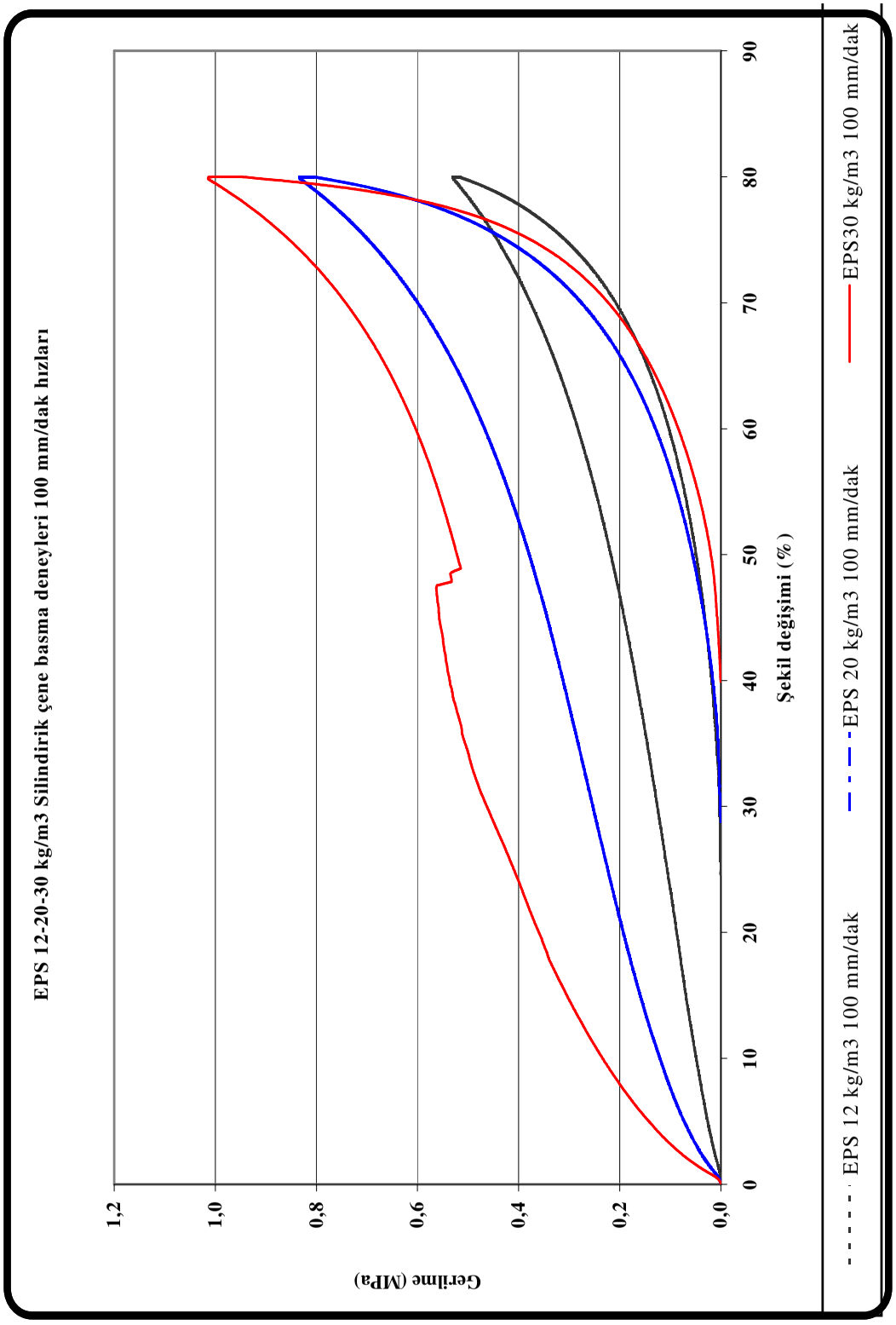


Şekil 2.15 : Silindirik Basma Deneylerinde Kullanılan 150x50x50 mm Numune

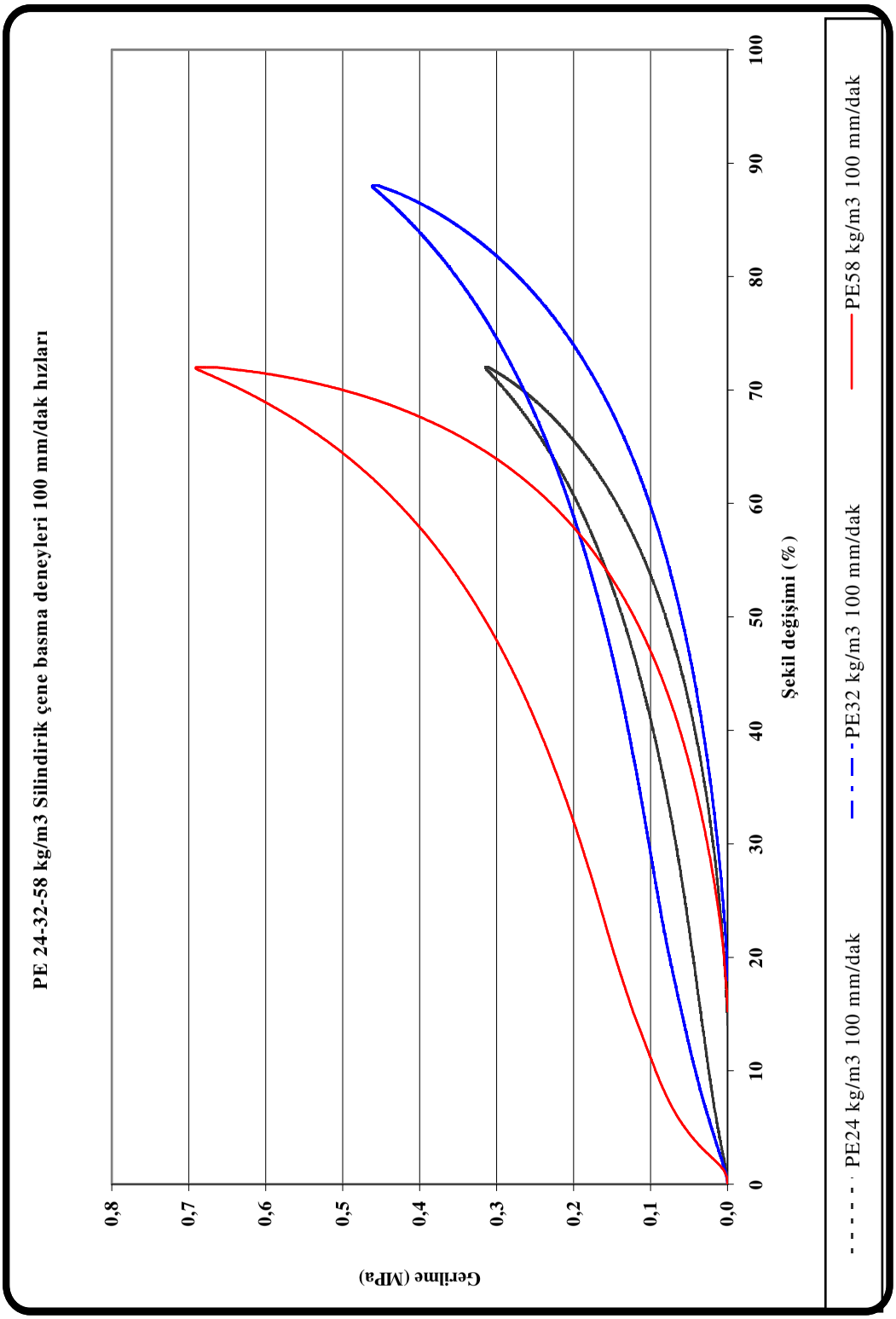


Şekil 2.16 : Silindirik Basma Deneyinin Yapılış Şekli

Silindirik basma deneyleri ile iki eksen basma uygulanmış olur. Numunelerin basma yüzeyinden büyük olmasından dolayı numuneler ambalajlamadaki gibi bölgesel yüklere maruz kalmaktadır.



Şekil 2.17 : EPS Köpüklerine Silindirik Çene ile Basma Deney Sonuçları



Şekil 2.18 : PE Köpüklerine Silindirik Çene ile Basma Deney Sonuçları

Silindir çene ile basma deneylerinde düz tek eksen basma deneyindeki gibi belirgin bir elastik bölge görülmez (Şekil 2.17-18). Tek eksen basmada geçerli olan yoğunluk etkisi burada da geçerlidir. Yoğunluk arttıkça şekil değişimi için daha fazla kuvvet gerekmektedir. EPS 30 % 50 şekil değişimi sonunda kırılmaya uğramıştır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 : EPS 30 Silindirik Çene Basma Deneyi Sonrası Kırılmış Durumu

3. DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI VE KURULUMU

3.1 Genel Tasarım Kriterleri

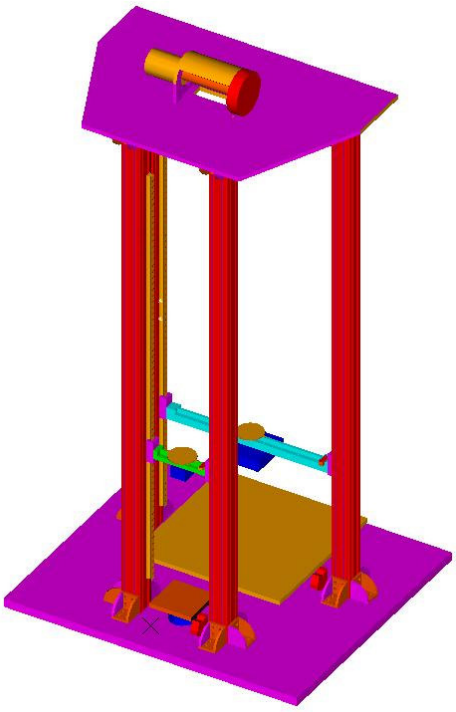
Deney Düzeneği Tasarım Ambalaj malzemesi olarak kullanılan polimerik köpüklerin düşme ve çarpmasının incelenebilmesi için yüksek hızlarda çarpma verilerinin elde edilmesi gerekir. Bu çalışmada köpük numunelerinin 1m/s ile 5m/s hızları arasında çarpma deneylerinin gerçekleştirilmesi için deney düzeneği tasarlanmıştır. Temel tasarım mantığı belli bir yükseklikten düşürülen belli ağırlıktaki çenelerin köpük numunesine çarpması anında kuvvet ve deplasman verilerinin toplanmasıdır. Düşen ağırlık iki ray üzerinde serbest düşme ile düşürülmektedir. Sürtünmenin daha az olması için iki ray kullanılmıştır. Raylar arasındaki mesafe arttıkça sistemdeki titreşim miktarı da artacağından küçük numune boyutları için daha küçük aralıklı iki ray kullanılmıştır. Büyük numuneler için ise daha geniş aralık kullanılmıştır.

Konstrüksiyonun altında ağırlığı 300 kg yakın çelik bir plaka kullanılarak ağırlık merkezinin yere yakın olması amaçlanmıştır. Kullanılacak raylar şekilli alüminyum profillere bağlanmıştır. Bu profiller farklı geometrileri ile hem düşme sırasında raylar arası açıklığın açılmasını engellemektedir. Profillerin üzerindeki kanallardan raylar çok sayıda civata ile montajlanmıştır. Civatalar eşit sıkma momentleri ile sıkılarak rayların dikey doğrultuda gönyeye gelmesi sağlanmıştır.

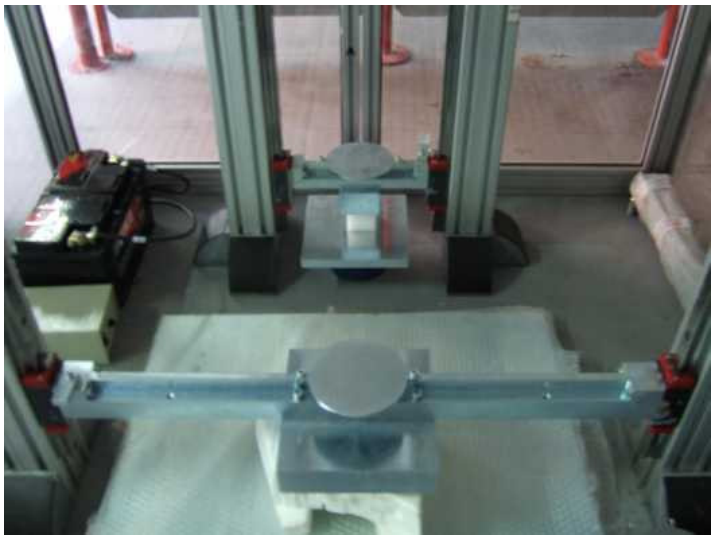
Rayların üzerindeki araba adındaki bilyalı yataklara bağlanan kirişler serbest düşme ile düşerek istenen hızlara erişilmiştir. Kirişlerin altına civata ile bağlanan çeneler çelik plakadan yapılmıştır. Köpük numune iki rayın ortasında koyulmaktadır. Kuvvet verisini toplayabilmek için kullanılan yük ölçer alttaki ağır çelik plakaya sabitlenmiştir. Yük ölçerin üzerine numuneyi koyabilmek için taşlanmış çelik plaka koyulmuştur.

Düzenekte kısa aralıklı raylarda 3 ile 6 kg arasında ağırlıklar düşürülerek 50x50x50 mm boyutlarındaki numunelerin çarpma etkisi incelenmek istenmiştir. Geniş aralıklı kısımda ise 30 ile 60 kg arasında değişen ağırlıkların düşürülerek daha büyük boyutlu numuneler üzerinde çarpmanın etkisiyle oluşan kuvvet ve deplasman verileri toplanmak istenmiştir.

Düşürülme yüksekliği 1 ile 5 m/s hızlarını elde edebilmek için en fazla 2 metre olacak şekilde tasarlanmıştır. Büyük ağırlıkların bu yüksekliğe çıkarılması için düzeneğe vinç montaj edilmiştir. Raylar arasındaki kirişlerin vinç ile kaldırılması sağlamak için bir elektromıknatıs kullanılmıştır. Vincin halatının ucuna bağlanan elektromıknatıs manyetik etkideyken kirişi tutmakta, vinç istenilen yüksekliğe çekildikten sonra ise manyetik etkisi bitirilerek kirişin ve ona bağlı çenenin serbest düşme ile düşürülmesi sağlanmıştır. Köpüğün üzerine düşen çenenin yüksekliği lazer mesafe ölçme cihazı ile hassas bir şekilde ölçülerek köpüğün şekil değişimi elde edilmiştir. Köpüğün üzerinde bulunan yük ölçer ile de kuvvet verisi toplanmıştır. Kirişin üzerine bağlanan bir ivmeölçer ile düşme hızının çarpma anındaki değişimi ölçülmüştür. Şekil 3.1'de tasarlanan düşme deney düzeneğinin CAD modeli, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de de resimleri görülmektedir.



Şekil 3.1 : Düşme Deney Düzeneği CAD Modeli



Şekil 3.2 : Düşme Deney Düzeneği Dar ve Geniş Aralıklar



Şekil 3.3 : Düşme Deney Düzeneği Genel Resmi

Çarpma olayının çok kısa süreler de gerçekleşmesinden dolayı yüksek frekans değerlerinde veri toplayabilmek önemlidir. Bunun için 16 kanallı ve 50 kHz aralığında veri toplayabilen cihazlar kullanılmıştır. Deney sonucunda kuvvet, deplasman ve hız verilerini toplanmıştır. Bu verileri, aynı zaman aralığında işleyerek köpüğün dinamik davranışı incelenmiştir.

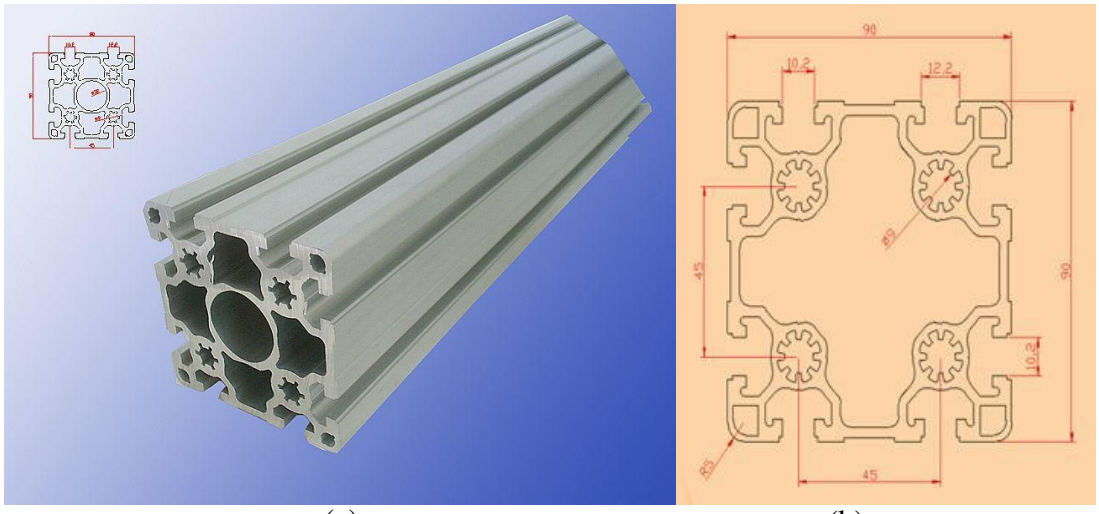
3.2 Deney Düzeneğinin Kısımları

Kurulan deney düzeneğini 3 kısımda ele alabiliriz.

1- Düzenek konstrüksiyonu
2- Düşürülen kirişler
3- Veri toplama sistemi

3.2.1 Düzenek Konstrüksiyonu

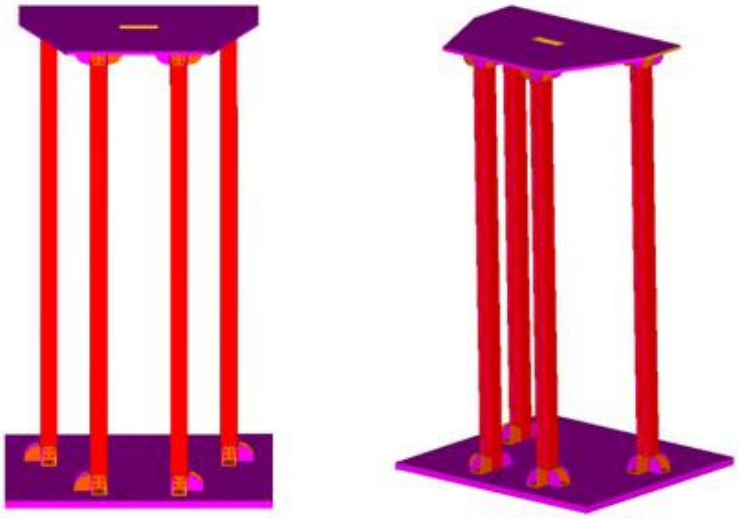
Deney düzeneğinde kullanılacak rayların dikey konumlandırılması için alüminyum profiller kullanılmıştır. Standart profillerde sistemde düşürülme sırasında titreşim miktarının fazla olacağı öngörülmüştür. Bu yüzden "Sigma profil" adıyla anılan çektirme yöntemiyle üretilen 90x90 mm boyutlarındaki profiller kullanılmıştır (Şekil 3.4). Bu profillerin kenarlarında kolay bağlantı için kanallar bulunmaktadır. Kanalların içine giren tırtıllı sonumlar sayesinde profillerin dik veya açılı köşe bağlantıları kolayca yapılabilmektedir.



(a) (b)

Şekil 3.4 : Alüminyum Profiller (a) 90x90 mm Profil Resmi (b) 90x90 mm Kesit Teknik Resmi

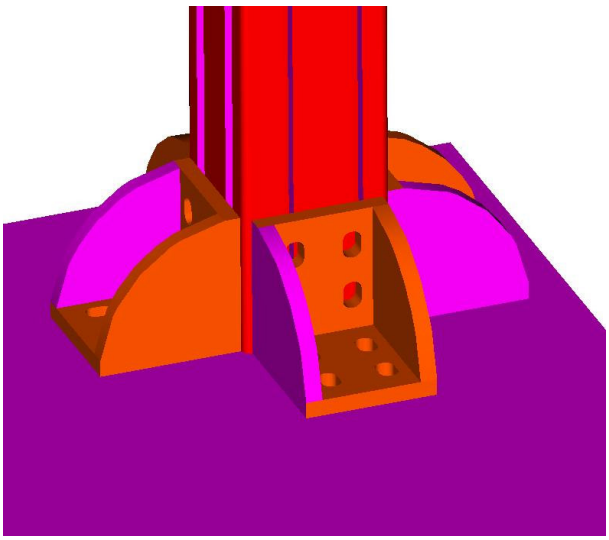
Deney düzeneğinde düşme yüksekliği 2 m düşünülmüştür. Sistemde 4 adet profil dikey bir şekilde iki plaka arasına montaj edilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Alüminyum Profillerin Montaj Şekli

Alt olarak St 60 çeliği kullanılmıştır. 1230x1400x40 mm ölçülerinde yaklaşık 300 kg ağırlığındaki çelik plaka sistemin ağırlık merkezini yere yakınlaştırmıştır. Üst plaka olarak 20 mm kalınlığında köşelerine geniş pahlar kırılarak ağırlığı azaltılmış alüminyum plaka kullanılmıştır.

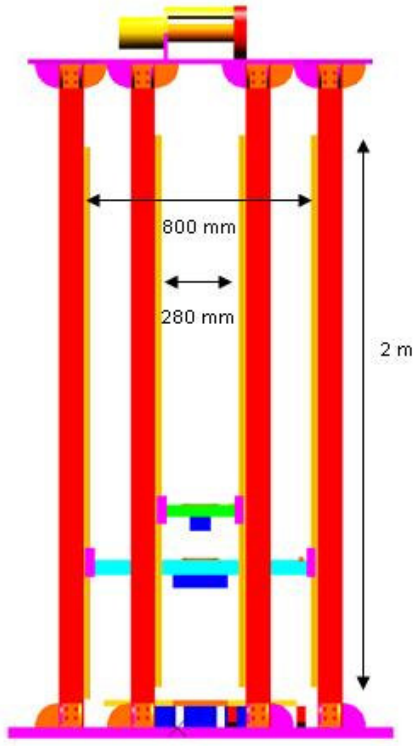
Profiller alt ve üst plakaya 90^{o} köşe bağlantısı kullanılarak montaj edilmiştir (Şekil 3.6). Her köşe bağlantısı 4 civata plakalara 4 civata da alüminyum profillere bağlanacak şekilde 8 adet civata ile tutturulmuştur. 4 profil için toplam 28 köşe bağlantısı kullanılmıştır.



Şekil 3.6 : Köşe Bağlantı Elemanları

Deney düzeneğinde dar ve geniş aralıklı iki düşme sistemi düşünülmüştür. 50x50x50 mm boyutlarındaki numuneler için iki ray arası 280 mm olarak ayarlanarak sistemde bu kısım kullanıldığında daha az titreşim olması sağlanmıştır (Şekil 3.7). Geniş aralıklı olan kısımda ise iki ray arası mesafe 800 mm olarak ayarlanmıştır. Bu kısımda 600x600 mm'ye kadar kesiti olan numuneler üzerinde düşme testi yapılabilecektir.

Düşürülme işleminin sürtünmeden en az etkilenmesi için düşürülecek kirişler ray ve bilyalı yatak kullanılarak montaj edilmiştir. Kullanılan ray ve hareketli yataklar piyasadan hazır ürün olarak alınmıştır.



Şekil 3.7 : Dar ve Geniş Aralık Ölçülerinin Gösterimi

Tablo 3.1 : Alüminyum Profillerin Teknik Özellikleri

Dış Ölçüler	Malzeme	Mukavemet Momenti		Alan	Kütle
		W_x	W_y		
90x90 mm	Al 6063	46,2 cm^3	46,2 cm^3	23,5 cm^2	5,40 kg/m

Profillerde oluşacabilecek maksimum moment geniş aralıkta ve taşınması planlanan en büyük ağırlıkla öngörülebilir. Tablo 3.1'de alüminyum profillerin teknik özellikleri görülmektedir. Geniş aralık mesafesi olan 800 mm nin ortasından etkimek üzere taşınması planlanan maksimum ağırlık 60 kg olarak düşünülürse 2m profil yüksekliğinin en uç noktalarındaki gerilme aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Denklem 3.1, 3.2 ve 3.3).

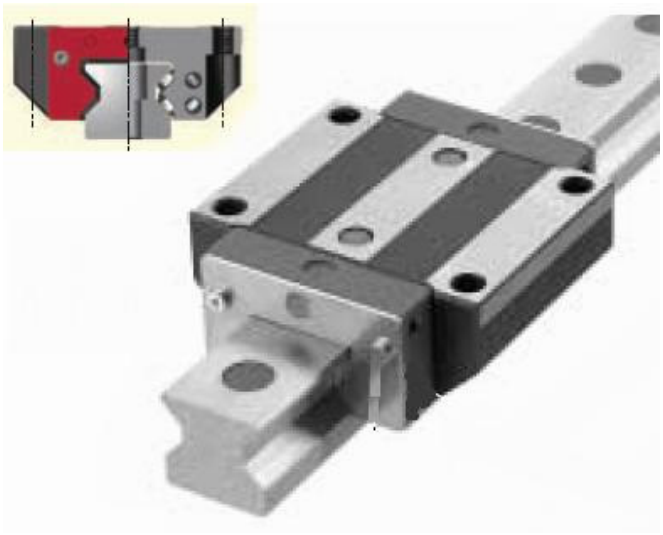
$$\sigma = \frac{M}{W} \qquad \textbf{3.1}$$

$$M = F.d \quad \text{(d=mesafe)} \qquad \textbf{3.2}$$

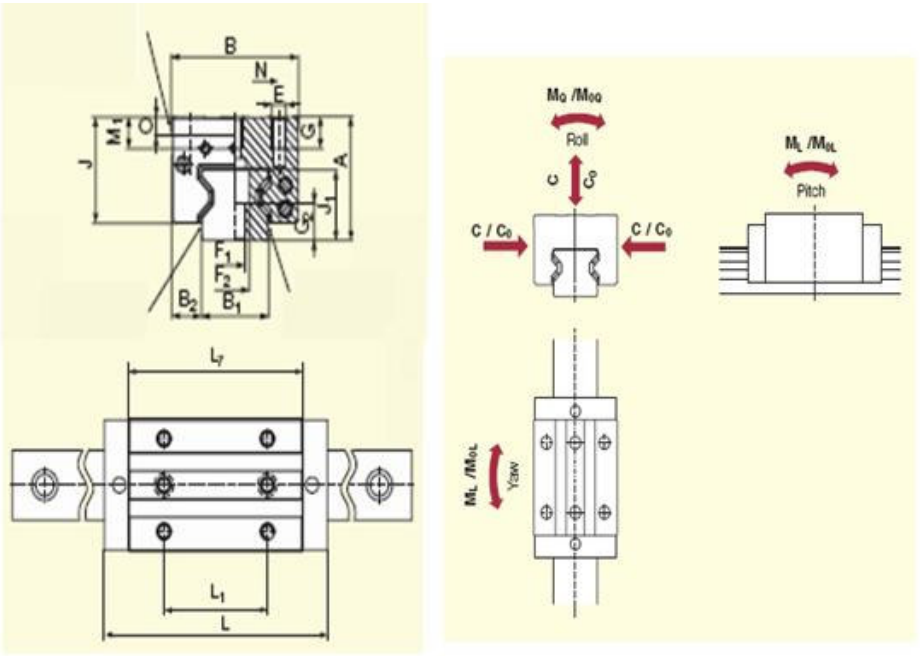
$$\sigma = \frac{60kg.9{,}81m/s^2.2m}{46{,}2.10^{-6}m^3} = 25480519{,}48\,\text{Pa} = 25{,}480\,\text{MPa} \qquad \textbf{3.3}$$

olarak oluşabilecek maksimum gerilme bulunur. Profil malzemesinin 225 Mpa akma sınırına sahip Al 6063 olduğu düşünülürse konstrüksiyon güvenli çalışma aralığındadır.

Konstrüksiyonda kullanılan raylar Schneeberger firmasının MRD25 monorail adlı ürünüdür (Şekil 3.8). Bu raylar ısıl işlem görmüş çeliklerden çok küçük toleranslarda imal edilmiştir. 30 mm aralıklarla açılmış deliklerden alüminyum profillere M6'lık civatalarla bağlanmıştır. 2 m'lik 2 ray ve üzerlerinde hareket eden 2 araba oluşabilecek yüklemeler için fazlasıyla dayanıklıdır (Şekil 3.9). Araba rayın üzerinde silindirik bilyalar sayesinde kayarak hareket eder. Bu tür yataklamanın kullanılma sebebi hareket sırasında rijitliğinin çok iyi olmasıdır. Bu tür yataklamalar takım tezgahlarında da kullanılmaktadır. Önerilen maksimum araba hızı 3 m/s'dir. Fakat bu değer üzerinde çok fazla yük ve çalışma olmayacak deney düzeneği için aşılabilir.



Şekil 3.8 : Ray ve Araba Resimleri



	A	B	B1* ±0.05	B2	J	J1	L**	L1	L4	L5/ L10	L7	N	E	F1	F2
MRC 25 MRD 25	40	48	23	12.5	33.5	24.5	81 103.4	35 50	30	14	57 79.4	35	M 6	7	11

	Taşıma kapasitesi						Araba	Ray
	C0 (N)	C (N)	MOQ (Nm)	MOL (Nm)	MQ (Nm)	ML (Nm)	(kg)	(kg/m)
MRC 25 MRD 25	49 800 70 300	27 700 39 100	733 1 035	476 936	408 576	265 521	0.6 0.7	3.4

Şekil 3.9 : Kullanılan Ray ve Hareketli Yatak Teknik Özellikleri

Arabanın üzerine sistemde direk bir kuvvet gelmemektedir. Düşme sırasında oluşabilecek gerilmeler, düşen ağırlığın maksimum 60 kg olmasından ötürü kritik bir değere gelmemektedir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 : Rayın Üzerindeki Hareketli Yatak Bağlantısı

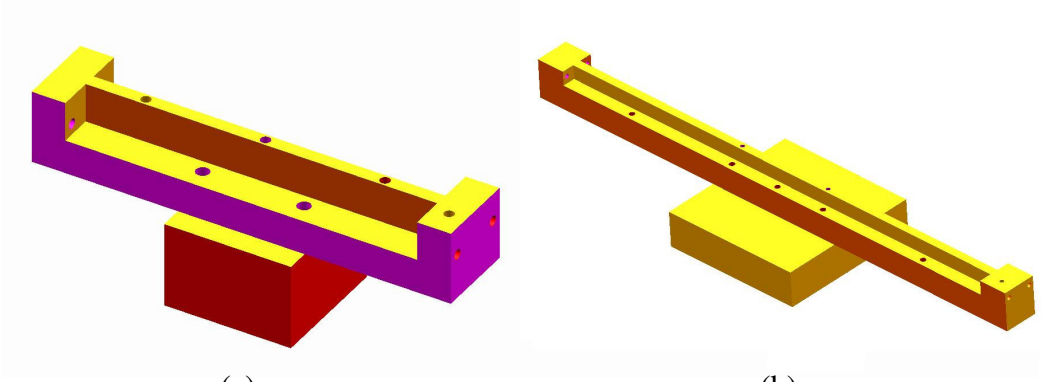
3.2.2 Düşürülen Kirişler

Dar ve geniş aralık için iki farklı kiriş imal edilmiştir. Kirişler rayların üzerinde hareket eden arabalara 2 adet civata ile bağlanmıştır. Kirişin asıl amacı çarpma çenesini taşımaktır. Çeneler kirişlere 4 adet M6 civata ile bağlanmıştır. Her iki kiriş de çelik ve alüminyumdan olmak üzere ikişer adet yapılmıştır. Bunun sebebi düşürülen ağırlığı kontrol edebilmektedir. Kiriş ağırlıkları Tablo 3.2'de özetlenmiştir.

Tablo 3.2: Kiriş Ağırlıkları

Kiriş tipi	**Malzeme**	**Ağırlık**
Dar aralık kirişi	Çelik	2,4 kg
Dar aralık kirişi	Alüminyum	0,8 kg
Geniş aralık çenesi	Çelik	11,8 kg
Geniş aralık çenesi	Alüminyum	4 kg

Şekil 3.11'da düşen kirişlerin CAD modeli, Şekil 3.12 da da resmi görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 3.11 : Kirişler ve Çenelerin CAD Modeli (a) Dar Aralık Kirişi ve Çenesi (b) Geniş Aralık Kirişi ve Çenesi



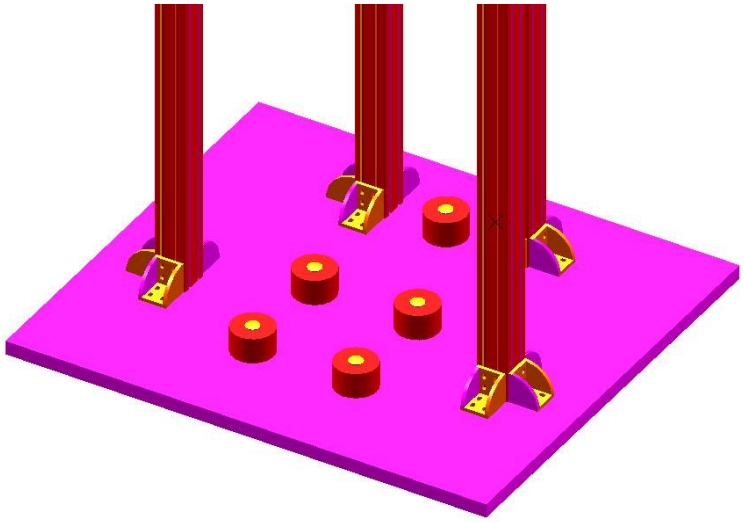
Şekil 3.12 : Dar Aralık Kiriş Montajı

3.2.3 Veri Toplama Sistemi

Veri toplama sisteminin iki kısımda ele alabiliriz. Birinci kısımda sensörler, ikinci kısımda ise veriyi işleyip bilgisayara aktaran cihazlar bulunmaktadır. Sistemde çarpma kuvvetini ölçmek için 5 tane yük ölçer, köpüğün şekil değişimi ölçmek için lazer mesafe ölçer ve sistemin hız verileri için ise ivmeölçer kullanılmıştır.

3.2.3.1 Yük Ölçer

Düşürülen sistemin çarpma anındaki etkisi köpüğün altında yer alacak yük ölçer ile kuvvet verisi olarak ölçülmektedir. Dar aralık için sadece 1 tane yük ölçer kullanılırken geniş aralık için 4 adet yük ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.13). S. Himmelstein firmasından alınan yükölçerler 222 kN'a kadar olan yükleri ölçebilirler. Tablo 3.3 de yükölçerlerle ilgili teknik veriler verilmiştir.



Şekil 3.13 : Deney Düzeneğinde Yük Ölçerlerin Yerleşimi

Tablo 3.3: Yük ölçer teknik verileri

Lineersizliği	%0,05
Maksimum yükleme	222500 N
Voltaj çıktısı	4 mV/V
Çalışma sıcaklığı	-50 +90 ^{o}C
Tekrar edememe hassasiyeti	%0,02

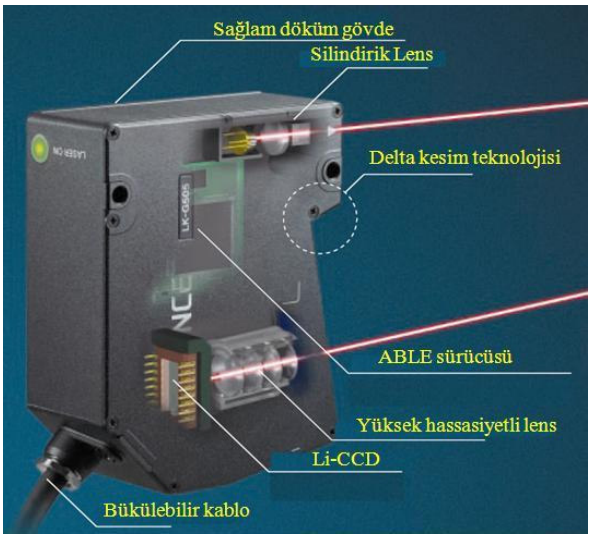
Yük ölçer analog veri verir. Bu analog veri sinyal koşullandırıcı ile kuvvet çıktısı olarak bilgisayara aktarılır. Burada kullanılan sinyal koşullandırıcı veri topladığı her kanalda saniyede 2000 örnekleme yapabilmektedir. Sensörden gelen sinyali, sensörün ölçüm aralığını ±5 V veya ±10 V aralıklarına ölçeklendirerek analog çıktı olarak verebilir. Şekil 3.14'de kullanılan yük ölçerin resmi görülmektedir.



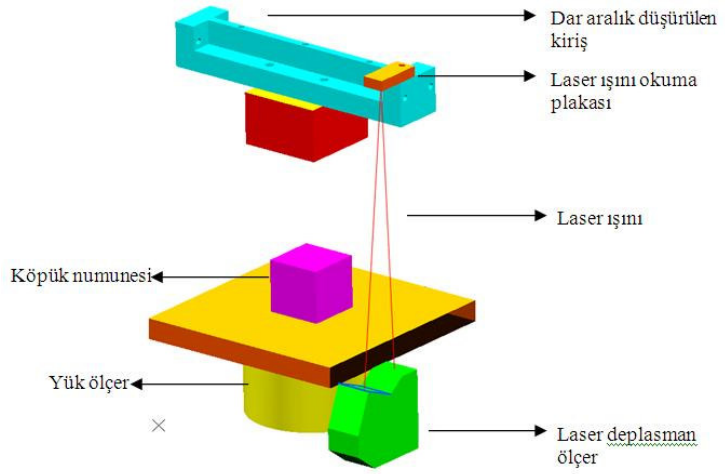
Şekil 3.14 : Yük Ölçer

3.2.3.2 Lazer Deplasman Ölçer

Düşen ağırlığın köpüğü basma miktarını hassas olarak ölçmek için Keyence firmasının LK-G152 modelindeki lazer deplasman ölçme kafası ile kontrol ünitesi kullanıldı. Bu cihaz 110 mm ile 190 mm arasındaki deplasmanları hassa bir şekilde ölçebilmektedir. 80 mm ölçüm aralığını tam olarak kullanabilmek için lazer kafası sistemde alt plakanın üzerine monte edilmiştir. Lazer ışınının okuma yüzeyi olarak düşürülen kiriş üzerine küçük bir plaka ile çıkıntı yapılarak köpüğün ezilmesinin başlamasından bitişine kadar olan aşamalar ölçülebilmektedir. Dar aralık için 50 mm yüksekliğinde köpük kullanılacaktır. %80 şekil değişimi öngörüsüyle 40 mm deplasman ölçmek gereklidir. Şekilde gösterildiği gibi kirişin üzerine koyulan plaka köpüğün üst hizasına geldiğinde lazer kafasıyla arasında 180 mm mesafe kalmaktadır. Köpüğün 40 mm şekil değişimi sonunda bu 180 mm mesafe 140 mm'ye kadar inecektir. Şekil 3.15'de kullanılan lazer kafası ve Şekil 3.16'de lazer deplasman ölçerin deney düzeneğindeki yerleşimi görülmektedir.



Şekil 3.15 : Lazer Deplasman Ölçme Kafası



Şekil 3.16 : Lazer Deplasman Yerleşimi

Kullanılan lazer kafası yaydığı lazer ışınını karşısındaki yüzeyden açılı olarak yansımış halini tekrar okuyarak aradaki mesafeyi bulur. Sistemde kullanılan lazer kafasının ışını yüzeyden en az etkilenecek şekilde tasarlanmıştır. Saydam veya yansıtıcılığı az yüzeylerde bile ölçüm yapabilmektedir. Ölçüm hassasiyeti 0,5 µm'dur. 50 kHz 'e kadar veri örneklemesi yapabilir. Buda 1 saniyede 5000 veri alabilmesi demektir. Çarpma süresinin 0,2 saniye sürmesi öngörülürse 1000 veri toplayarak hassas bir deplasman ölçümü yapabilmektedir.

Lazer deplasman ölçerin kalibrasyonu 0,02 mm hassasiyetle ölçüm yapabilen bir mikrometre ile yapılmıştır (Şekil 3.17). Cihaz analog veri üretmektedir. Bu veriler ±10 V arasında değişen voltaj değerleri ile vermektedir. Bu 20 V'luk aralığı cihazın ölçüm aralığı olan 80 mm mesafe doğrusal olarak orantılılaştırılmıştır. Resimde görüldüğü gibi lazer kafasından 150 mm uzaklığa yerleştirilen mikrometreyi taşıyan düzenek kurularak kalibrasyon yapılmıştır. Mikrometre 10 mm aşağı ve yukarı hareket ederek cihazın çıktı olarak verdiği voltaj değerlerindeki değişimden karşılık gelen deplasman miktarı bulunmuştur.



Şekil 3.17 : Lazer Deplasman Ölçer Kalibrasyonu

3.2.3.3 İvmeölçer

Deney düzeneğinin düşürülme sırasındaki hızını ölçebilmek için PCB firmasının 353B02 Quartz modelli ivmeölçeri kullanılmıştır (Şekil 3.18). Bu ivmeölçer 2,04 mV/(m/s^2) hassasiyetle veri verebilmektedir. Ölçme Aralığı ±2453 m/ s^2 'dir. 1 saniyede 7000 veri üretebilen bu ivmeölçerin %1 den küçük doğrusal düzensizliği vardır. Çıktı olarak 8 V ile 12 V arasında voltaj değerleri üretmektedir. 0,1 m/s^2 hassasiyetinde ölçüm yapılabilmektedir. Çarpma süresinin 0,2 saniye olduğu düşünülürse 1400 veri toplamak mümkün olacaktır.

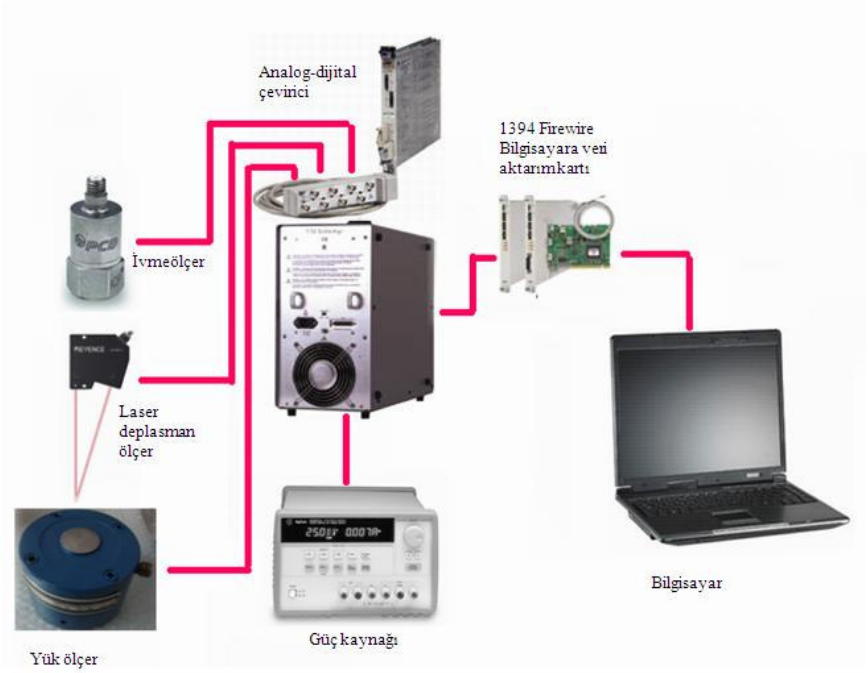


Şekil 3.18 : Kullanılan ivmeölçer

3.2.3.4 Veriyi Bilgisayara Aktarma

Sensörlerden gelen verileri bilgisayara aktarıp işlemek için sensörlerden gelen analog verilerin dijital hale dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun için VXI Technology firmasının VT1432B adlı ürünü kullanılmıştır. Bu ürün 16 kanaldan alabildiği analog veriyi maksimum 46 kHz minimum 244 μHz frekans band genişliği ile dijital hale dönüştürebilmektedir. ±25 V aralığında giriş kabul edebilir. 1 saniyede 1024000 örnekleme hızıyla sistemde kullanılan sensörlerden çarpma gibi kısa süreli bir işlemde verileri toplayabilir ve kullanılır hale getirebilir. Örnek olarak yük ölçer den gelen analog veri dijital hale dönüştüğünde kuvvet birimi olan Newton olarak kullanılabilecektir.

Bu cihaz harici bir bilgisayara Agilent firmasının VEE adlı programını kullanılarak verileri anlaşılır şekilde aktarmaktadır. Sensörlerden gelen voltaj değerlerinin fiziksel birim olarak karşılığı bu program sayesinde dönüştürülmektedir. Kullanılan 5 tane yük ölçer, lazer deplasman ölçer ve ivmeölçerden gelen sinyallerin aynı zaman ekseninde toplanmalıdır. Bu sayede çenenin köpük üzerindeki kuvvet ve şekil değişimi grafiği ve bu grafiğin her noktasındaki çene hızı elde edilecektir. Şekil 3.19'de veri toplama sistemini şekilsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.19 : Veri toplama sistemi

3.3 Deney Düzeneği Çalışma Yöntemi

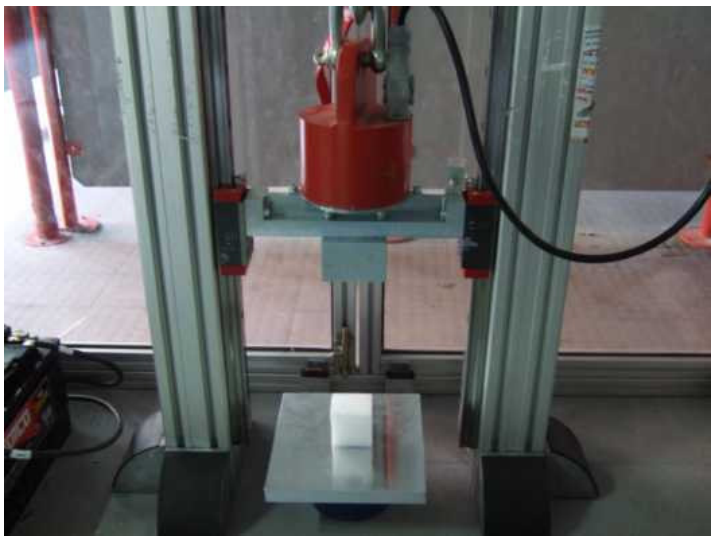
Kurulan deney düzeneği temel olarak kirişin yukarı kaldırılarak serbest bırakılması prensibi ile çalışmaktadır. Kaldırma işlemi bir vinç ve bu vincin ucuna bağlanmış bir elektromıknatıs ile yapılmaktadır. Kirişlerin üzerlerine elektromıknatısın temas yüzeyi büyüklüğünde daire kesitli plakalar monte edilmiştir. Vincin halatının ucundaki mıknatıs bu plakanın üzerine yerleştirilir. Mıknatısa elektrik verilerek kirişi tutması sağlanır. Vincin uzaktan kontrol aparatıyla halat yukarı çekilir. Kiriş istenilen yüksekliğe çıktığında mıknatısın gücü kesilerek kirişin serbest düşme yapması sağlanır (Şekil 3.20 ve 3.21). Aşağıda ise yük ölçerlerin üstünde düz plakalar vardır. Bunların üstüne koyulan köpük numunesi hızla düşen kirişin altındaki çene tarafından ezilir. Düşme işlemi köpükle temas edinceye kadar veri toplama işlemi başlamaz. Bu geçen sürede sensörler çok fazla veri toplayacaklarından gereksiz yere veri toplama sistemine yükleme yapılmasına neden olacaktır. Veri toplama programa girilen bir süre sonunda işlemini yapmaya başlayacaktır. Böylece çene köpüğe değmesine yakın bir sürede işlem başlatılmış olacaktır. İvmeölçer kirişin düşmesine başlaması ile veri toplamaya başlayacaktır. Yük ölçer ve lazer deplasman ölçer sensörleri ise çarpma anına yakın bir zamanda veri toplayamaya başlayacaklardır.

Elde edilen analog veriler işlendikten sonra kuvvet ve şekil değişimi verileri aynı zaman ekseninde elde edilmiş olacaktır.

Deney düzeneğinin güvenli olarak çalışması için dışına pleksiglasdan bir kabin yapılmıştır. Kabinin kapısındaki emniyet anahtarı kapalı olmadıkça sistem elektrik alamayacağından güvenli çalışma sağlanmış olacaktır. Elektromıknatıs ve vincin kontrol butonları kabinin dışına monte edilmiştir.



Şekil 3.20 : Deney Düzeneği – Kirişin Kaldırılma Konumu



Şekil 3.21 : Deney Düzeneği – Kirişin Kaldırılma Konumu (Yakın)

4. MATEMATİKSEL MODEL VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

4.1 Matematiksel modelin çıkarılması

Polimerik köpüklerin dinamik davranışı yoğunluk, şekil değişim hızı ve sıcaklık parametreleri ile değişmektedir. Polisitren ve polietilen için 3 değişik yoğunluk ve 3 değişik şekil değişim hızı ile yapılan basma deney verileri için matematiksel bir model geliştirilebilir. EPS 12 kg/m^3, 20 kg/m^3 ve 30 kg/m^3, PE 24 kg/m^3, 32 kg/m^3 ve 58 kg/m^3 yoğunlukları için 200 mm/dak, 600 mm/dak ve 1000 mm/dak hızlarında yapılan deneylerin gerilme ve şekil değişim sonuçlarıyla oluşturulan veriler bir denklemle ifade edilmiştir. Öncelikle her yoğunluğun her bir şekil değişim hızı için denklem türetilmiştir. Sonuçta sadece polisitren için 3 yoğunluk ve 3 değişik hız için 9 adet denklem deney verilerine göre türetilmiştir. Verilerden denklem elde etme için MATLAB yazılımı kullanılmıştır. Basma deneylerinin gerilme ve şekil değişimi eğrilerinin sadece elastik bölgeden sonra gelen plato bölgesi denklem türetilmesi için kullanılmıştır. Bunun nedeni bu malzemelerin pratikteki kullanım aralıkları plato bölgesindeki veriler olmasıdır. Elastik bölgede doğrusal sonuç verdikleri ve % 2-5 şekil değişimi sonrasında bu bölgeden çıktıkları için elastik bölge verileri kullanılmamıştır.

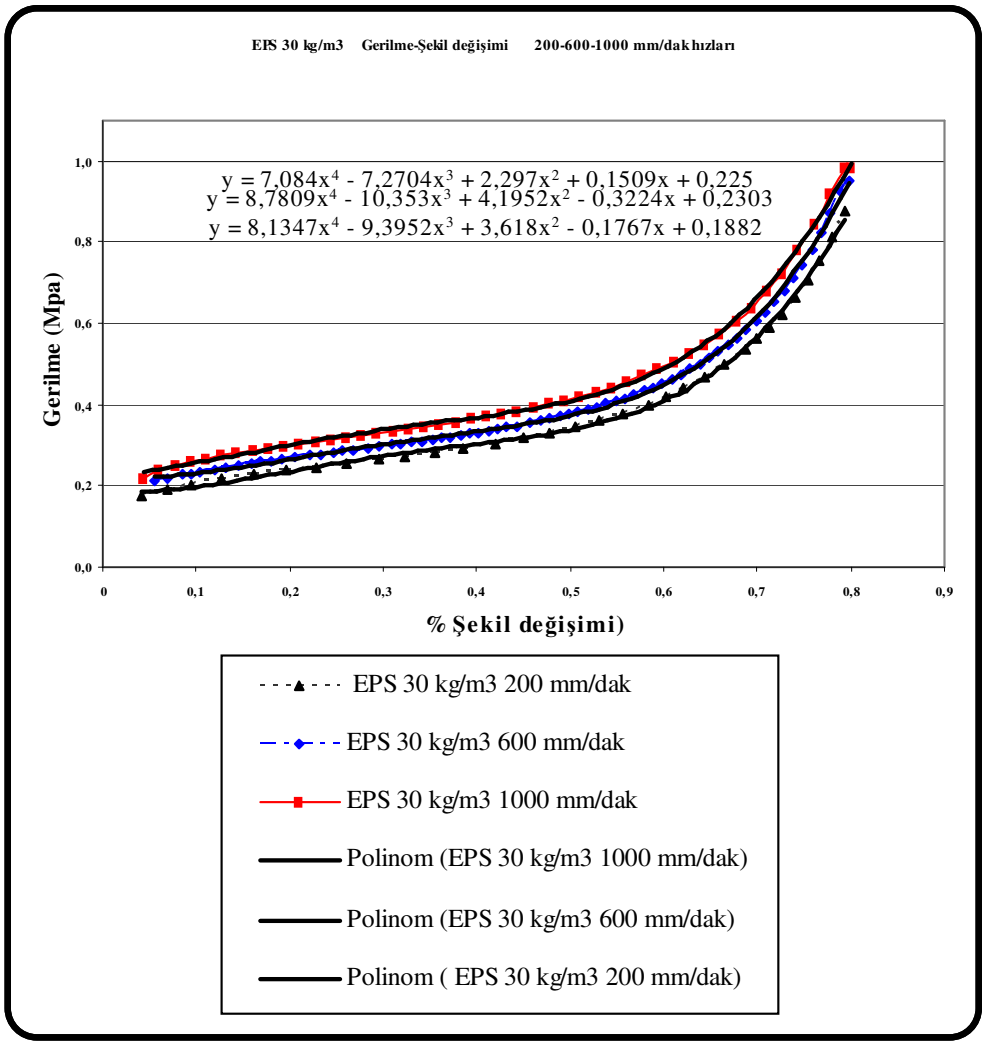
Plato bölgesini verileri 4. dereceden polinoma benzetilmiştir. Her bir denklem içinde yoğunluğu ve şekil değişimi parametresini içeren değişken barındırmaktadır. Yoğunluk ve şekil değişim hızı 2. dereceden polinomla temsil edilmiştir. Polisitren için elde edilen 9 denklemde ε yüzde şekil değişiminin a, b, c, d ve e katsayıları yoğunluk ve şekil değişimini temsil eden 2. dereceden denklemlerin çarpımına eşitlenmiştir. Denklem 4.1 de gerilim ve şekil değişimi verilerinin türetildiği denklemler, Denklem 4.2 de yoğunluğu temsil eden denklemler ve Denklem 4.3 de de şekil değişimini temsil eden denklemler gösterilmiştir. Yoğunluk için *y* değişkeni,

şekil değişim hızı içinde *k* değişkeni kullanılmıştır. Şekil 4.1 de EPS30 için verilere türetilen denklemler gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= a_1\varepsilon^4 + b_1\varepsilon^3 + c_1\varepsilon^2 + d_1\varepsilon + e_1\\ \sigma_2 &= a_2\varepsilon^4 + b_2\varepsilon^3 + c_2\varepsilon^2 + d_2\varepsilon + e_2\\ \sigma_3 &= a_3\varepsilon^4 + b_3\varepsilon^3 + c_3\varepsilon^2 + d_3\varepsilon + e_3\end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}&mk_1^2 + nk_1 + l_1\\ &mk_2^2 + nk_2 + l_2\\ &mk_3^2 + nk_3 + l_3\end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}&ry_1^2 + sy_1 + t_1\\ &ry_2^2 + sy_2 + t_2\\ &ry_3^2 + sy_3 + t_3\end{aligned} \tag{4.3}$$



Şekil 4.1 EPS30 İçin 200, 600 ve 1000 mm/dak Şekil Değişim Hızlarının Verilerine Türetilen Denklemler

$$\sigma = 4{,}1513\varepsilon^4 - 5{,}0406\varepsilon^3 + 2{,}2558\varepsilon^2 - 0{,}1922\varepsilon + 0{,}0514 \quad (4.4)$$

$$\sigma = 4{,}2149\varepsilon^4 - 5{,}0873\varepsilon^3 + 2{,}269\varepsilon^2 - 0{,}1779\varepsilon + 0{,}0582 \quad (4.5)$$

$$\sigma = 4{,}2948\varepsilon^4 - 5{,}0214\varepsilon^3 + 2{,}1557\varepsilon^2 - 0{,}122\varepsilon + 0{,}0584 \quad (4.6)$$

EPS 20 kg/m^3 için 200, 600 ve 1000 mm/dak şekil değişim hızları için verilerden türetilen denklemler Denklem 4.7, 4.8 ve 4.9 da gösterilmiştir.

$$\sigma = 5{,}0874\varepsilon^4 - 5{,}7343\varepsilon^3 + 2{,}2884\varepsilon^2 - 0{,}1233\varepsilon + 0{,}1131 \quad (4.7)$$

$$\sigma = 4{,}5712\varepsilon^4 - 5{,}094\varepsilon^3 + 2{,}0802\varepsilon^2 - 0{,}1172\varepsilon + 0{,}1458 \quad (4.8)$$

$$\sigma = 5{,}032\varepsilon^4 - 5{,}5009\varepsilon^3 + 2{,}1734\varepsilon^2 - 0{,}1103\varepsilon + 0{,}1489 \quad (4.9)$$

EPS 30 kg/m^3 için 200, 600 ve 1000 mm/dak şekil değişim hızları için verilerden türetilen denklemler Denklem 4.10, 4.11 ve 4.12 da gösterilmiştir.

$$\sigma = 8{,}1347\varepsilon^4 - 9{,}3952\varepsilon^3 + 3{,}618\varepsilon^2 - 0{,}1767\varepsilon + 0{,}1882 \quad (4.10)$$

$$\sigma = 8{,}7809\varepsilon^4 - 10{,}353\varepsilon^3 + 4{,}1952\varepsilon^2 - 0{,}3224\varepsilon + 0{,}2303 \quad (4.11)$$

$$\sigma = 7{,}084\varepsilon^4 - 7{,}2704\varepsilon^3 + 2{,}297\varepsilon^2 + 0{,}1509\varepsilon + 0{,}225 \quad (4.12)$$

ε şekil değişim parametresinin denklemlerdeki 4. derecedeki katsayıları olan a_1, a_2 ve a_3 yoğunluk ve şekil değişimi hızları için yazılan denklemlerin çarpımına eşitlenmiştir. Buradaki amaç Denklem 4.2 ve 4.3 deki katsayıları belirleyebilmektir. Bu denklemlerin çarpımı Denklem 4.13'de gösterilmiştir.

3 değişik yoğunluk ve 3 değişik şekil değişim hızı için toplamda, denklem 4.4'den 4.12'de gösterildiği gibi 9 tane denklem elde edilmiştir. Bu denklemlerde ε şekil değişiminin her bir derecesine ait katsayıları Denklem 4.13'e eşitlenmiştir.

$$(mk^2 + nk + l).(ry^2 + sy + t) = mrk^2y^2 + msk^2y + mtk^2 + nrky^2 + nsky + ntk + lry^2 + lsy + lt \quad (4.13)$$

a katsayıları için oluşturulan matris Denklem 4.14 'de gösterilmiştir.

$$[4.1513 \quad 4.2149 \quad 4.2948 \quad 5.0874 \quad 4.5712 \quad 5.0320 \quad 8.1347 \quad 8.7809 \quad 7.0840] \tag{4.14}$$

b katsayıları için oluşturulan matris Denklem 4.15 'de gösterilmiştir.

$$[-5.0000 \quad -5.0873 \quad -5.0214 \quad -5.7343 \quad -5.0940 \quad -5.5009 \quad -9.3952 \quad -10.3530 \quad -7.2704] \tag{4.15}$$

c katsayıları için oluşturulan matris Denklem 4.16 'de gösterilmiştir.

$$[2.2558 \quad 2.2690 \quad 2.1557 \quad 2.2884 \quad 2.0802 \quad 2.1734 \quad 3.6180 \quad 4.1952 \quad 2.2970] \tag{4.16}$$

d katsayıları için oluşturulan matris Denklem 4.17 'de gösterilmiştir.

$$[-0.1922 \quad -0.1779 \quad -0.1220 \quad -0.1233 \quad -0.1172 \quad -0.1103 \quad -0.1767 \quad -0.3224 \quad 0.1509] \tag{4.17}$$

e katsayıları için oluşturulan matris Denklem 4.18 'de gösterilmiştir.

$$[0.0514 \quad 0.0582 \quad 0.0584 \quad 0.1131 \quad 0.1458 \quad 0.1489 \quad 0.1882 \quad 0.2303 \quad 0.2250] \tag{4.18}$$

ε 'nin her bir derecesinin katsayıları yerine Denklem 4.19'da görüldüğü gibi yoğunluk ve şekil değişim hızı polinomlarını varmış gibi düşünerek bütün yoğunluk ve şekil değişim hızlarını aynı denklemin temsil edilmesi sağlanmış olur.

$$\begin{aligned}&(mk_1^2+nk_1+l).(ry_1^2+sy_1+t)\varepsilon^4-(mk_1^2+nk_1+l).(ry_1^2+sy_1+t)\varepsilon^3\\&+(mk_1^2+nk_1+l).(ry_1^2+sy_1+t)\varepsilon^2\\&-(mk_1^2+nk_1+l).(ry_1^2+sy_1+t)\varepsilon+(mk_1^2+nk_1+l).(ry_1^2+sy_1+t)\end{aligned} \tag{4.19}$$

Yoğunluk için denklemdeki *y* değerleri kg/m^3 birimi olarak şekil değişim hızları içinse m/s birimiyle girilmiştir. Yoğunluk değerleri 12 kg/m^3 için y_1=12, 20 kg/m^3 y_2=20 ve 30 kg/m^3 y_3=30, şekil değişim hızları da 200 mm/dak k_1=3,3333e-3, 600 mm/dak k_2=0,1 ve 1000 mm/dak k_3=0.016666 olarak girilmiştir. *k* ve *y*'nin değerleri Denklem 4.20'da yerlerine konularak denklem 4.21'deki matris elde edilmiştir.

$$\begin{pmatrix} k_1^2 y_1^2 & k_1^2 y_1 & k_1^2 & k_1 y_1^2 & k_1 y_1 & k_1 & y_1^2 & y_1 & 1 \\ k_2^2 y_1^2 & k_2^2 y_1 & k_2^2 & k_2 y_1^2 & k_2 y_1 & k_2 & y_1^2 & y_1 & 1 \\ k_3^2 y_1^2 & k_3^2 y_1 & k_3^2 & k_3 y_1^2 & k_3 y_1 & k_3 & y_1^2 & y_1 & 1 \\ k_1^2 y_2^2 & k_1^2 y_2 & k_1^2 & k_1 y_2^2 & k_1 y_2 & k_1 & y_2^2 & y_2 & 1 \\ k_2^2 y_2^2 & k_2^2 y_2 & k_2^2 & k_2 y_2^2 & k_2 y_2 & k_2 & y_2^2 & y_2 & 1 \\ k_3^2 y_2^2 & k_3^2 y_2 & k_3^2 & k_3 y_2^2 & k_3 y_2 & k_3 & y_2^2 & y_2 & 1 \\ k_1^2 y_3^2 & k_1^2 y_3 & k_1^2 & k_1 y_3^2 & k_1 y_3 & k_1 & y_3^2 & y_3 & 1 \\ k_2^2 y_3^2 & k_2^2 y_3 & k_2^2 & k_2 y_3^2 & k_2 y_3 & k_2 & y_3^2 & y_3 & 1 \\ k_3^2 y_3^2 & k_3^2 y_3 & k_3^2 & k_3 y_3^2 & k_3 y_3 & k_3 & y_3^2 & y_3 & 1 \end{pmatrix} \tag{4.20}$$

$$\begin{pmatrix} 0.0016 & 0.0001 & 0.0000 & 0.4800 & 0.0400 & 0.0033 & 144.0000 & 12.0000 & 1.0000 \\ 0.0144 & 0.0012 & 0.0001 & 1.4400 & 0.1200 & 0.0100 & 144.0000 & 12.0000 & 1.0000 \\ 0.0400 & 0.0033 & 0.0003 & 2.4000 & 0.2000 & 0.0167 & 144.0000 & 12.0000 & 1.0000 \\ 0.0044 & 0.0002 & 0.0000 & 1.3333 & 0.0667 & 0.0033 & 400.0000 & 20.0000 & 1.0000 \\ 0.0400 & 0.0020 & 0.0001 & 4.0000 & 0.2000 & 0.0100 & 400.0000 & 20.0000 & 1.0000 \\ 0.1111 & 0.0056 & 0.0003 & 6.6667 & 0.3333 & 0.0167 & 400.0000 & 20.0000 & 1.0000 \\ 0.0100 & 0.0003 & 0.0000 & 3.0000 & 0.1000 & 0.0033 & 900.0000 & 30.0000 & 1.0000 \\ 0.0900 & 0.0030 & 0.0001 & 9.0000 & 0.3000 & 0.0100 & 900.0000 & 30.0000 & 1.0000 \\ 0.2500 & 0.0083 & 0.0003 & 15.0000 & 0.5000 & 0.0167 & 900.0000 & 30.0000 & 1.0000 \end{pmatrix} \tag{4.21}$$

Denklem 4.20, Denklem 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18 ile lineer denklem çözümüyle Denklem 4.13'deki *m, n, l, r, s, t* katsayıları bulunur. Bu işlem *a, b, c, d, e* katsayıları için ayrı ayrı yapılacaktır. Bu işlemle gerilme şekil değişimi verileri türetilen polinomların her bir derecesi için başına gelecek yoğunluk ve şekil değişim hızını ifade eden 2. dereceden polinomlar tespit edilmiş olur.

a katsayıları için Denklem 4.21'deki matrisin tersi ile Denklem 4.14'deki matrisin transpozesi çarpılarak bulunur.(Denklem 4.22) Lineer denklem çözümü bütün katsayılar için yapılarak Denklem 4.2 ve 4.3'deki katsayılar bulunmuş olur.

$$\begin{pmatrix} 0.0016 & 0.0001 & 0.0000 & 0.4800 & 0.0400 & 0.0033 & 144.0000 & 12.0000 & 1.0000 \\ 0.0144 & 0.0012 & 0.0001 & 1.4400 & 0.1200 & 0.0100 & 144.0000 & 12.0000 & 1.0000 \\ 0.0400 & 0.0033 & 0.0003 & 2.4000 & 0.2000 & 0.0167 & 144.0000 & 12.0000 & 1.0000 \\ 0.0044 & 0.0002 & 0.0000 & 1.3333 & 0.0667 & 0.0033 & 400.0000 & 20.0000 & 1.0000 \\ 0.0400 & 0.0020 & 0.0001 & 4.0000 & 0.2000 & 0.0100 & 400.0000 & 20.0000 & 1.0000 \\ 0.1111 & 0.0056 & 0.0003 & 6.6667 & 0.3333 & 0.0167 & 400.0000 & 20.0000 & 1.0000 \\ 0.0100 & 0.0003 & 0.0000 & 3.0000 & 0.1000 & 0.0033 & 900.0000 & 30.0000 & 1.0000 \\ 0.0900 & 0.0030 & 0.0001 & 9.0000 & 0.3000 & 0.0100 & 900.0000 & 30.0000 & 1.0000 \\ 0.2500 & 0.0083 & 0.0003 & 15.0000 & 0.5000 & 0.0167 & 900.0000 & 30.0000 & 1.0000 \end{pmatrix}^{-1} x \begin{bmatrix} 4.1513 \\ 4.2149 \\ 4.2948 \\ 5.0874 \\ 4.5712 \\ 5.0320 \\ 8.1347 \\ 8.7809 \\ 7.0840 \end{bmatrix} \tag{4.22}$$

Sonuçta bütün katsayılar için elde edilen çözüm Denklem 4.19'daki şekilde yazıldığında elde edilen Denklem 4.23 yoğunluk parametresi *y* ve şekil değişim parametresi *k* için istenilen değerler yazılınca gerilme-şekil değişim verilerini elde edebileceğimiz genel denklem bulunmuş olur.

$$\begin{aligned}\sigma = (&-282{,}5609k^2y^2 + 1{,}0393\text{e}{+}004k^2y + 8{,}3843\text{e}{+}004k^2 + 5{,}3401ky^2 \\ &-199{,}7677ky + 1{,}6353\text{e}{+}003k - 0{,}0042y^2 + 0{,}3337y + 0{,}7305)\varepsilon^4 \\ &+(411{,}7563k^2y^2 - 1{,}4864\text{e}{+}004k^2y + 1{,}2080\text{e}{+}005k^2 - 7{,}5798ky^2 \\ &+278{,}7020ky - 2{,}2890\text{e}{+}003k + 0{,}0055y^2 - 0{,}3680y - 1{,}2681)\varepsilon^3 \\ &+(-206{,}9797k^2y^2 - 7{,}2251\text{e}{+}003k^2y - 5{,}8319\text{e}{+}004k^2 - 3{,}6449ky^2 \\ &-128{,}8097ky - 1{,}0418\text{e}{+}003k - 0{,}0027y^2 - 0{,}1240y - 1{,}1006)\varepsilon^2 \\ &+(41{,}8250k^2y^2 \text{-} 1{,}3958\text{e}{+}003k^2y + 1{,}1195\text{e}{+}004k^2 - 0{,}6756ky^2 \\ &+22{,}2313ky - 173{,}5800k + 0{,}0010y^2 - 0{,}0252y - 0{,}0274)\varepsilon \\ &+(0{,}6844k^2y^2 - 54{,}2437k^2y + 478{,}1250k^2 - 0{,}0283ky^2 \\ &+1{,}8215ky - 15{,}7775k + 7{,}5382\text{e}-005y^2 - 0{,}0026y - 0{,}0034)\end{aligned} \tag{4.23}$$

4.2 Matematiksel Modelin Karşılaştırması

Elde edilen Denklem 4.23'de *k* parametresi şekil değişim hızı m/s, *y* parametresi de yoğunluğu kg/m^3 birimiyle ifade edilmektedir. Bu değişkenlere istenilen değer girilerek gerilme Mpa birimiyle, şekil değişimi de birimsiz olarak elde edilebilir. Denklem 4.23'ün doğruluğunu ispatlamak için farklı yoğunluk ve şekil değişim hızları için denklem yeniden hesaplanmış ve elde edilen verilerin grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler gerçek deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

1000 mm/dak şekil değişim hızıyla yapılan deneyler için *k*=0,01666 m/s değeri kullanılır. EPS 30 kg/m^3 yoğunluklu malzeme için *y*=30 kg/m^3 değeri Denklem 4.23'de yerine yazılır. %80 şekil değişimi için σ gerilme verilerini elde etmek için ε şekil değişimi 0 ile 0,8 aralığında 0,01 aralıklarla artacak şekilde Denklem 4.23'de yerine koyularak gerilme-şekil değişim eğrisi elde edilmiş olur. Elde edilen denklem 4.24 de gösterilmiştir

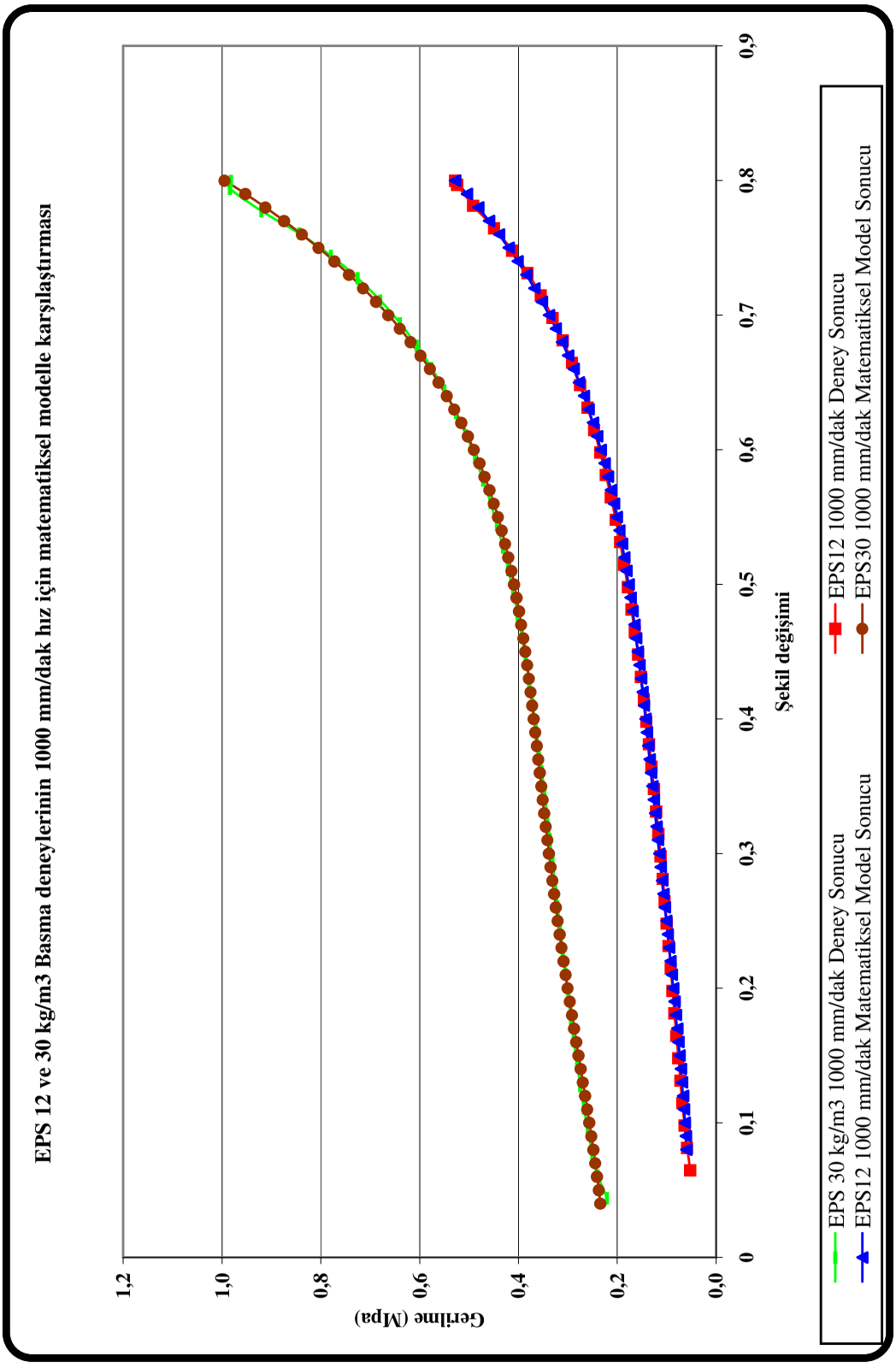
$$\sigma = 7,084\varepsilon^4 - 7,2704\varepsilon^3 + 2,297\varepsilon^2 + 0,1509\varepsilon + 0,225 \quad (4.24)$$

Aynı işlem EPS 12'nin 1000 mm/dak hızındaki %80 şekil değişimi deneyi içinde yapılmıştır. *k* değeri için 0,01666 m/s ve *y* değeri için 12 kg/m^3 değeri Denklem 4.23'de yerine koyularak Denklem 4.25 elde edilmiştir.

$$\sigma = 4,2948\varepsilon^4 - 5,0214\varepsilon^3 + 2,1557\varepsilon^2 - 0,1220\varepsilon + 0,0584 \quad (4.25)$$

Denklem 4.24 ve 4.25 ε şekil değişimi değişkenine 0,01 aralıklarla o'dan 0,8 şekil değişimine kadar değerler verilerek σ gerilme değerleri bulunmuş olur. Bu değerlerle elde edilen veriler ile gerçek deney sonuçları Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi elde edilen denklem gerçek deneylerle aynı sonucu vermektedir. Elde edilen denklem EPS malzeme için farklı yoğunluk ve şekil değişimi hızları için doğru sonuç vermektedir.



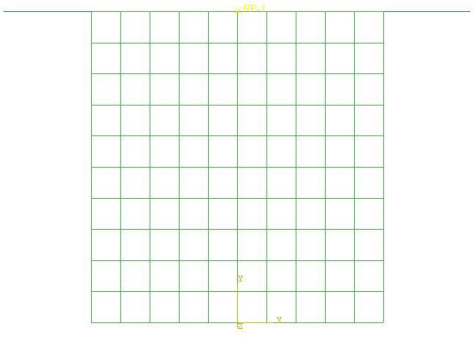
Şekil 4.2 : EPS12 ve 30 İçin 1000 mm/dak Hızlarda Deney Sonuçlarının Matematiksel Model ile Karşılaştırması

5. DENEYLERİN NÜMERİK KARŞILAŞTIRMASI^

Yapılan deneyler ABAQUS 6.5 sonlu elemanlar programı kullanılarak simüle edilmiştir. ABAQUS yazılımı ileri farklar yöntemini kullanarak çözüm yapabilen bir programdır. Dinamik hareket içeren simülasyonlarda bu yöntem kullanılmaktadır. Düz plaka ile tek eksen basma ve silindirik çene basma deneyleri numune ve yükleme şartları aynı olmak üzere modellenmiş ve çözüm elde edilmiştir.

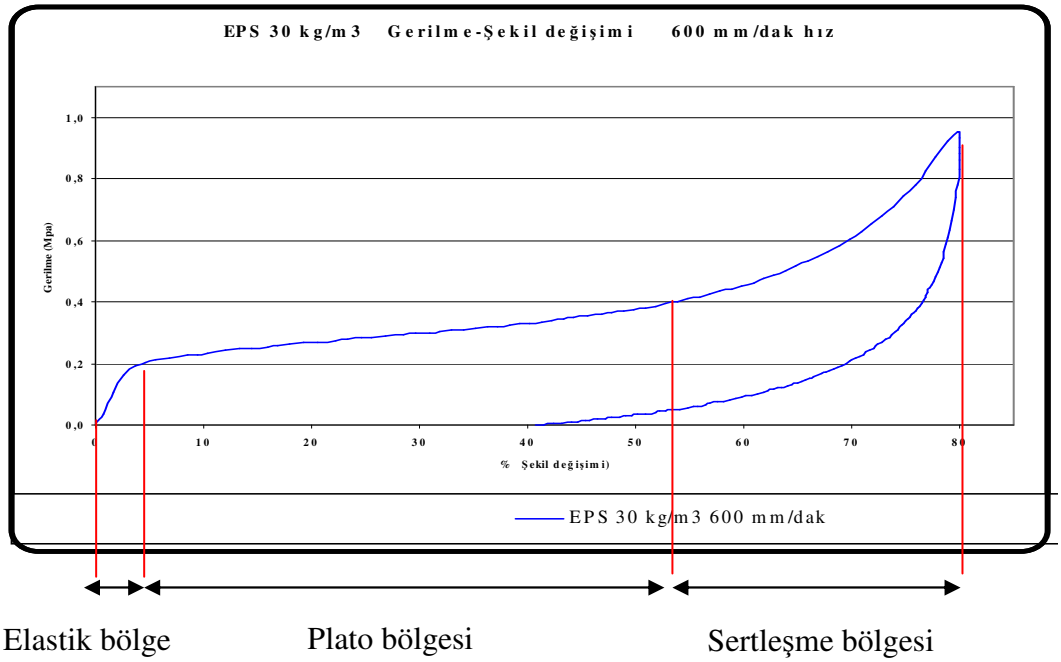
5.1 Düz Plaka ile Tek Eksen Basma Deneyi Simülasyonu

EPS 30 köpüğün basma deneyi nümerik olarak karşılaştırılmıştır. Tek eksen basma deneyi için 50x50 mm boyutlarında 2 boyutlu kabuk(shell) ağ örgüsü(mesh) oluşturulmuştur (Şekil 5.1). ABAQUS'ün "Shell explict lineer plane stres" eleman tipi kullanılmıştır. Basma üst çenesi ise 2 boyutlu analitik rijit olarak oluşturularak deforme olmayacak yapı bir çizgiyle modellenmiştir.



Şekil 5.1 : ABAQUS'de Oluşturulan Ağ Yapısı

Köpüğün malzeme modeli için "crushable foam" malzeme tipi kullanılmıştır. Bu malzeme tipi sönümleme yapabilecek köpükler için geliştirilen bir modeldir. Malzeme yoğunluğu 30 kg/m^3 , olarak girilmiştir. Malzemenin elastik bölgedeki davranışı için deney sonucundan elde edilen elastisite modülü değeri olan 5,88 Mpa değeri girilmiştir.

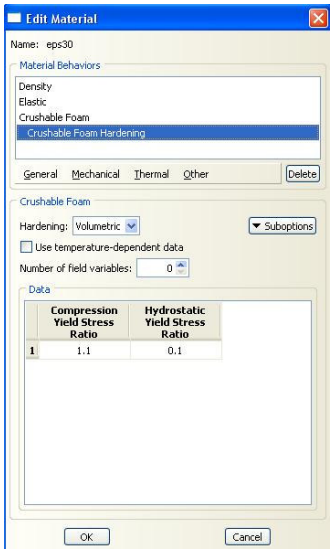


Şekil 5.2 : EPS30 İçin Gerilme-Şekil Değişimi Grafiği Bölgeleri

Gerilme şekil değişimi eğrisinde elastik, plato, sertleşme bölgesi Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{0{,}2MPa}{0{,}034} = 5{,}88MPa \qquad \textbf{5.1}$$

Elastik bölgedeki gerilme değeri karşılık gelen şekil değişime bölünerek elastisite modülü elde edilmiştir (Denklem 5.1).



Şekil 5.3 : ABAQUS'de Kullanılan "Crushable Foam" Malzeme

Crushable foam malzeme modelinin girdileri literatürden elde edilmiştir (Denklem 5.2).

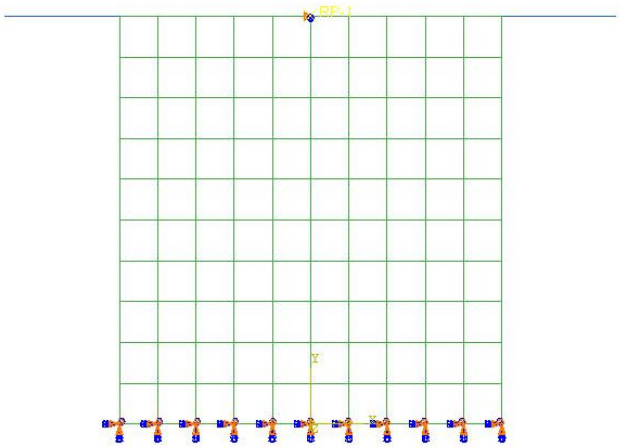
$$\frac{\text{Tek eksen basmadaki akma gerilmesi}}{\text{Tek eksen çekmedeki akma gerilmesi}} = 1,1$$

$$\frac{\text{Hidrostatik basınç deneyindeki akma gerilmesi}}{\text{Tek eksen basmadaki akma gerilmesi}} = 0,1 \qquad \textbf{5.2}$$

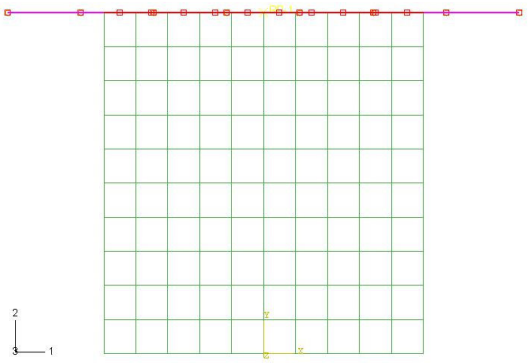
Bu değerler çözüm üzerinde fazla etkide bulunmamaktadır. Malzemenin davranışının belirleyen "Crushable foam hardening" parametresi ile girilen plato ve sertleşme bölgelerindeki gerilme ve şekil değişimi verileridir. Deney sonucunun elastik bölge sonundan şekil değişiminin sonuna kadar olan kızımdaki bütün gerilme ve şekil değişimi verileri girilerek malzemenin nasıl davranacağı programa gösterilmiştir.

Sınır koşulları olarak köpük alt düğüm noktalarından iki eksende de ötelenmeye ve dönmeye karşı sabitlenmiştir. Basma çenesini simüle eden çizgide referans noktasından dönmeye karşı sabitlenmiştir (Şekil 5.4).

Çözüm iki adımlı olarak yapılmıştır. Birinci yükleme adımında basma çenesi 600 mm/dak hızla 3 saniye basması koşulu girilmiştir. Bu sürede çene köpüğe 40 mm basarak %80 şekil değişimi yaptıracaktır. İkinci adım olan yük boşaltma adımında ise çene yukarı doğru yine 600 mm/dak hızla 2 saniye kadar hareket edecektir. Bu sürede de çenenin köpükle olan bağlantısı bitecek ve köpüğün üzerindeki yük tamamen kalkıncaya kadar veri toplanacaktır.



Şekil 5.4 : Sınır Koşulları

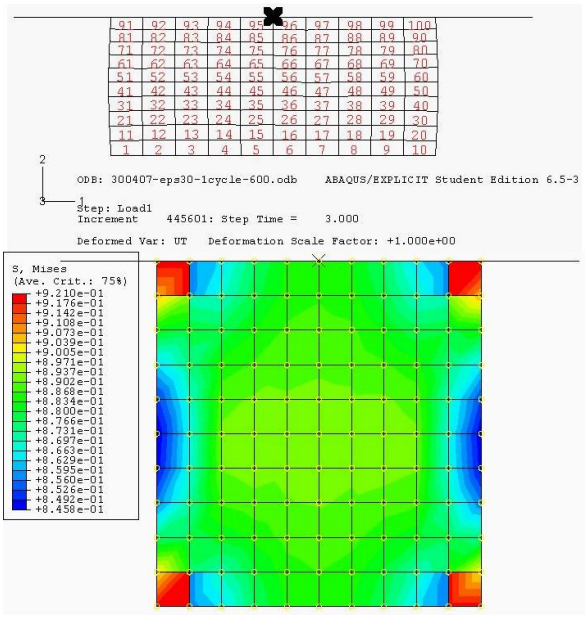


Şekil 5.5 : Kontak Yüzey Tanımlaması

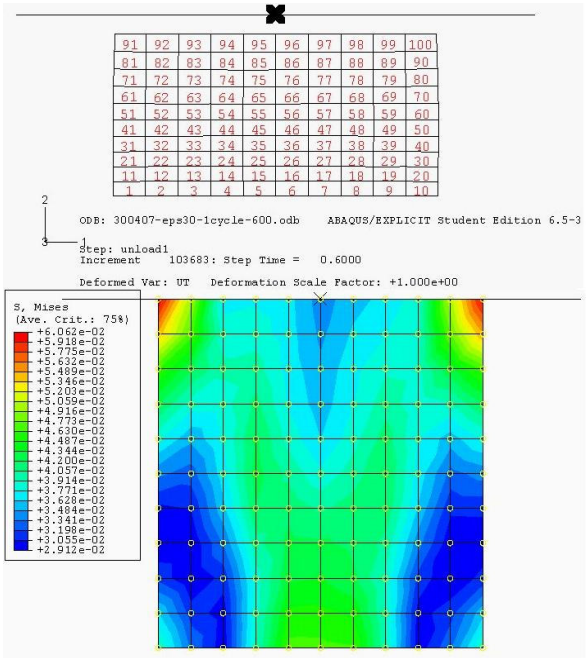
Köpüğün üst düğümleri ile çene arasında kontak yüzey tanımlanmıştır (Şekil 5.5). İki yüzey arasındaki sürtünme katsayısı 0,3 olarak girilmiştir. Köpüğün basma eksenine dik yönde şekil değişimi çok az olduğu için bu çözümde sürtünme katsayısının önemi azdır. Köpüğün alt düğümleri ile zemin arasında kontak yüzey tanımlanmamış, bunun yerine sınır koşulu olarak bu düğümler iki eksende de hareket etmeyecek şekilde sabitlenmiştir.

5.2 ABAQUS Nümerik Çözüm Sonuçları ve Karşılaştırmaları

ABAQUS'den elde edilen sonuçlar gerileme ve şekil değişim grafikleri olarak sunulmuştur (Ek B). Yapılan deneyler ile nümerik çözümler karşılaştırıldığında elastik bölgede tam bir uyum görülmüştür. Plato bölgesi olarak adlandırılan bölgede ise %50 şekil değişime kadar olan alanda uyum devam etmektedir. Ama % 50 şekil değişiminden sonra nümerik çözüm ile deney sonucu farklılık göstermektedir. Bu durum ambalaj malzemesinden beklenebilecek en fazla şekil değişimi % 50 miktarda olduğu düşünülürse pratik uygulamalar için sorun yaratmamaktadır. Yükleme kaldırılırken de nümerik çözüm doğru sonuç vermemektedir. Bu daha önce yapılan çalışmalarda da ortaya koyulmuştu. Ambalaj tasarımın tekrarlı düşme ve çarpma durumlarının dikkate alınmadığı çözümlerde yükleme kaldırılırken elde edilen veriler kullanılmayacağı için doğruluk aranmayabilir. %50 şekil değişimine kadar olan uyum, ilk düşme için doğru verileri vermektedir. 2 farklı malzemenin 3'er farklı yoğunlukları için yapılan karşılaştırma sonuçları elde edilen verilerin ABAQUS'de malzeme modeli olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Sonuçlar Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

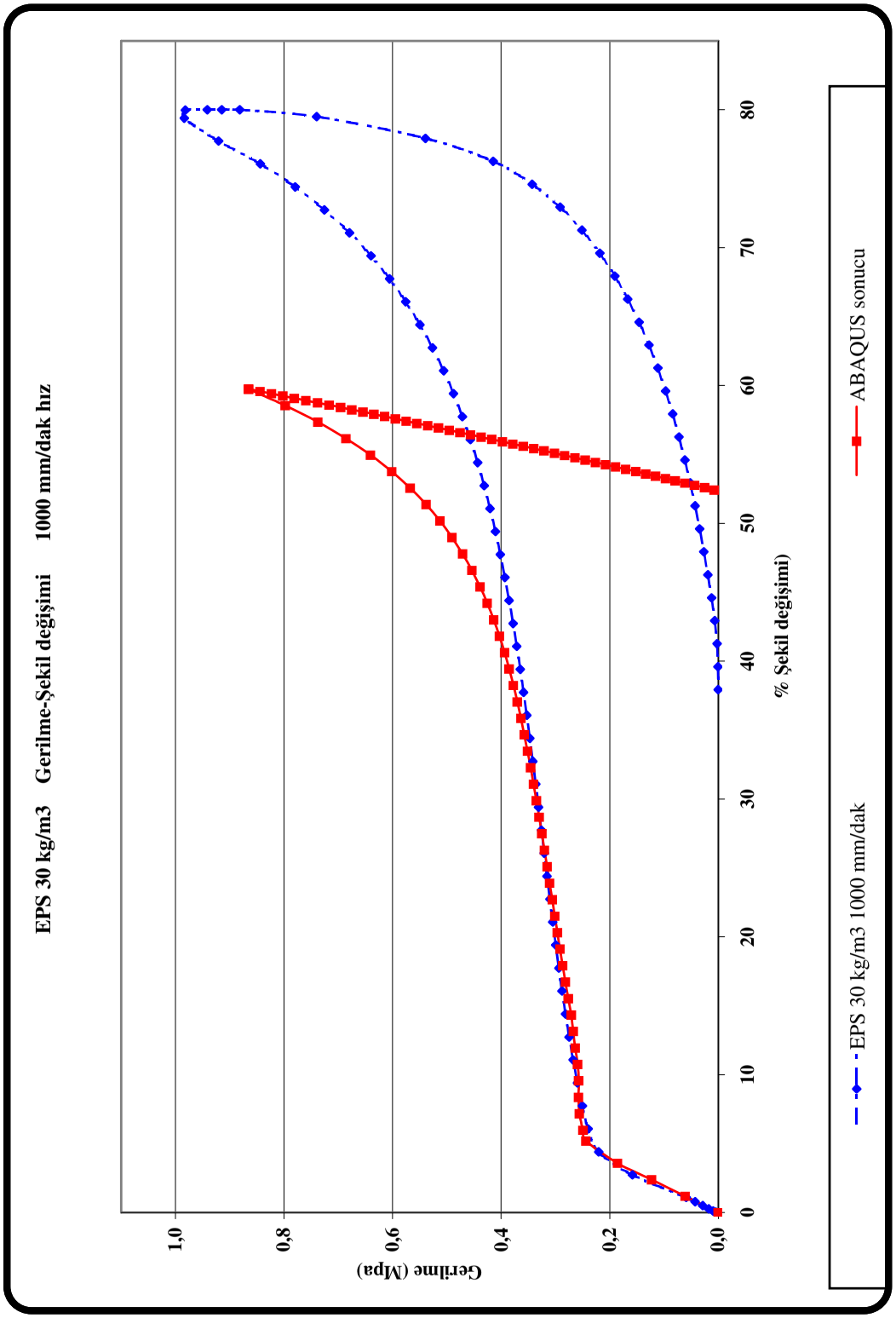


Şekil 5.6 : ABAQUS Simülasyonu %80 Şekil Değişimi Durumu

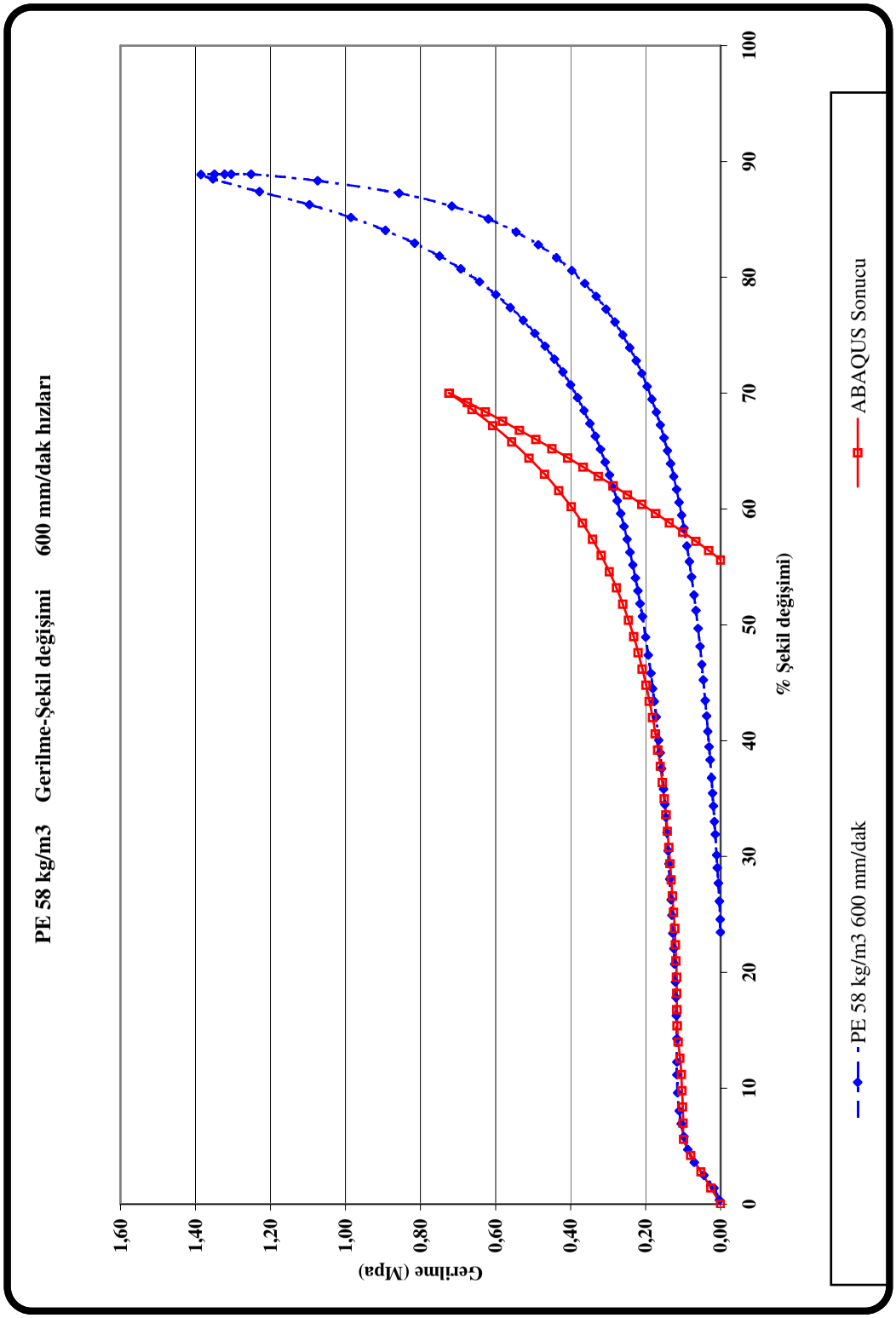


Şekil 5.7 : ABAQUS Simulasyonu %80 Şekil Değişimi Sonrası Yükün Kaldırılmış Durumu

Polietilen köpük polisitren köpüğe göre ABAQUS nümerik çözümünde daha yakın sonuçlar vermiştir (Şekil 5.8 ve 5.9). Bu durum polietilenin daha küçük gerilmelerde şekil değişimi göstermesi ile açıklanabilir.



Şekil 5.8 : EPS 30 1000 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması

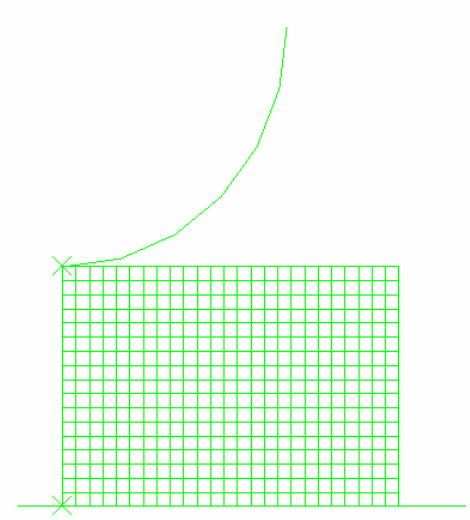


Şekil 5.9 : PE 58 600 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik karşılaştırması

5.3 Silindirik Çene ile Basma Simülasyonları

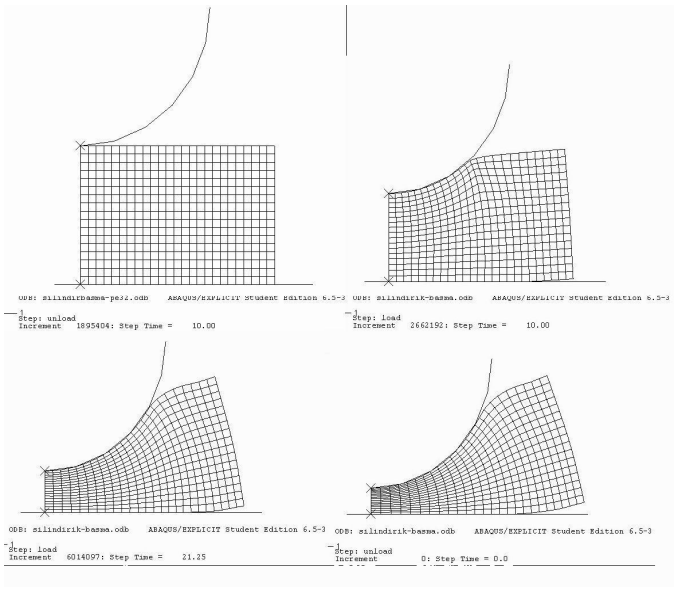
Silindirik çene ile yapılan deneyler ABAQUS sonlu elemanlar programında simüle edilmiştir. 150x50x50 mm boyutlarında olan numune 2 boyutlu kabuk (shell) ağ örgüsü ile sembolize edilmiştir (Şekil 5.10). ABAQUS'ün "Shell explict lineer plane stres" eleman tipi kullanılmıştır. Silindirik basma üst çenesi ise 2 boyutlu analitik rijit olarak oluşturularak deforme olmayacak yapı bir çizgiyle modellenmiştir.

Köpük için kullanılan malzeme modeli "Crushable foam"'dur. Bu modelin parametreleri tek eksen basma deneyi simülasyonu parametrelerinin aynısıdır. Şekilde oluşturulan model görülmektedir.



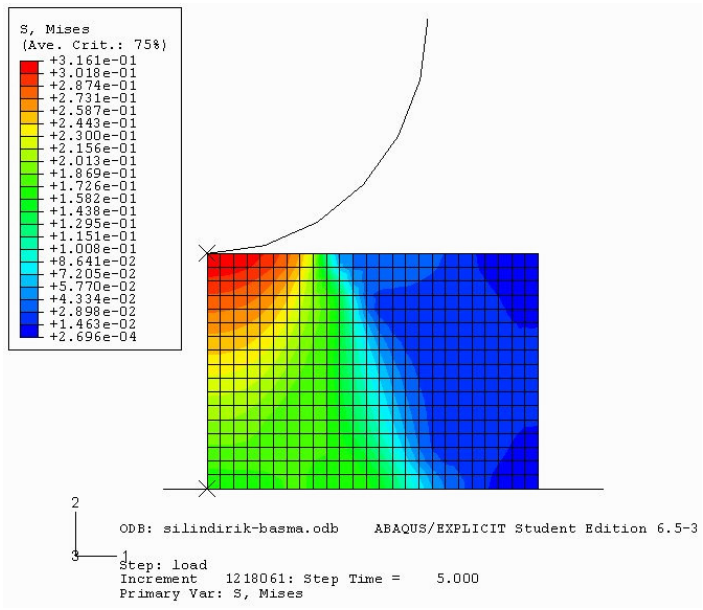
Şekil 5.10 : Silindirik Çene ile Basma Simülasyonu Modeli

Çözümün kısa sürmesi için numune ve silindirik çene ölçülerinin simetrik olarak sadece yarısı modellenmiştir. Çözüm iki adımlıdır. Birinci adımda %80 şekil değişimi yapıncaya kadar çene 100 mm/dak hızla basılmıştır. İkinci adımda ise yine 100 mm/dak hızla çene yükü boşaltarak yukarı doğru hareket etmektedir. Silindirik çene ile köpük arasında ve tek eksenden farklı olarak köpük ile zemin arasında kontak yüzey tanımlaması yapılmıştır. Silindirik çene ile basma 2 boyutlu gerilme yaratacağından zemin ile köpük arasında kayma meydana gelecektir. Kontak yüzeyler arasında sürtünme değeri 0,3 olarak girilmiştir.



Şekil 5.11 : Silindirik Çene ile Basma Simülasyonu Sonuçları

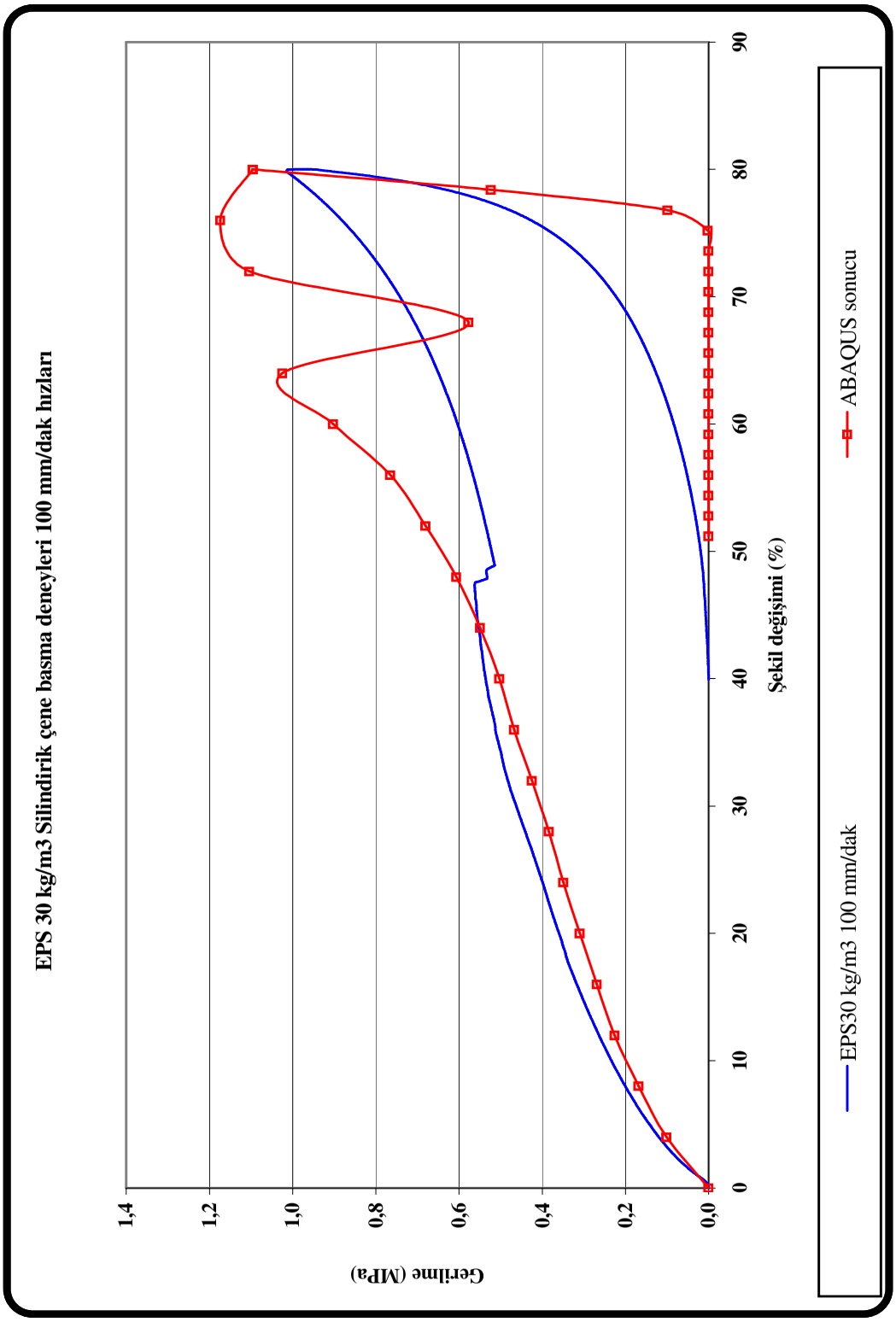
Çözüm için silindirik çene yüzeyine gelen kuvvet ile silindirik çenenin en alt noktasındaki referans noktasının deplasman verileri kullanılmıştır. Bu değerlerden gerilme ve şekil değişim grafikleri çizilerek yapılan gerçek deneylerle karşılaştırılmıştır (Şekil 5.11 ve Şekil 5.12).



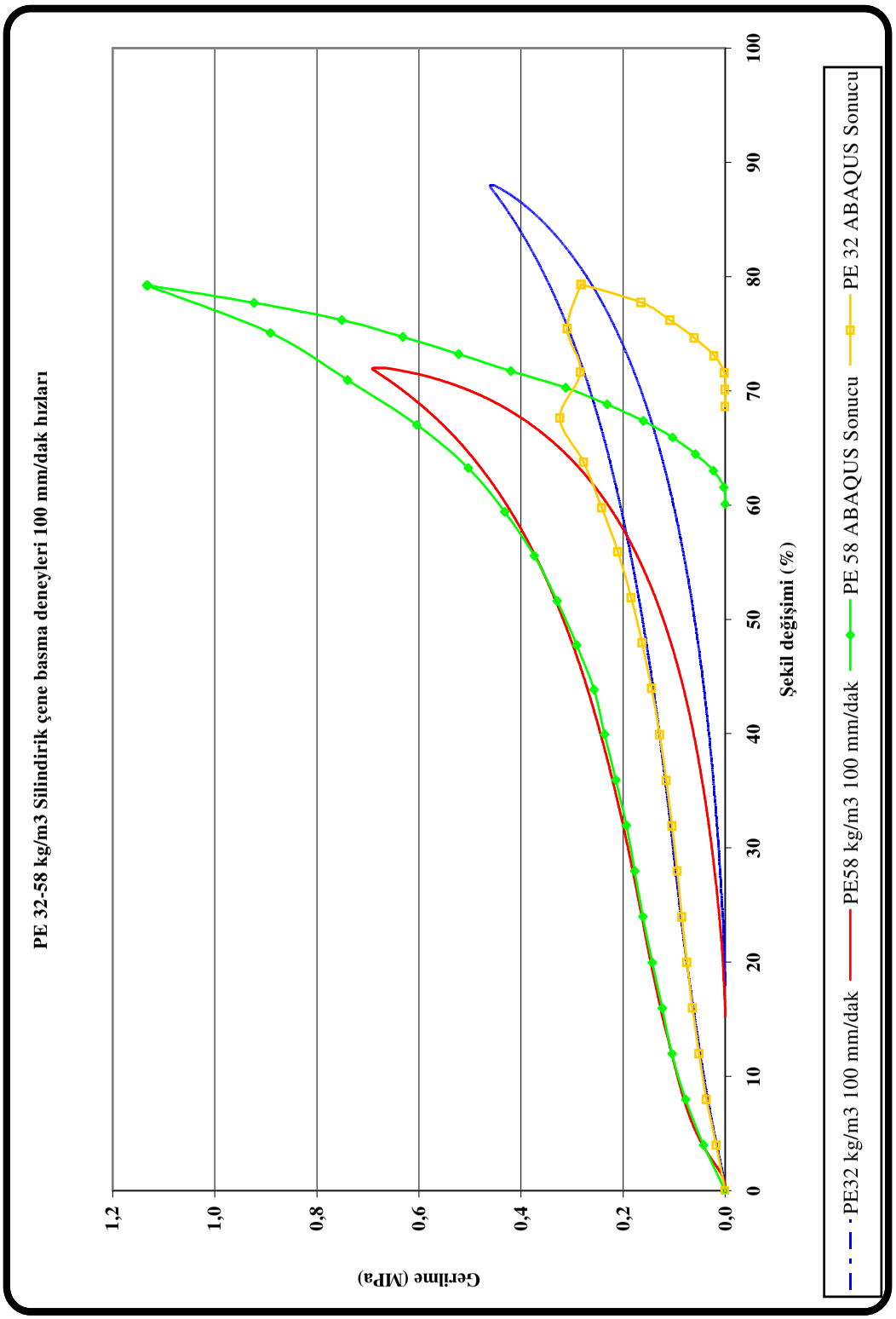
Şekil 5.12 : Silindirik Çene ile Basma Simülasyonu Sonuçları

Yükleme sonunda köpüğün silindir çene tarafından en fazla şekil değişime uğratılan bölgesinde 0,316 Mpa gerilme değerleri oluşmuştur. Gerilme dağılımı çenenin etkisinin az görüldüğü sağ alta doğru kademeli olarak azalmaktadır.

Yapılan gerçek deney verilerleriyle yapılan karşılaştırmada %50 şekli değişime kadar bir uyum görülmektedir. Şekil değişimi miktarı arttıkça nümerik çözümün hata payı artmaktadır. Yükleme kaldırılırken nümerik veriler doğru sonuç vermemektedir. Bu çalışmada malzeme modeli için tek eksen basma deney verileri girilerek malzeme tanımlanmıştır. Bu verilerle yapılan silindirik çene basma simülasyonun dada gerçek deneylerle uyum görülmüştür. Buradan tek eksen basma verilerinin polimerik köpüklerin sonlu elemanlar yazılımlarında tek eksen basma deney sonuçlarının kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Bu uyumun nedenleri arasında köpüğün poisson oranı sıfır kabul edilebilecek kadar küçüktür. Bu yüzden silindirik basma gibi iki boyutlu gerilme yaratan basılmalarda farklı davranış göstermemektedir.



Şekil 5.13 : EPS 30 100 mm/dak Hızda Silindirik Çene ile Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması



Şekil 5.14 : PE 32 ve PE 58 100 mm/dak Hızda Silindirik Çene ile Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması

6. KAYNAKLAR

[1] **Zhang, J., Kikuchi, N., Li, V., Yee, A. and Nusholtz, G.** 1998. Constitutive Modelling of Polymeric Foam Material Subjected to Dynamic Crash Loading, *Int J. Impact Engineering,* **21,** 369-386.

[2] **Gilchrist, A., Mills, N., J.** 2001. Impact deformation of rigid polymeric foams: experiments and FEA modelling, *Int J. Impact Engineering,* **25,** 767-786.

[3] **Juntikka, R., Hallström, S.** 2004. Weight-balanced drop test method for characterization of dynamic properties of cellular materials,

Int J. Impact Engineering, **30,** 541-554.

[4] **Mills, N., J., Masso-Moreu, Y.,** 2005. Finite Element Analysis Applied to Polethylene Foam Cushions in Package Drop Tests,

Packaging Technology and Science, **18,** 29-38.

[5] **Song, B., Chen, W.W., Dou, S., Winfree, N.A. and Kang, J.K.,** 2004. Strain-rate effects on elastic and early cell-collapse response of a polystyrene foam, *Int J. Impact Engineering,* **31,** 509-521.

[6] **Deshpande, V.S., Fleck, N.A.,** 2001. Multi-Axial yield behaviour of polymer foams, ,*Acta master,* **49,** 1859-1866.

[7] **Tai, C.M., Li, R.K.Y., Ng, C.N.,** 1998. Impact behaviour of polypropylene/polyethylene blends, ,*Polymer Testing,* **19,** 143-154.

[8] **Masso-Moreu, Y., Mills, N.J.,** 2002. Impact compression of polystyrene foam pyramids, *Int J. Impact Engineering,* **28,** 653-676.

[9] **Tabiei, A., Yi, W.Y., Golgberg, R.,** 2004. Non-linear strain rate dependent micro-mechanical composite material model for finite element impact and crashworthiness simulation, *Int J. Non-Linear Mechanics,* **40,** 957-970.

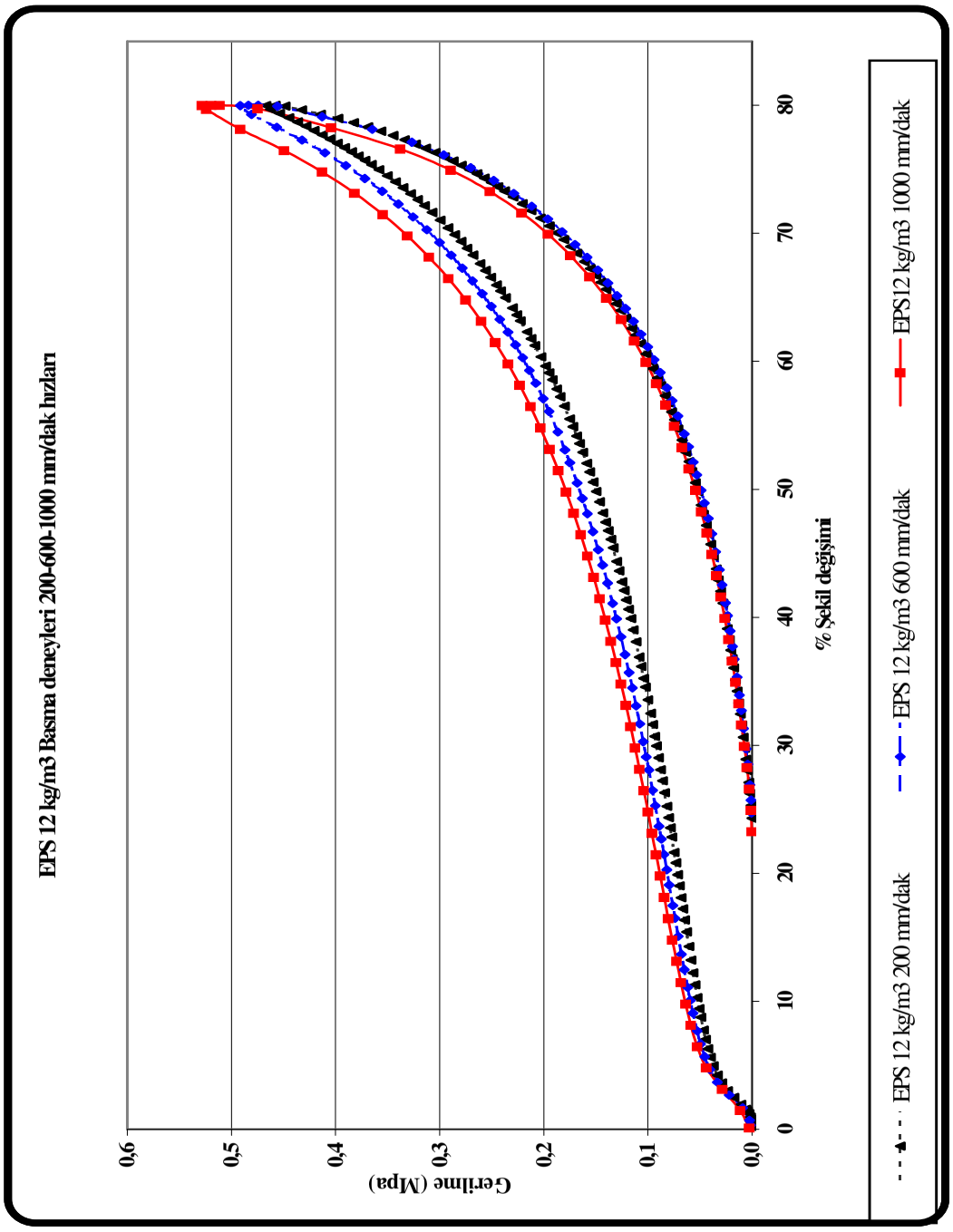
[10] **Brody, A.L. and Marsh, K. S.,** 1997. The Wiley Encylopedia of Packaging Technology, pp. 745-750, A Wiley-Interscience Publication London

[11] **Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Elcin, P., Joy, D.C. and Romig, A.D.,** 1994. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, pp. 641-643, Plenuem Pres London

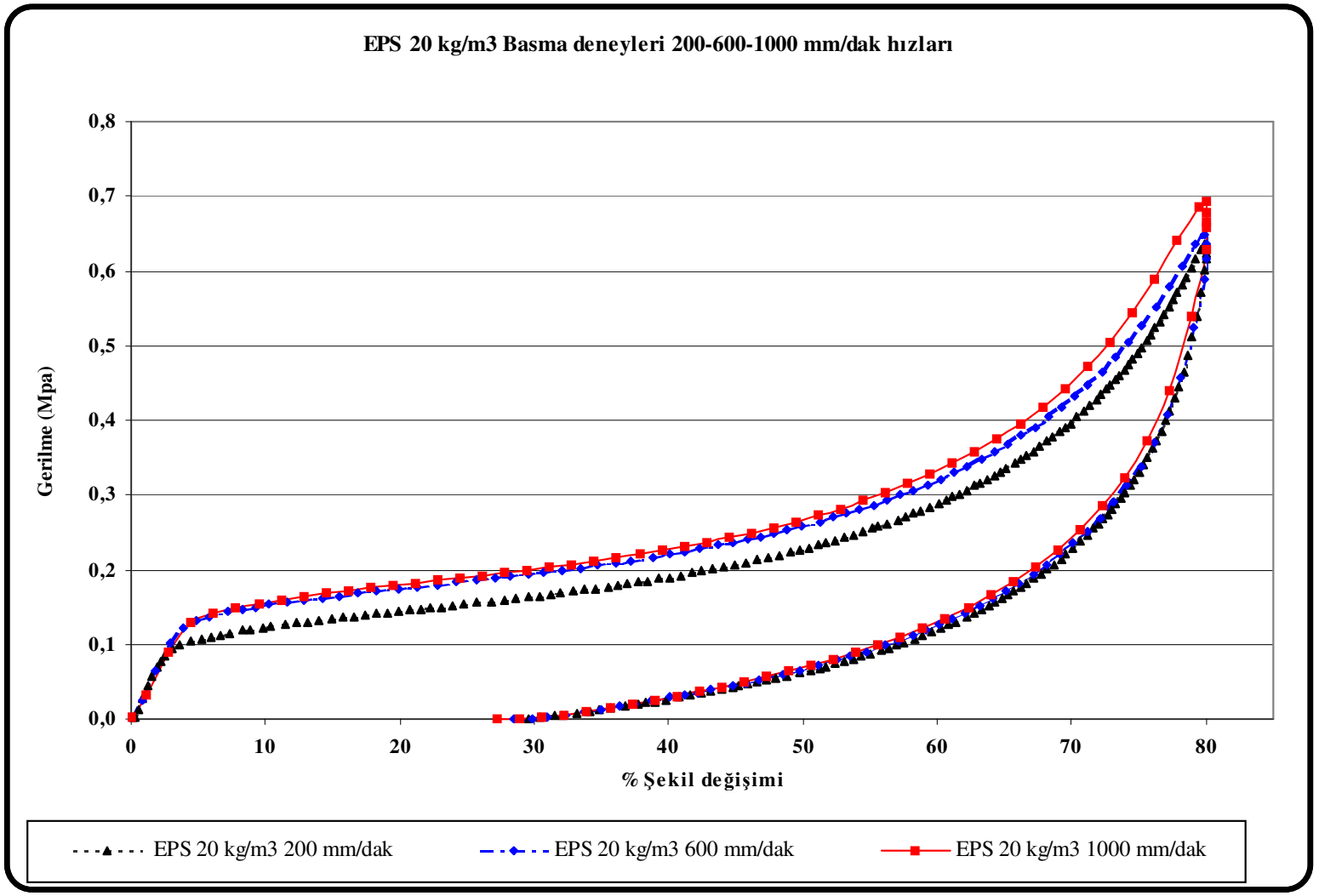
[12] **Yüksel, M.,** 2003. Malzeme Bilgisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, İstanbul

[13] **BASF,** Styropor technical information, *BASF Aktiengeselischaft*, Germany

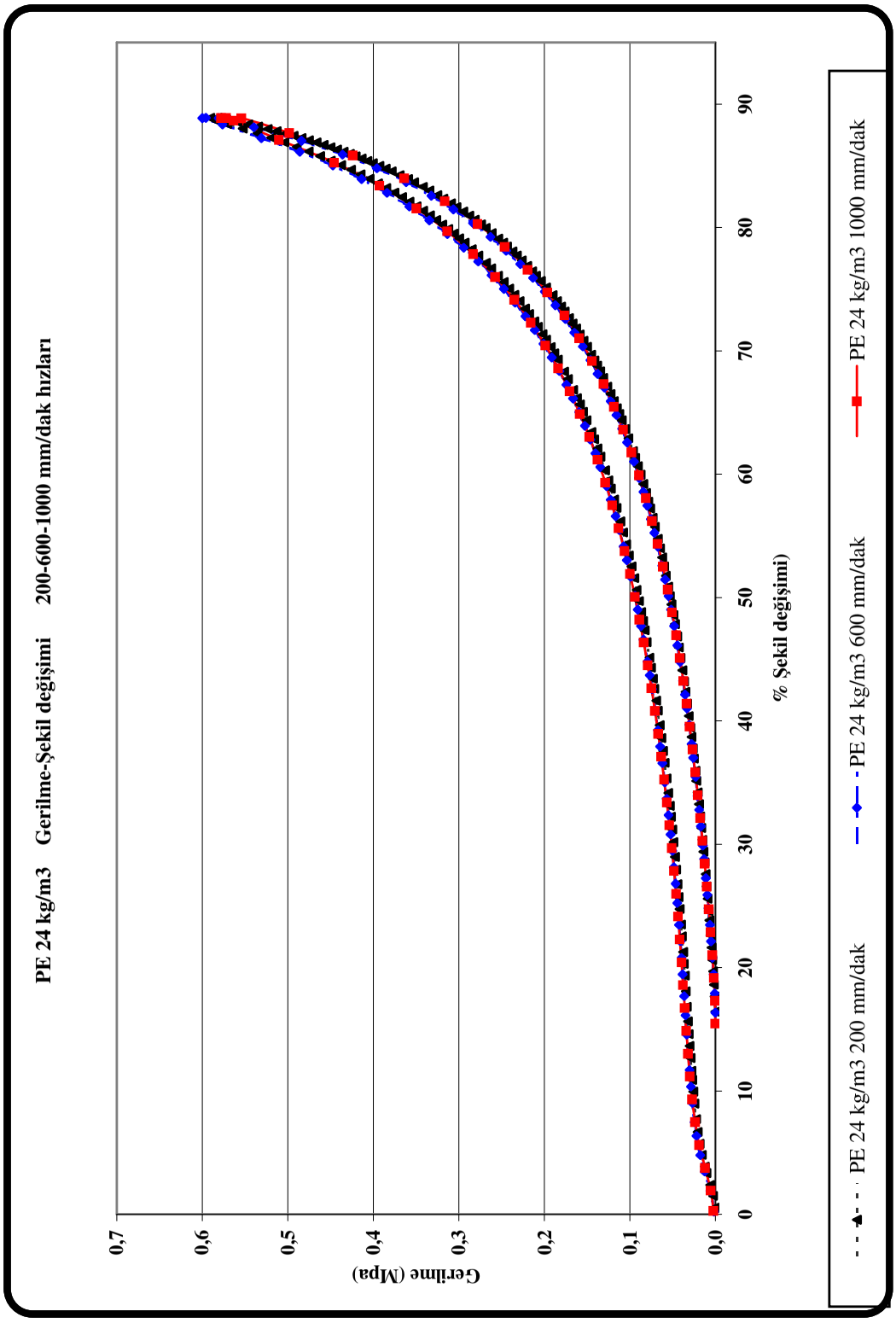
EK-A



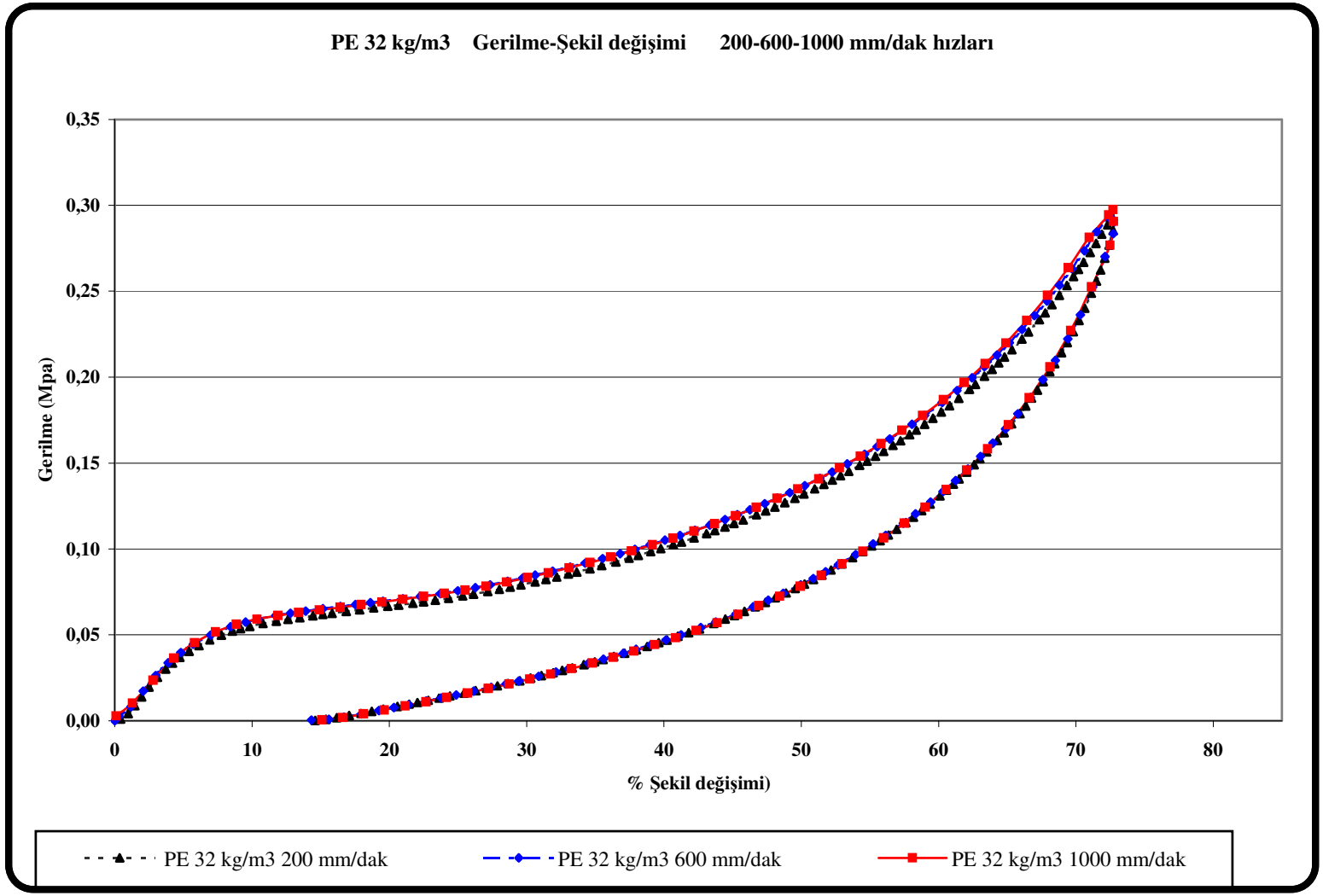
Şekil A.1 : EPS 12 Düz Basma Deney Sonuçları



Şekil A.2 : EPS 20 Düz Basma Deney Sonuçları

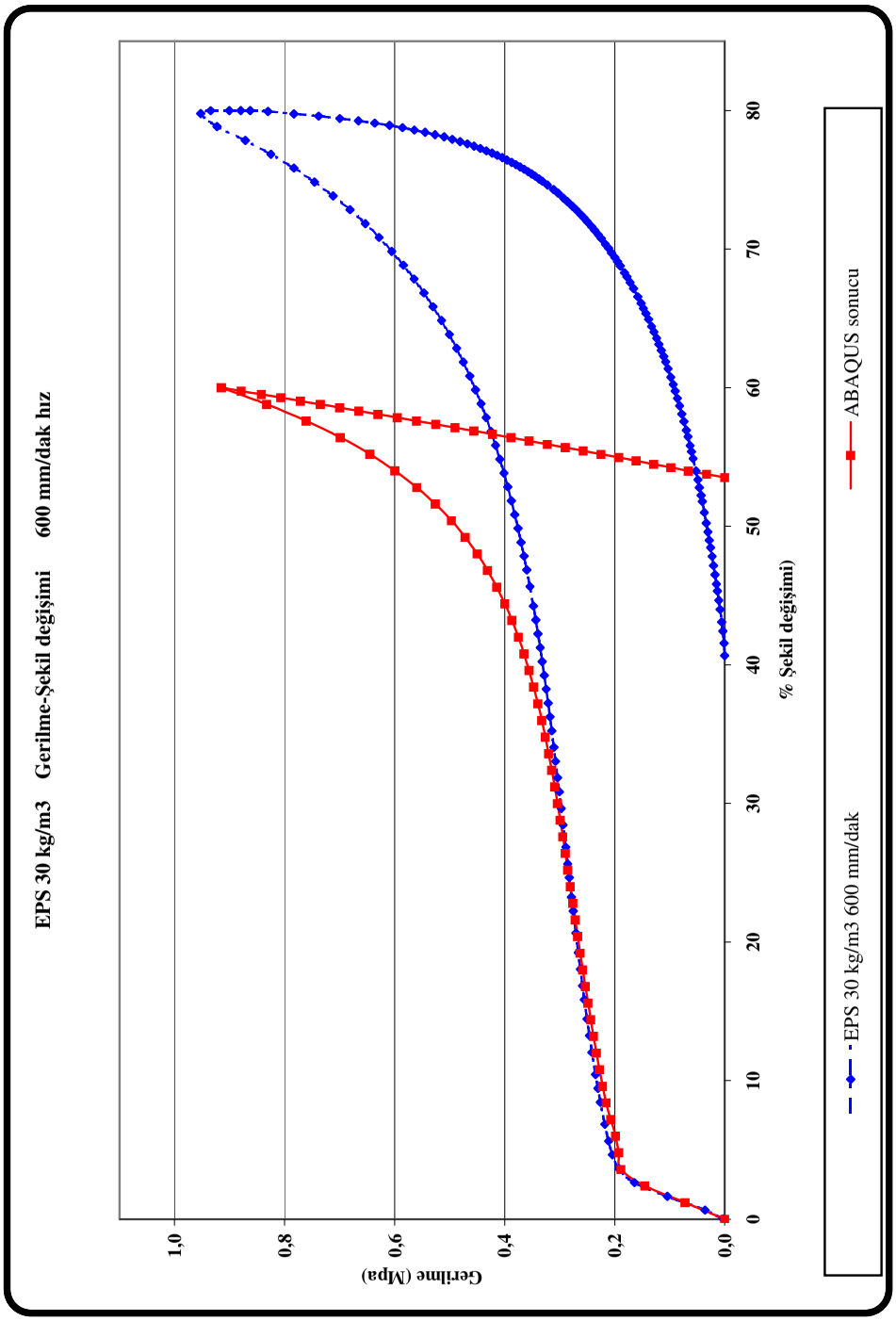


Şekil A.3 : PE 24 Düz Basma Deney Sonuçları

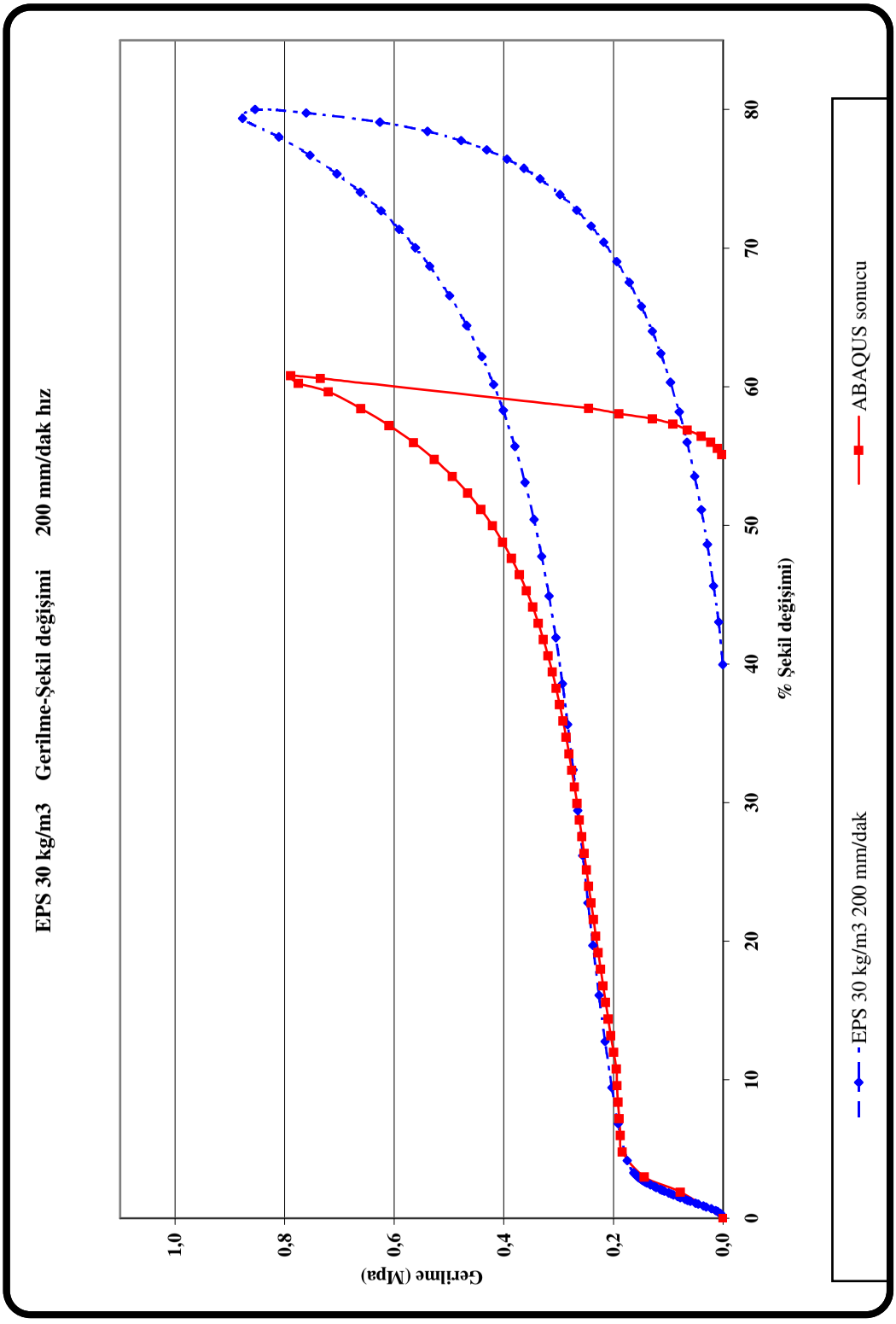


Şekil A.4 : PE 32 Düz Basma Deney Sonuçları

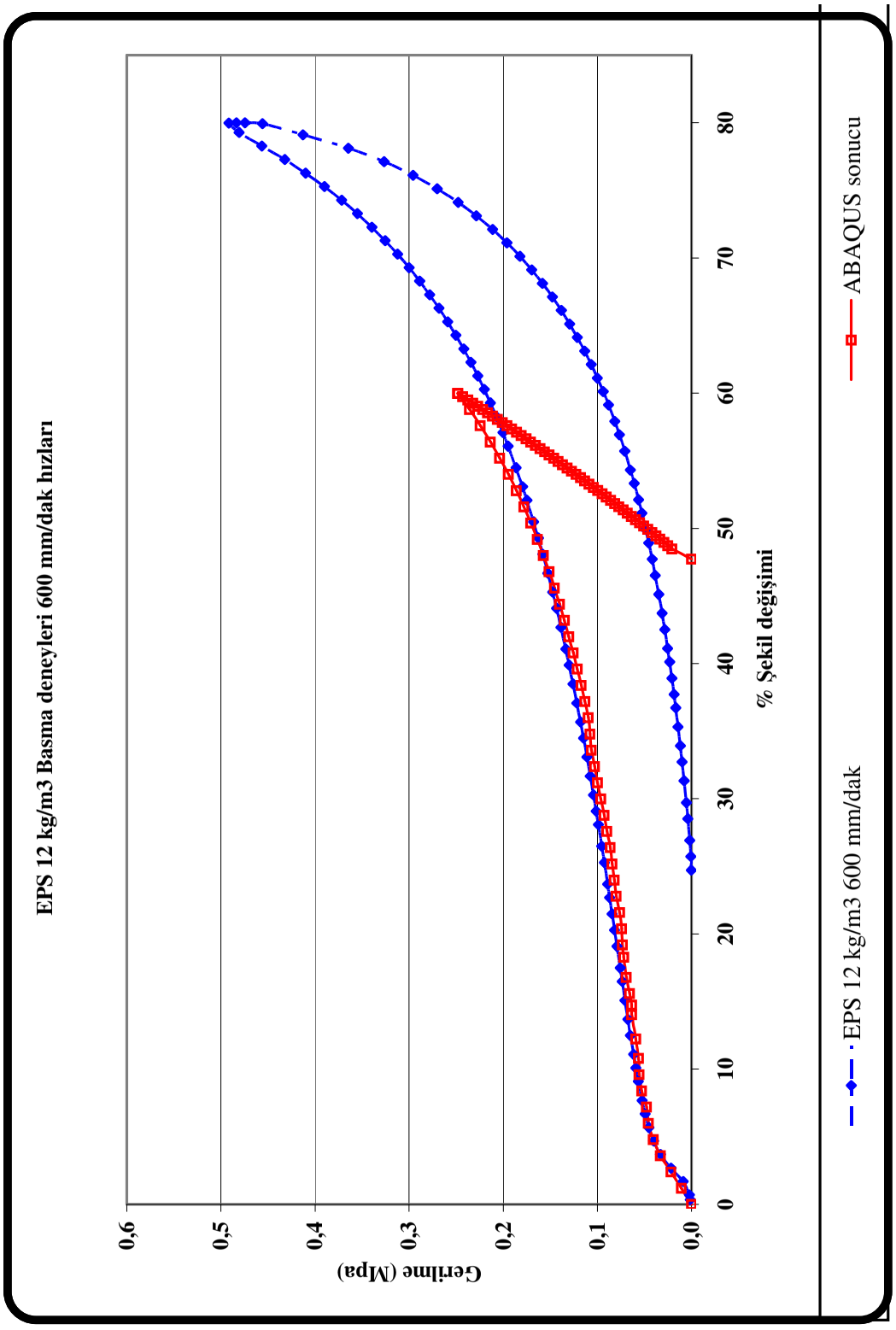
EK-B



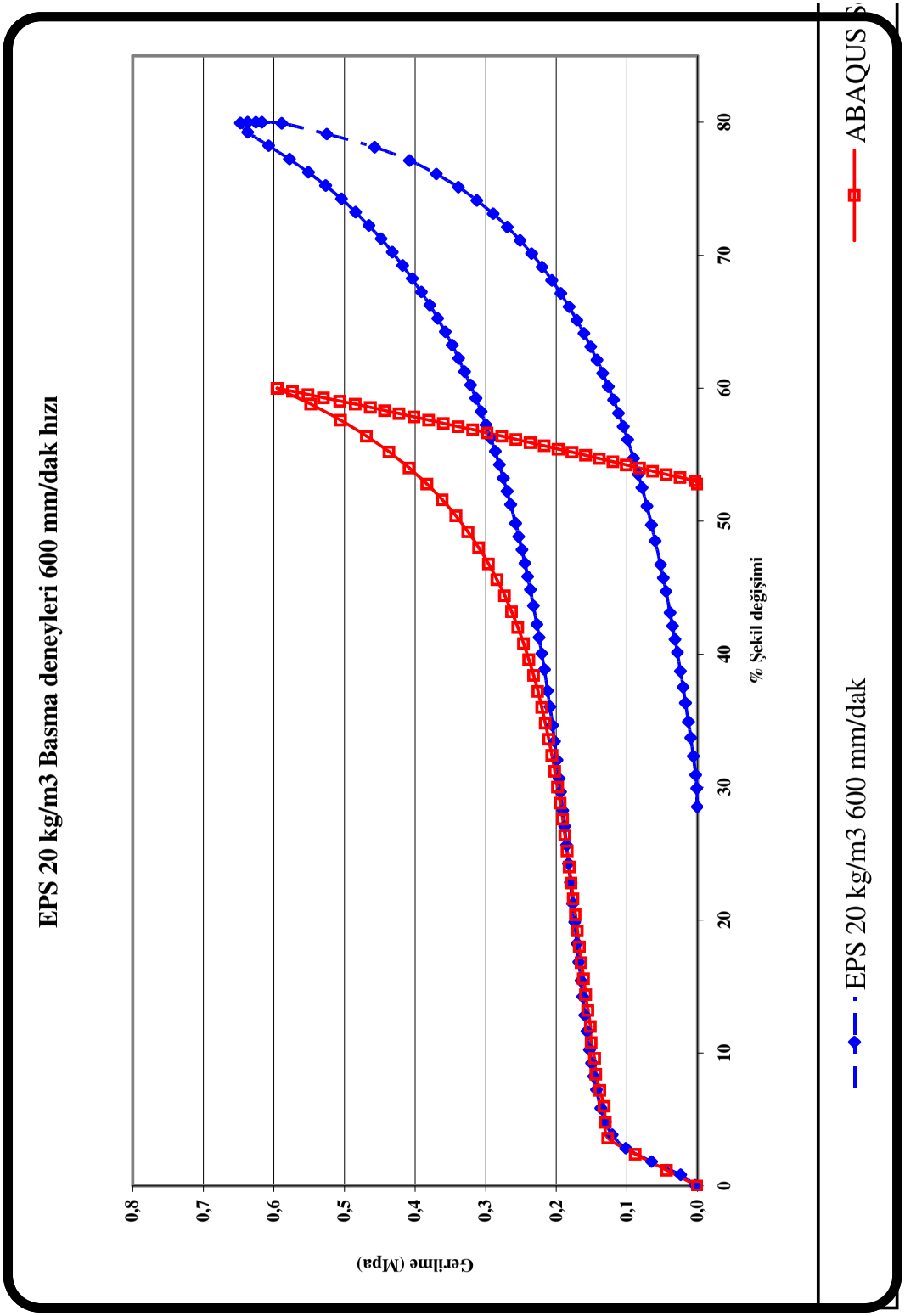
Şekil B.1 : EPS 30 600 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması



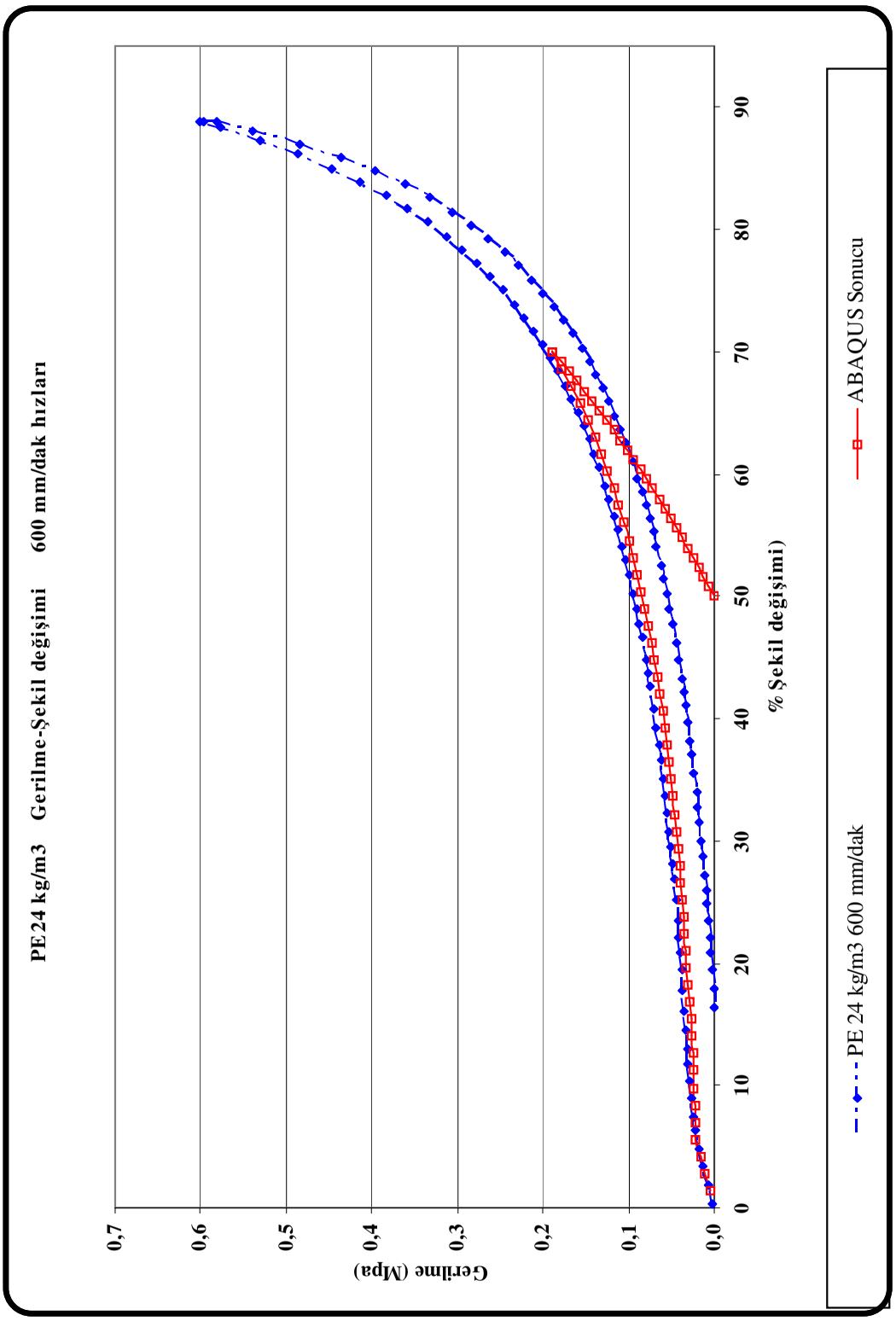
Şekil B.2 : EPS 30 200 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması



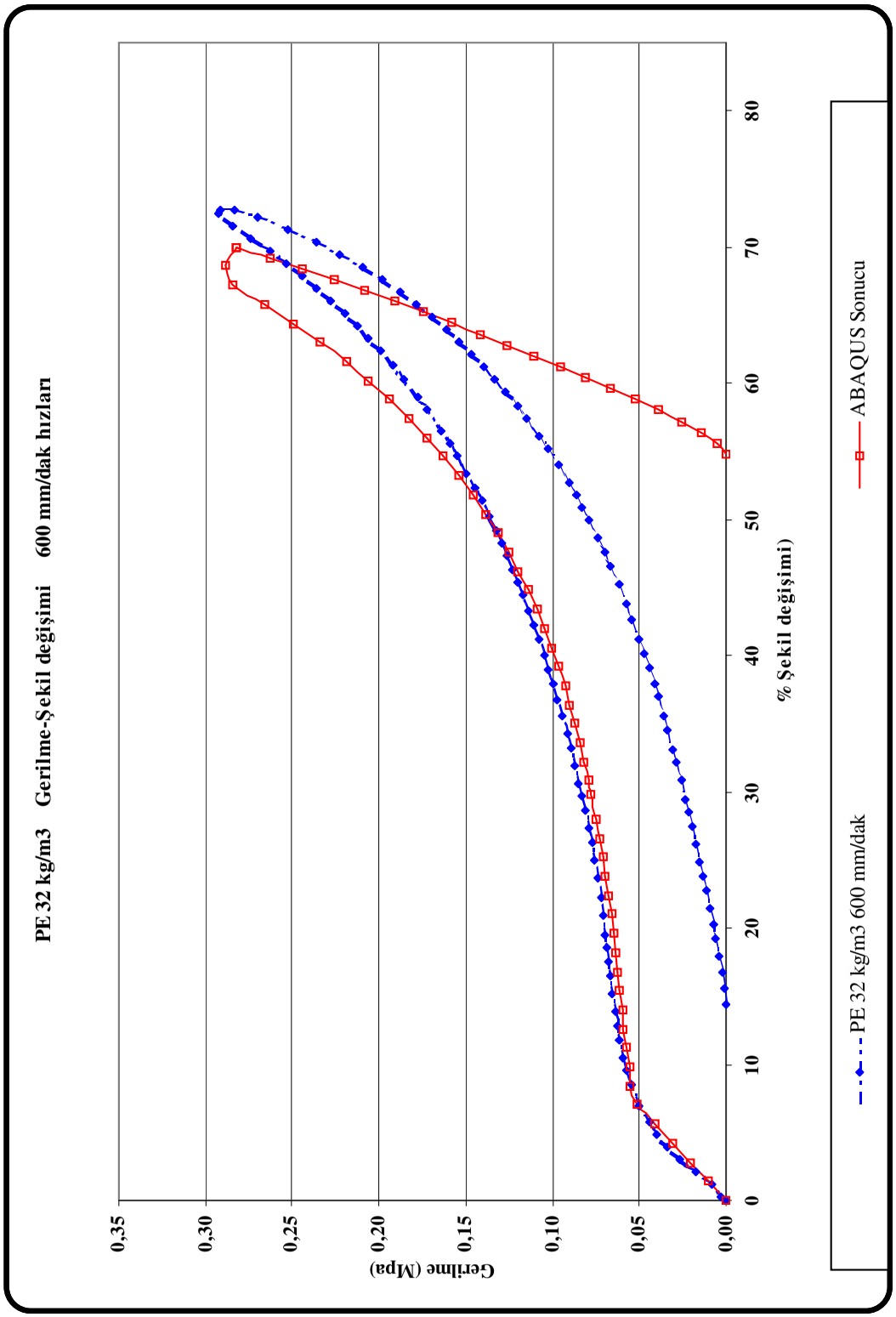
Şekil B.3 : EPS 12 600 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması



Şekil B.4 : EPS 20 600 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması



Şekil B.5 : PE 24 600 mm/dak hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması



Şekil B.6 : PE 32 600 mm/dak Hızda Tek Eksen Basma Deneyi Nümerik Karşılaştırması

ÖZGEÇMİŞ

Gürhan Kuzgun, 1982 yılında Eskişehir'de doğdu. Orta öğrenimini Eskişehir'de bulunan Kılıçoğlu Anadolu Lise'sinde tamamladı. 2000 yılında Ege Üniversitesi Makine Mühendisliğinde lisans öğrenimine başladı. 2004 yılında Ege Üniversitesi'nden Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2006 Yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malzeme ve İmalat programında yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen İ.T.Ü. Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrencisi olup, İ.T.Ü. ve ARÇELİK A.Ş. arasında imzalanmış üniversite-sanayi işbirliği çerçevesinde ARÇELİK A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde çalışmalarına devam etmektedir.