

768277



**T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KÖPÜK METAL MALZEMELERİN
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ**

Ozan AVARİSLİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

BURSA - 2005

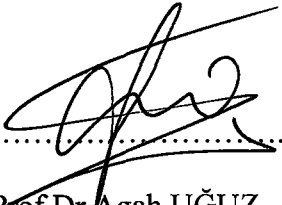
T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

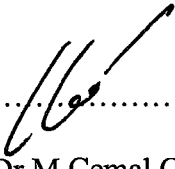
KÖPÜK METAL MALZEMELERİN
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

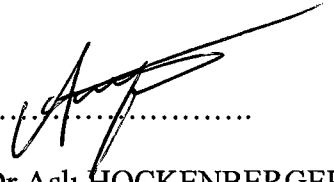
Ozan AVARİSLİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BURSA 2005

Bu Tez10.1.2005)..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir


.....
Prof. Dr. Agah UĞUZ
(Danışman)


.....
Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR


.....
Doç. Dr. Aslı HOCKENBERGER

ÖZET

Bu çalışma kapsamında Alüminyum köpük metalinin basma mukavemeti ve enerji sönümlenme kapasitesi incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda elde edilen sonuçlar hassasiyet sağlamak açısından sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

40000 N' luk bir basma yükü eksenel bir şekilde deney numunesine uygulanmıştır. Deney numunesini temsil eden model ANSYS 8.0 yazılımında modellenmiş ve aynı yükleme yapılmıştır. Bu iki işlem sonucunda elde edilen sonuçlar iç yapı farklılığı da göz önünde bulundurarak karşılaştırılmıştır.



ABSTRACT

In this study, compression strength and energy absorbing capacity of the Al-foam material are investigated. Test results were compared with numerical analyses results to achieve accuracy.

40000 N was applied axially as a compression load in compression test operation. Same representing geometry was modelled and the same load was applied simultaneously in ANSYS 8.0 classic environment. Extracted results were compared considering geometrical nonlinearity.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1 ALÜMİNYUM ESASLI KÖPÜK METALİNİN KULLANIM ALANLARI	2
2.2 ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	5
2.2.1 Sıvı Metal Halinden Üretim.....	7
2.2.2 Toz Halinden Üretim.....	8
2.2.3 Metal Buharı ve Gaz Halinden Üretim.....	10
2.2.4 Metal İyon Çözeltilisinden Üretim.....	11
2.3 MEKANİK ÖZELLİKLER.....	12
2.3.1 Basma Dayanımı.....	12
2.3.2 Enerji Sönümlenmesi.....	16
2.3.3 Yorulma.....	18
2.3.4 Isı Transferi.....	20
2.3.5 Akustik Özellikler	20
2.4 GENEL MUKAVEMET HESAPLAMALARI.....	22
2.4.1 Gerilme – Şekil Değiştirme Arasındaki İlişki.....	22
2.5 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	24
2.5.1 Giriş.....	24
2.5.2 Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak modelleme.....	25
2.5.2.1 Genel Modelleme.....	25
2.5.2.2 Elemanların seçimi.....	27
2.5.2.3 Yüklemeler ve sınır koşulları.....	32
2.5.2.4 Önemli noktalar ve ayıklama.....	33

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36
3.1 KULLANILAN MALZEME.....	36
3.2 MÜHENDİSLİK GERİLMESİ VE GERÇEK GERİLME.....	38
3.2.1 Basma Gerilmesi.....	40
3.3 SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ.....	40
3.3.1 Statik analiz.....	40
3.4 HESAPLAMALI ÇALIŞMA.....	42
3.4.1 Katı Modelin Kurulması.....	42
3.4.2 Sonlu Elemanlar Modelinin Kurulması.....	44
3.4.3 Yüklemeler.....	46
3.5 ELEKTRON MİKROSKOBİSİ.....	48
4. SONUÇLAR	49
4.1 DENEYSEL ÇALIŞMA.....	49
4.1.1 Mikro Malzeme Yapısı.....	49
4.1.2 Gerilme – Şekil Değişirme Eğrileri.....	52
4.1.3 Sönümlenen Enerji Miktarı.....	58
4.2 HESAPLAMALI ANALİZ SONUÇLARI.....	59
4.3 SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI.....	63
4.4 TARTIŞMA.....	64
4.5 ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR.....	66
TEŞEKKÜR.....	70
ÖZGEÇMİŞ.....	71

ŞEKİLLER DİZİNİ**SAYFA**

Şekil 2.1	Alüminyum esaslı köpük malzeme.....	2
Şekil 2.2	Al köpük esaslı A-sütunu.....	3
Şekil 2.3	Al köpük esaslı ön paneller.....	3
Şekil 2.4	Çeşitli darbe kutuları.....	4
Şekil 2.5	Basitleştirilmiş darbe çubuğu.....	4
Şekil 2.6	Çarpma sonucunda oluşan yapı.....	5
Şekil 2.7	Bir fazdan ikinci bir faza geçişteki dağılım.....	5
Şekil 2.8	Hücre sel metalik malzemeler için üretim yöntemlerinin şeması.....	6
Şekil 2.9	Gaz enjeksiyon ile doğrudan köpükleme işlemi.....	7
Şekil 2.10	Ara elemanlar ile doğrudan köpükleme işlemi.....	8
Şekil 2.11	100µm boyutunda bronz parçacıklarıyla sinterlenmiş gözenekli yapı.....	9
Şekil 2.12	Gaz tuzacı yöntemi.....	10
Şekil 2.13	Nikel Karbonil prosesi ile üretilmiş bir “Incofoam”.....	11
Şekil 2.14	Elektro-depozisyon tekniği ile metal esaslı köpük malzeme üretimi..	12
Şekil 2.15	Metalik Köpük yapının basma kuvveti altındaki davranışı.....	12
Şekil 2.16	AlSi12 metalik köpük malzeme için basma gerilmesi – yoğunluk değişimi (%20 lineer küçülme).....	14
Şekil 2.17	ASTM D1621-73 Eksenel simetrik basma testi.....	15
Şekil 2.18	Enerji sönmleme özelliği.....	16
Şekil 2.19	AlSi12 metalik köpük alaşımının farklı yoğunluklardaki enerji sönmleyebilme kapasitesi.....	17
Şekil 2.20	6061 Alüminyum alaşımı için S-N Eğrisi.....	18
Şekil 2.21	Farklı alaşım tipleri ve özelliklerine göre S-N eğrilerinin karşılaştırılması.....	19
Şekil 2.22	AlSi12 köpük metali için farklı yoğunluk değerlerinde ses kayıp faktörleri.....	21
Şekil 2.23	Farklı malzemeler için ses sönmleme yüzdeleri.....	21
Şekil 2.24	Test makinesine bağlı bir çekme numunesi.....	22
Şekil 2.25	Farklı çelik tipleri için gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	23

Şekil 2.26	Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanlar.....	25
Şekil 2.27	Eleman geometrisinde müsaade edilebilir deformasyonlar.....	26
Şekil 2.28	Bir silindirik yüzey etrafındaki tipik eleman dağılımı.....	27
Şekil 2.29	Bir delikli geometride delik etrafındaki tipik eleman dağılımı.....	27
Şekil 2.30	Sabit gerilmeli üçgen eleman.....	28
Şekil 2.31	Dört nodlu çifte lineer dörtgen eleman.....	30
Şekil 2.32	Dört nodlu ve dört kenarlı elastik eleman (x,y eksenleri eleman düzlemi içindedir).....	31
Şekil 2.33	İki ucu basit mesnetli kiriş.....	32
Şekil 3.1	Zwick 1455 test makinesi.....	36
Şekil 3.2	Deney numunesinin basma sırasındaki deformasyonu.....	37
Şekil 3.3	Deney Numunesi.....	37
Şekil 3.4	Test sonucundaki deney numunesi.....	37
Şekil 3.5	Yumuşak çelik için gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	38
Şekil 3.6	Üç boyutlu katı model.....	43
Şekil 3.7	İki boyutlu katı model.....	43
Şekil 3.8	SOLID185 elemanı.....	44
Şekil 3.9	Al Köpük malzemenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli.....	45
Şekil 3.10	PLANE182 elemanı.....	45
Şekil 3.11	Köpük malzemenin iki boyutlu sonlu elemanlar modeli.....	46
Şekil 3.12	Üç boyutlu modelin sınır şartları.....	47
Şekil 3.13	İki boyutlu modelin sınır şartları.....	47
Şekil 3.14	JEOL / JSM-6335F.....	49
Şekil 3.15	Elektron mikroskobunda kullanılan deney numunesi.....	49
Şekil 4.1	Deneylerde kullanılmış AlSi7 köpük malzemenin genel kırılma yüzeyinin elektron mikrografi.....	49
Şekil 4.2	Kullanılan numunelerin birinden alınmış yakın hücre görüntüsü.....	50
Şekil 4.3	Kabuk ve hücre duvarlarının yakın görüntüsü.....	50
Şekil 4.4	Hücrelerin kesişim noktalarının yakından görünüşü.....	51
Şekil 4.5	Hücre duvarının ayrıntılı görüntüsü.....	51
Şekil 4.6	Deney numunesi A2 parçasının kuvvet – deformasyon diyagramı.....	52
Şekil 4.7	Deney numunesi A3 parçasının kuvvet – deformasyon diyagramı.....	53

Şekil 4.8	Deney numunesi B1 parçasının kuvvet – deformasyon diyagramı.....	53
Şekil 4.9	Deney numunesi B2 parçasının kuvvet – deformasyon diyagramı.....	54
Şekil 4.10	Deney numunesi B3 parçasının kuvvet – deformasyon diyagramı.....	54
Şekil 4.11	Ortalama kuvvet – deformasyon diyagramı.....	55
Şekil 4.12	Gerilme – Şekil değiştirme diyagramları.....	56
Şekil 4.13	Akma bölgesinin detaylı görüntüsü.....	56
Şekil 4.14	Sönümlenen enerji bölgesi.....	58
Şekil 4.15	3 Boyutlu model için hesaplamalı sonuçların deneysel sonuçlar ile kıyaslanması.....	60
Şekil 4.16	Üç boyutlu modelde eş değer gerilme dağılımı.....	60
Şekil 4.17	Kesit alınmış üç boyutlu modeldeki eş değer gerilme dağılımı.....	61
Şekil 4.18	2 Boyutlu model için hesaplamalı sonuçların deneysel sonuçlar ile kıyaslanması.....	61
Şekil 4.19	15 mm deplasman uygulanmış iki boyutlu modelde eş değer gerilme dağılımı.....	62
Şekil 4.20	30 mm deplasman uygulanmış iki boyutlu modelde eş değer gerilme dağılımı.....	62
Şekil 4.21	Hesaplamalı sonuçların deneysel sonuçlar ile kıyaslanması.....	63

ÇİZELGELER DİZİNİ**SAYFA**

Çizelge 2.1 AlSi7 ve AlSi12 metalik köpük alaşımlarının farklı yoğunluklardaki basma mukavemetleri.....	13
Çizelge 2.2 Farklı kompozisyonlara sahip nikel esaslı köpük malzemelerin mekanik özellikleri ve gözenek boyutları.....	16
Çizelge 2.3 Alüminyum köpük metallerin ısı özellikleri.....	
Çizelge 3.1 Kütle ve yoğunluk değerleri.....	38
Çizelge 3.2 JEOL / JSM-6335F ayrıntılı özellikleri.....	48
Çizelge 4.1 Deneysel kuvvet – basma (mm) değerleri.....	52
Çizelge 4.2 Gerilme ve şekil değiştirme değerleri.....	55
Çizelge 4.3 AlSi12 için yoğunluk ve elastisite değerleri.....	64
Çizelge 4.4 Farklı kompozisyonlara sahip malzemelerin basma mukavemetleri.	65

1. GİRİŞ

Otomotiv sektöründeki rekabet ve çok hızlı bir şekilde devam eden yarış üreticileri farklı arayışlara itmektedir. Teknolojinin ve bilimin her geçen gün otomotiv sektörüne daha fazla girmesi ürünlerin kalitesini de arttırmaktadır. Bu durumun ışığında, malzeme bilimi çok önemli bir yer kaplamaktadır. Farklı özelliklere sahip malzemelerin uygun kullanım alanlarıyla birleştirilmesi üreticilerin çoğunlukla tercih ettiği yol olarak görünmektedir.

Otomobil üreticilerinin belki de en çok güvenliğe önem vermektedirler. Bir taşıtın maliyeti ve buna bağlı olarak güvenlik sınırları kullanılan malzemenin kalitesine göre değişmektedir. Bu nedenle, son yıllardaki alüminyum ve alaşımlarının kullanımı hızlı bir şekilde artmaktadır.

Bu değişim otomobil üzerinde kendisini önemli bir şekilde hissettirmektedir. Otomobil karoserinde güvenlik amaçlı kullanılan çelik malzemeler yerlerini alüminyum malzemelere bırakmaktadır. Otomobillerde bulunan pasif güvenlik sistemleri hem maliyet hem de ağırlık açısından üreticilere ek bir yük getirmektedir. Bu nedenle pasif güvenlik olarak tabir edilen 5-15 km/saat hızlarda, güvenliği sağlayan çelik parçalar yerine Al esaslı köpük malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır. Köpük malzemenin getirmiş olduğu hafiflik ve üst düzeydeki enerji sönmüleyebilme yeteneği üreticilerin ilgisini bir anda bu yöne çekmiştir. Alman otomobil üreticisi Audi yeni A8 modelinde, bu malzemeyi tampon altlarında ve kapı aralarında darbe kutucukları olarak kullanmış toplamda 100-150 kilogram civarında bir tasarruf sağlamıştır.

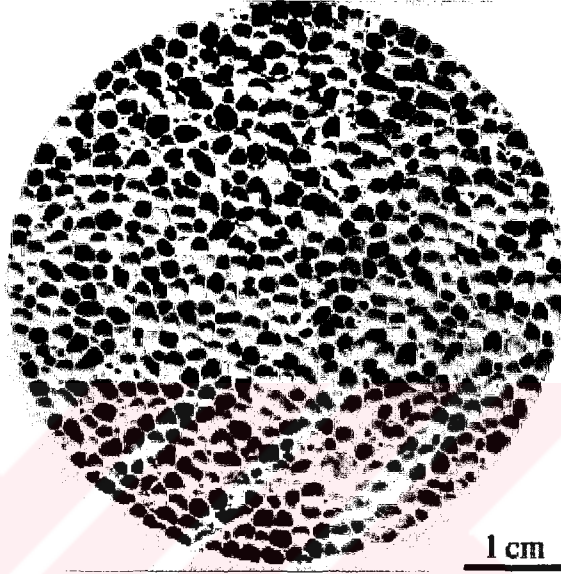
Alüminyum esaslı köpük metaller, patentlerinin ilk alındığı zamanlardan beri uzun yıllar üretim zorlukları ve maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle ticari anlamda üretime geçirilememiştir. Bu malzemeler üretildikleri ilk zamanlarda kullanım alanlarının bu denli geniş olacağı tahmin edilmemesi ve tekrar üretilmemeleri sebebiyle göz ardı edilmişlerdir. Ayrıca mekanik özelliklerinin tayinine yönelik yapılması gerekli testlerle ilgili prosedür ve bilgi eksiklikleri, köpük metallerin günümüzde bile halen gizemli malzemeler olması sonucunu doğurmuştur.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında Al esaslı köpük malzemelerin basma mukavemeti incelenmiş ve analiz yöntemleri kullanarak karşılaştırılmıştır. Deney numuneleri, Almanya'da bulunan Fraunhofer Institute tarafından sağlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Al VE Ni ESASLI KÖPÜK METALİNİN KULLANIM ALANLARI

Hafif sayılan (düşük yoğunluklu) metal alaşımlarının endüstride en çok aranan ve üzerine yatırım yapılan bir araştırma dalı haline gelmesi köpük metallerin kullanım alanlarını artırmaktadır. Şekil 2.1’ de bir alüminyum köpük metali görülmektedir .

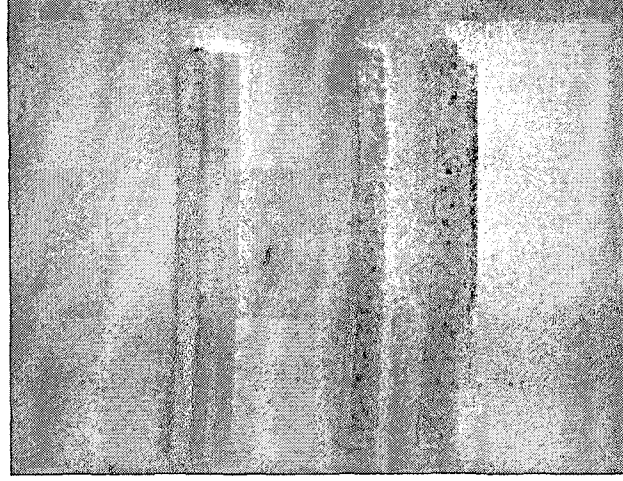


Şekil 2.1. Alüminyum esaslı köpük malzeme (FENG ve ark. 2002)

Özellikle yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve kabul edilebilir üretim maliyetlerine ulaşılması otomotiv sektöründe köpük metallerin potansiyel kullanım sahalarını genişletmiştir .

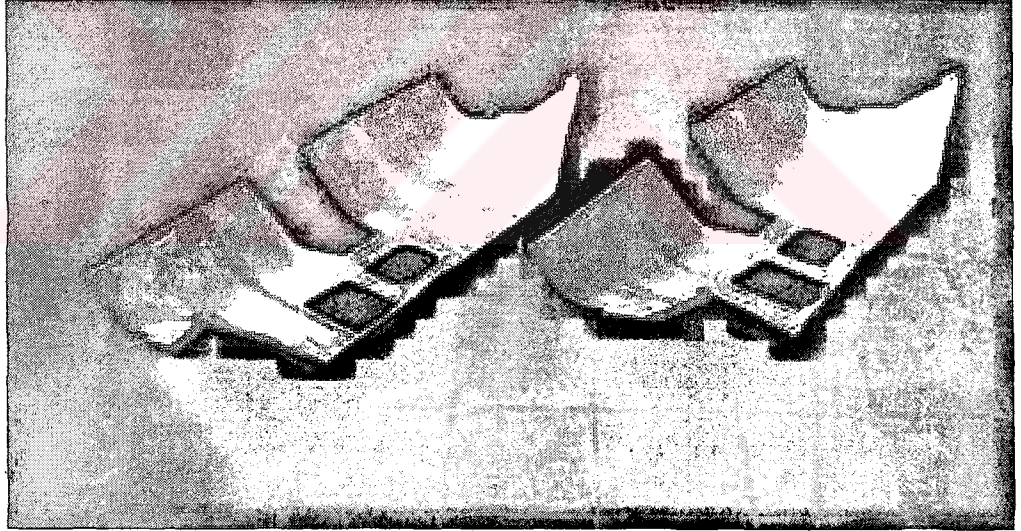
Kendine has özellikleri göz önüne alındığında metalik köpük malzemeler darbe enerjisini sönmüleme amaçlı kullanılan malzemelerdir. Köpük tipine (toz metalürjisi ile veya sıvı metal halinden üretilmiş), alaşımlandırılmasına ve yoğunluğuna bağlı olarak enerji sönmüleme özellikleri değişebilir. Bu özellik büyük çaptaki otomobil üreticilerinin ilgisini çekmiştir.

Bu bağlamda, Avusturyalı bir otomobil üreticisi olan Steyr Daimler Puch tarafından sürdürülen test çalışmaları örnek olarak gösterilebilir. Bir otomobilde bulunan ve malzemesi çelik alaşım olan A-sütununun yerine Al köpük esaslı malzeme yerleştirerek tavan darbe testleri uygulanmıştır. Al köpük esaslı A-sütunu şekil 2.2’ de görülmektedir.



Şekil 2.2. Al köpük esaslı A-sütunu (DEGISCHER ve KRISZT 2002).

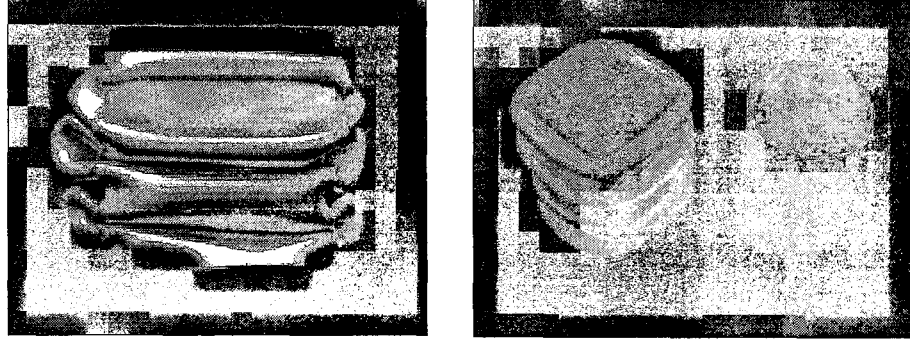
Diğer bir güçlü otomobil markası olan Opel'in 1995 yılında LKR firmasına yaptırmış olduğu ön paneller başka bir örnek olarak sunulabilir. Boyutları, yaklaşık 1400 mm X 500 mm olan köpük malzeme paneller şekil 2.3'de görülmektedir



Şekil 2.3. Al köpük esaslı ön paneller (DEGISCHER ve KRISZT 2002).

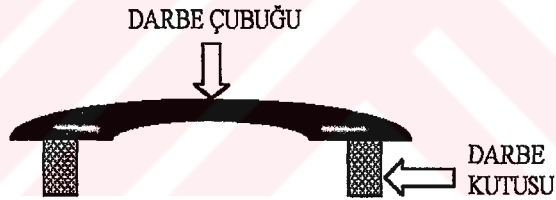
Son zamanlarda basma ve çekme gerilmesi altında köpük malzemelerin davranışları, yorulma ve enerji sönmleme özelliklerinin tayinine yönelik test tekniklerinin geliştirilmesi, bu yapıların daha yakından tanınmasına olanak vermiştir. Üstün darbe sönmleme özellikleri ve hafiflikleri göz önünde bulundurulduğunda köpük

metaller önemli avantajlar sağlamaktadır. Basma testi uygulanmış darbe kutuları şekil 2.4' de görülmektedir.



Şekil 2.4. Çeşitli darbe kutuları (CYMAT)

Çarpma kutuları, otomobilin ön tarafında orta hızlarda oluşan hasarı absorbe edebilmek amaçlı kullanılmaktadır. Darbe çubuğunun altında bulunan bu kutular Avrupa' da geniş bir kullanım alanına sahiptir. Basitleştirilmiş bir darbe çubuğu ve çarpışma kutuları şekil 2.5' de görülmektedir

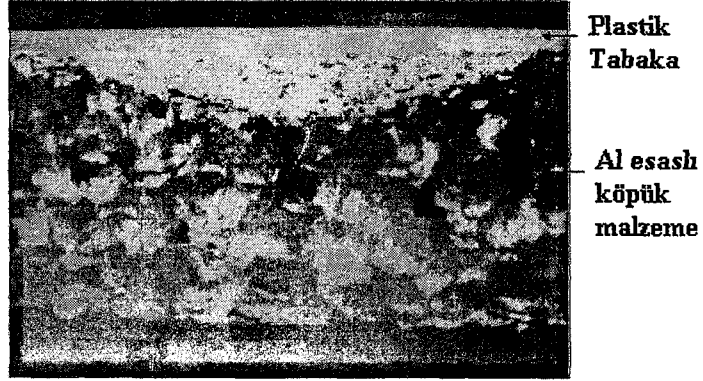


Şekil 2.5. Basitleştirilmiş darbe çubuğu (CYMAT)

Otomobil kapılarında, bagaj ve kaput kapaklarının dış yüzeylerinde Al esaslı köpük malzemenin kullanılabilmesi, gelecekte araştırılması gereken önemli konulardan biridir. Otomotiv sanayiindeki kullanım alanları ve seri üretim göz önünde bulundurulduğunda bu uygulama maliyet açısından bir kazanç sağlayabilir (CYMAT).

Uygulamanın geçerliliği, köpük malzemenin yüzey kalitesini iyileştirmekle bağlantılıdır. Otomobilin kaput kapağının dış yüzeyi Al esaslı köpük malzemeden oluşturulduğunda, herhangi bir iç yüzeye gerek kalmadan aynı mukavemeti sağlayabilir. Böylece üretim ve bakım maliyetleri çelik malzemeye kıyasla daha aşağılara çekilebilir (DEGISCHER ve KRISZT 2002). Bu amaçla yapılmış çalışmalarda Al esaslı köpük malzeme üzerine plastik esaslı ince bir tabaka yerleştirilmiş ve 40 km/saat hızla çarpma

gerçekleştirilmiştir. Yapının darbeyi ve hasarı sorunsuz bir şekilde sönümlediği gözlenmiştir (CYMAT). Şekil 2.6’da çarpma testi sonucundaki durum görülebilir.

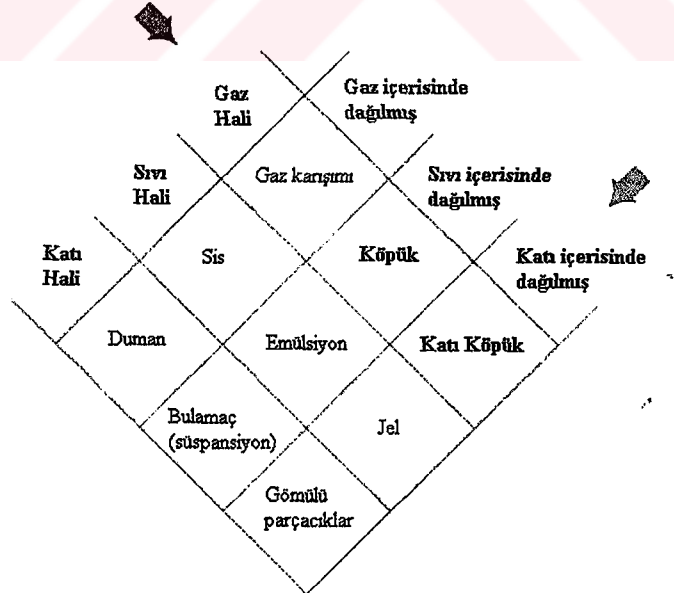


Şekil 2.6. Çarpma sonucunda oluşan yapı (CYMAT)

Isıl özelliklerinin, elektrik geçirgenliklerinin belirlenmesi, ses sönümlenme ve akustik karakteristiklerinin çıkartılması, bu malzemelerin başka kullanım alanları bulmalarına olanak sağlayacaktır (CYMAT).

2.2 ÜRETİM YÖNTEMLERİ

“Köpük” sözcüğü çok sık kullanılmayan ve bu nedenle tanımlanmaya ihtiyaç duyulan bir kelime olarak karşımıza çıkmaktadır

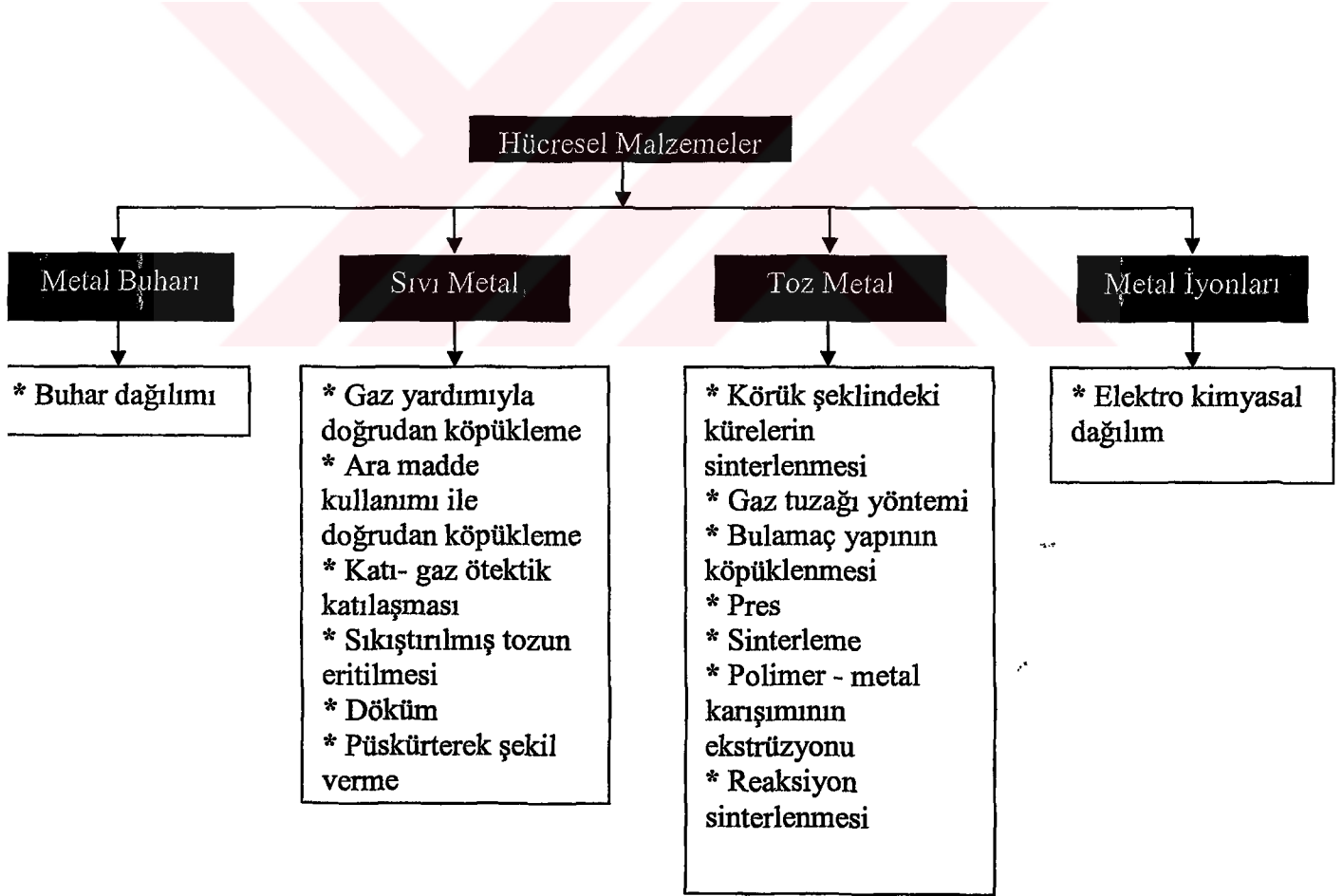


Şekil 2.7. Bir fazdan ikinci bir faza geçişteki dağılım (BANHART 2000)

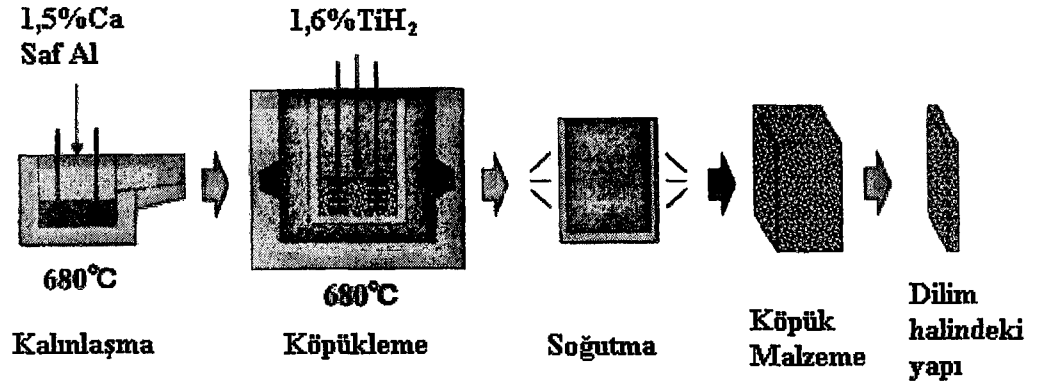
Bir fazdan diğer bir faza geçerken mümkün olan bütün dağılımların sıralandığı Şekil 2.7'ye göre köpük malzemeler gaz fazından gelen düzenli bir dağılımı katı ya da sıvı halde göstermektedirler.

Orijinal anlamı göz önünde bulundurulduğunda köpük: Bir sıvı içerisinde gaz baloncuklarının dağılmasıyla oluşmaktadır. Bu yapılarda sıvı katılaşmasına izin verilerek köpük morfolojisi korunmuştur. Sonuçta oluşan yapı "Katı Köpük" halini almıştır. Al esaslı yada Nikel esaslı köpük malzeme diye bahsedilen malzemeler de aslında katı köpük yapılarıdır.

Köpük yapıların üretiminde bir çok çeşitli yol izlenebilir. Bazı metotlar sulu ya da polimerik sıvıların köpüklenmesinde kullanılanlara benzerdir. Bunların yanı sıra malzemenin karakteristik özelliklerinin ve avantajlı olduğu noktaların vurgulanması için uygulanan metotlar da mevcuttur. Şekil 2.8' de görülmekte olan bu değişik metotlar metalin faz durumuna göre sınıflandırılabilir.



Şekil 2.8. Hüresel metalik malzemeler için üretim yöntemlerinin şeması (BANHART 2000)



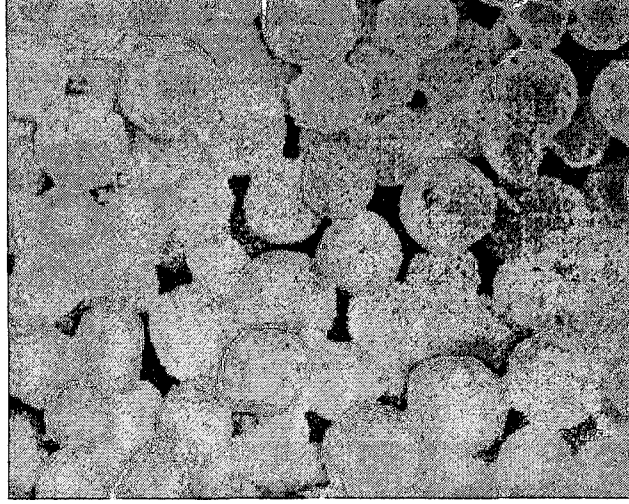
Şekil 2.10. Ara elemanlar ile doğrudan köpükleme işlemi (BANHART 2000)

Bu yöntemde kalsiyum metali, 680°C sıcaklıkta ergiyik saf alüminyum metalinin içine katılır. Asıl köpük üretimi için ağırlıkça %1,5-3 kalsiyum eklenir. Oluşan ergiyik, kalsiyum oksit (CaO) veya yapıyı katılaştıran kalsiyum alüminyum oksit (CaAl_2O_4) oluşumu sebebiyle viskozitesi faktör 5'e yükselene kadar birkaç dakika karıştırılır. Viskozitenin istenilen değere ulaşmasından sonra, sıcak viskoz sıvı içerisine hidrojen gazını serbest bırakarak ara eleman gibi görev yapmasını sağlayan titanyum hidrür (TiH_2) eklenir. Daha sonra ergiyik malzeme yavaş bir şekilde genişlemeye başlar ve köpükleme kabını doldurur. Soğuma işlemiyle sıvı haldeki alüminyum katı halde alüminyum esaslı köpük malzeme halini alır.

2.2.2 Toz Halindeki Katı Metalden Üretim

Günümüzde, metal esaslı gözenekli ürünler bir çok farklı uygulama alanında seri üretimle üretilmektedir. Uygulama alanlarında çok farklı ve çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik ve bronz ticari açıdan en fazla kullanılan malzemeler olmasına rağmen, titanyum ya da süperalaşım da kullanılmaktadır.

Bu üretim çeşitliliği içerisinde, serbest doldurma (loose pack) ve ağırlık sinterlemesi (gravity sintering) bronz malzeme (Cu89Sn11) için en çok tercih edilen yöntemlerdir. Sinterleme sıcaklığı 820°C civarındadır ve yapının mukavemeti oldukça düşük iken bu sıcaklık değerinde % 20 ila 50 arasında gözenekli yapı elde edilebilir. Benzer bir yapıdaki malzeme şekil 2.11'de görülebilir.



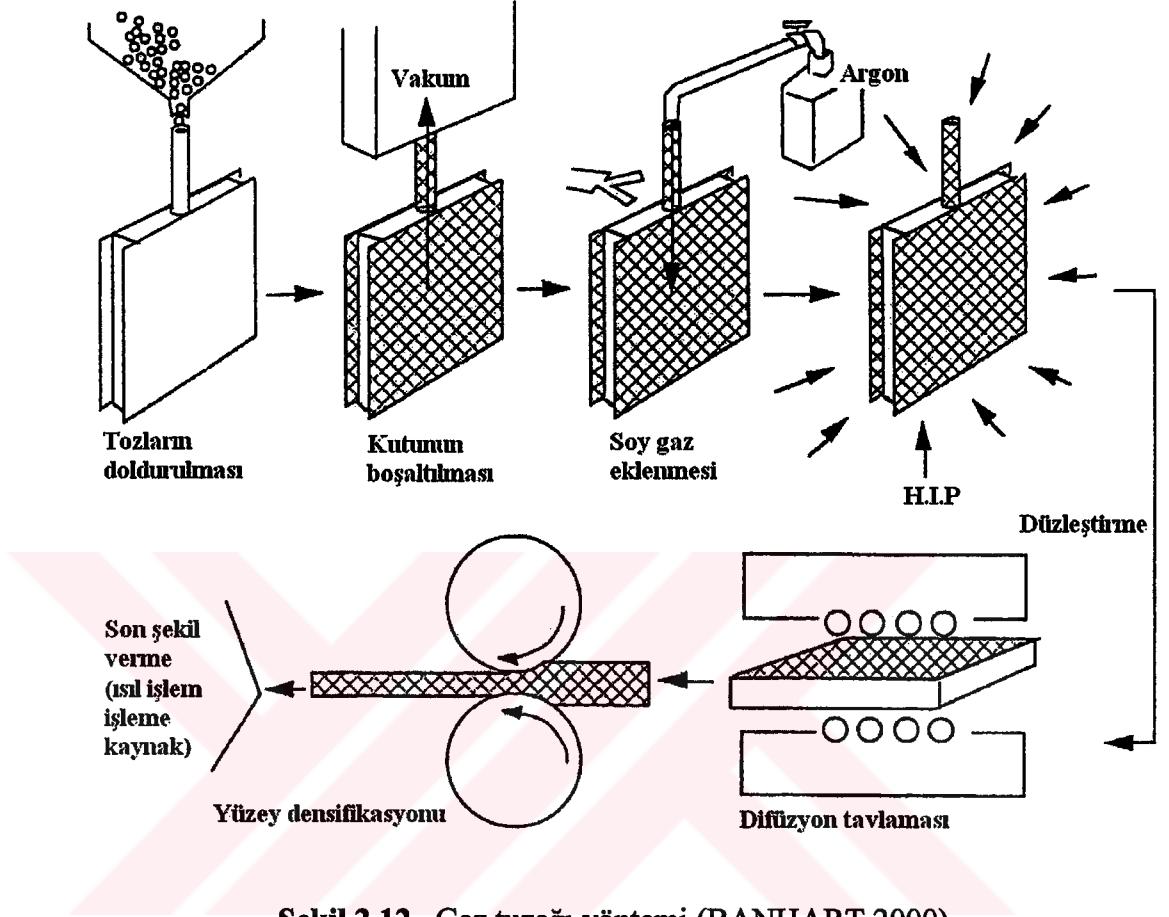
Şekil 2.11. 100µm boyutunda bronz parçacıklarıyla sinterlenmiş gözenekli yapı (BANHART 2000)

Alüminyum alaşım tozları ya da granülleri kullanılarak gözenekli metal malzeme oluşturmak biraz daha zordur. Çünkü alüminyum, parçacıkların birbirleriyle sinterlenmesini engelleyecek yoğun bir oksit tabakasıyla kaplanır. Bu sorundan kaçınmak için, presleme işlemi sırasında, tozların ya da granüllerin karışımı oksit tabakasını kırmak için deforme edilebilir. Böylece parçacıklar arasında metalik bağlar oluşturulabilir. Diğer bir çözüm olarak sinterleme işlemi sırasında bakır, silisyum ya da magnezyum tozları gibi yardımcı malzemeler katılabilir. Bu yardımcı elemanlar, 595 - 625°C sinterleme sıcaklıklarında ergiyik özelliklere sahip bir ötektik alaşım oluşturur.

Gözenekli metaller, ara bir eleman kullanmadan ya da ergiyik metal elde etmeden de üretilebilir. Bunun için, metal tozları yoğun bir öncü malzeme ile sıkıştırılır. İşlem sırasında, oluşan gazın malzeme içerisinde kapalı kalmasına izin verilir. İkinci adımda öncü malzeme ısıtılarak metal genişmesi (parça içerisinde sıkışan gazın yarattığı iç basınçla) sağlanır. Genleşme katı halde gerçekleşir ve bu nedenle gerçek bir köpükleme işlemi değildir. Daha çok katı haldeki bir sürtünme prosesidir.

Bu metot uçak üreticisi Boeing (USA) tarafından gözenekli titanyum yapıların üretilmesinde kullanılmaktadır. Şekil 2.12'de üretim şematik olarak görülmektedir. İlk olarak, titanyum tozları boşaltılmış kutu içerisine doldurulur. Daha sonra 3-5 atm

basınç altında argon gazı ile doldurulur. Metal kutu sızdırmazlığı sağlamak amacıyla kapatılır, yüksek sıcaklık ve basınç altında basma işlemi uygulanır.



Şekil 2.12. Gaz tuzağı yöntemi (BANHART 2000)

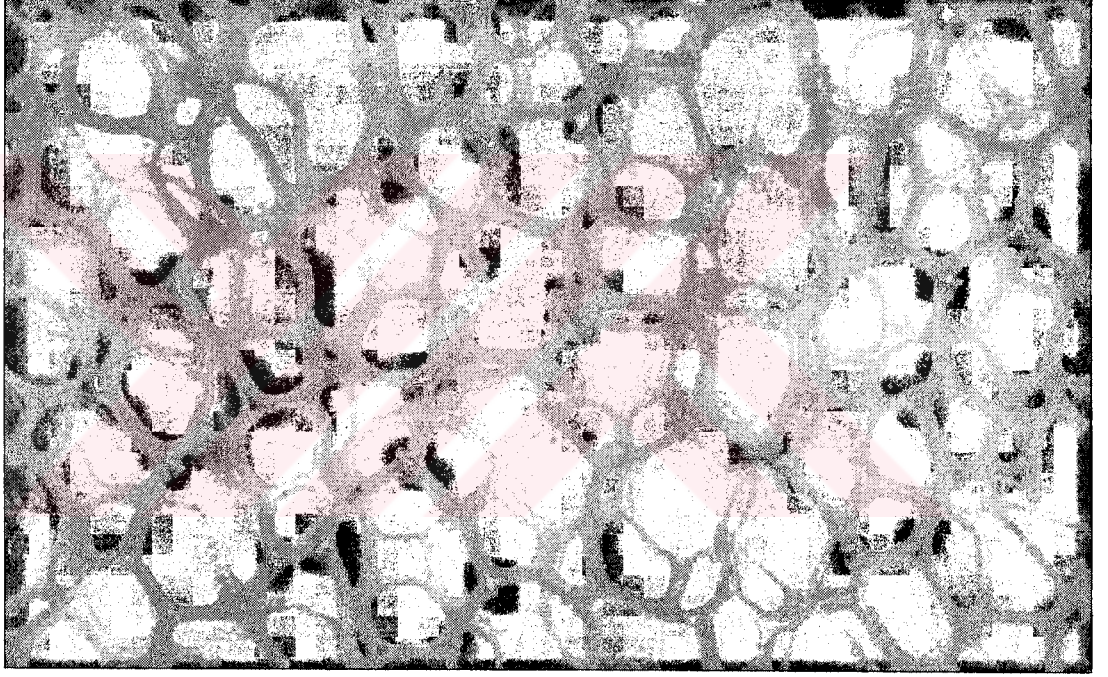
Böylece argon gazı sıkışır ve düzgün bir şekilde dağılmış yapı oluşturur. Yoğun halde bulunan bu malzemeye gerçek gözenekli şeklini vermek için uygun olan tavlama yöntemlerinden biri kullanılır. Tavlama işlemi 6 – 24 saat arası bir süre alır (BANHART 2000).

2.2.3. Metal Buharı ve Gaz Halinden Üretim

Metallik köpük malzemeler gaz halindeki metallardan veya gaz halindeki metallik parçalardan üretilir. Üretim başlangıcında köpük yapının geometrisini tanımlayabilecek katı bir öncü yapıya ihtiyaç vardır. Poliüretan köpüğü ya da kafes şeklindeki polimer malzemelerin öncü yapıları örnek olarak kullanılabilir. İşlemin devamında kullanılacak metal buharı bir vakum çemberinde oluşturulur ve öncü

malzemenin üzerine yoğuşurma amaçlı gönderilir. Yoğuşmuş metal polimer öncü malzemenin dış yüzeyini kaplar. Buharın yoğunluğu ve oluşma zamanı ile tanımlanabilen belirli bir kalınlıkta film tabakası oluşur.

Bu prosesin devamında takip edilecek bir yol da ark buharı dağılımıdır. Nikel karbonil oluşumunu izleyerek Ni esaslı köpük malzeme üretimi düşük sıcaklıklarda verimli bir işlemdir. Aynı metot izlenerek dış yüzeyindeki tabaka kimyasal veya ısı ile işlemlerle kaldırılabilir. Aynı malzemedan başka bir tabaka ile kaplanabilir. Şekil 2.13 görülen bu Nikel esaslı köpük malzemenin “Incofoam” adında ticari bir ismi bulunmaktadır (BANHART 2000).

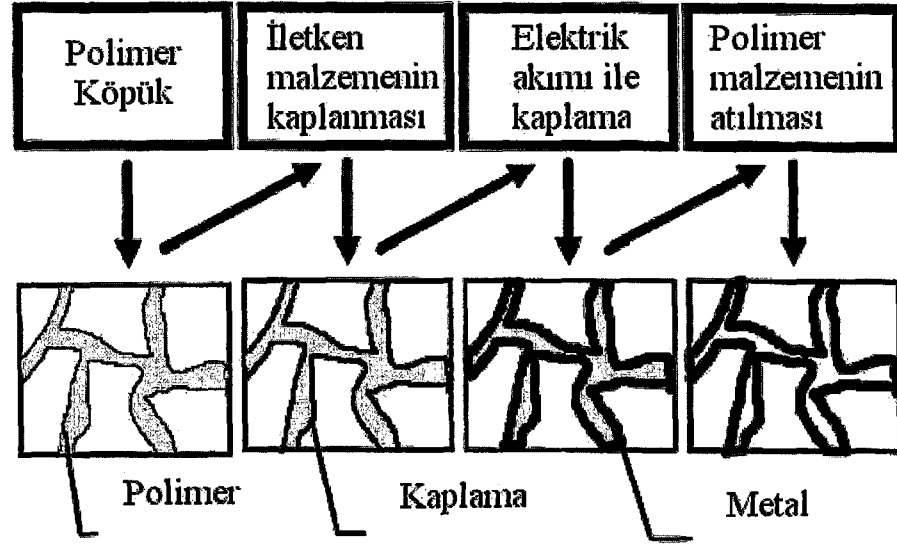


Şekil 2.13. Nikel Karbonil prosesi ile üretilmiş bir “Incofoam” (BANHART 2000)

2.2.4. Metal İyon Çözeltisinden Üretim

Depozisyon yöntemi metallerin iyon halinden başlamaktadır (elektrolit sıvı içerisindeki iyonlar örnek gösterilebilir). Metal yapı elektrik kuvvetiyle açık hücreler şeklinde polimerik köpük malzeme üzerine çöker. Yöntemin şematik gösterimi şekil 2.14’de verilmiştir.

Bu yöntem için polimer köpük malzemenin elektriksel iletken olması gerekmektedir. İletkenlik, polimer köpük malzemeyi elektrik iletkenliği bulunan bir bulamaç içerisine daldırarak sağlanır (BANHART 2000).

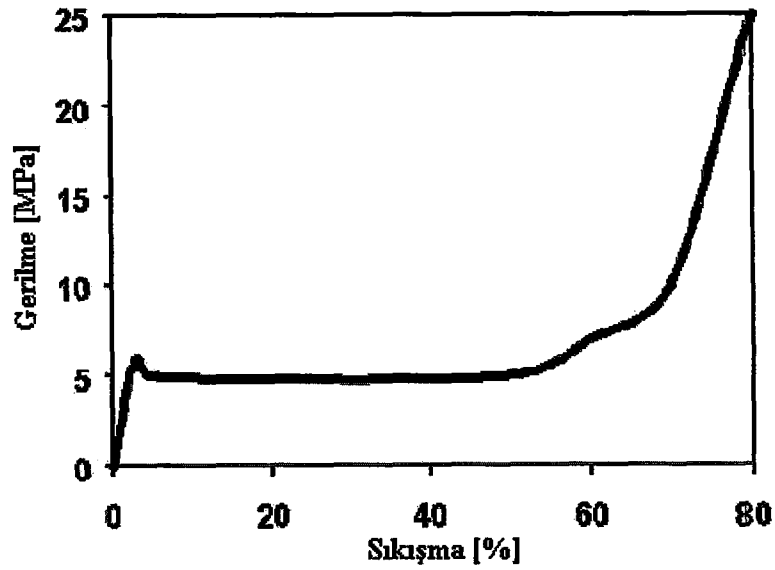


Şekil 2.14. Elektro-depozisyon tekniği ile metal esaslı köpük malzeme üretimi (BANHART 2000)

2.3 MEKANİK ÖZELLİKLER

2.3.1 Basma Dayanımı

Metalik köpük yapıların basma mukavemeti metal yapılara kıyasla farklı bir davranış gösterir. Basma kuvvetine maruz kalan bölgelerde metalik köpük yapının davranışını Şekil 2.15'deki diyagram çok iyi özetlemektedir.



Şekil 2.15. Metalik Köpük yapının basma kuvveti altındaki davranışı (Fraunhofer)

Grafikten de görüldüğü gibi maksimum kuvvet, basma mukavemetinde gözle görülür bir düşüş sağlamaz. Belli bir sıkıştırma oranından sonra yüksek sıkıştırma oranlarına kadar basma gerilmesi sabit kalır. Son olarak gerilme, malzemedeki aşırı yoğunluk artışı sebebiyle artar.

Çizelge 2.1. AlSi7 ve AlSi12 metalik köpük alaşımlarının farklı yoğunluklardaki basma mukavemetleri (Fraunhofer)

Malzeme	AlSi7	AlSi12	AlMg1Si
Yoğunluk (g/cm ³)	Basma Mukavemeti (MPa)		
0,5	7,9	13,9	14,3
0,6	11,9	18,8	22,0
0,7	16,9	24,3	31,8
0,8	22,8	30,2	43,6

Çizelge 2.1'deki değerler aşağıdaki (1) eşitliği yardımıyla ve deneysel sonuçlar esas alınarak elde edilmiştir;

$$\sigma_{basma / köpük} = C_{basma} \times \left(\frac{\rho_{köpük}}{\rho_{katı}} \right)^n \quad 1,5 \leq n \leq 2,5 \quad [2.1]$$

Burada;

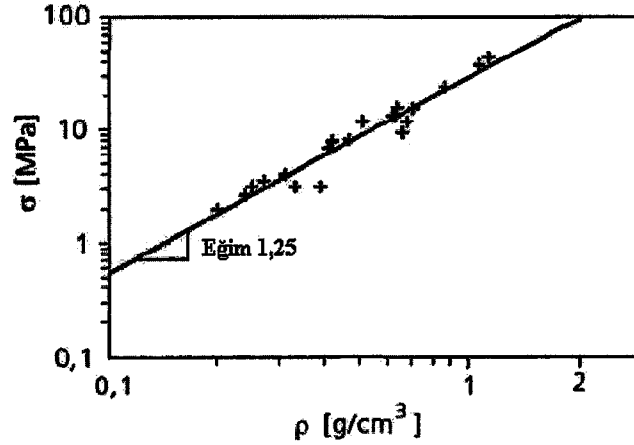
$\sigma_{basma / köpük}$ \Rightarrow Köpük Yapının basma gerilmesi

C_{basma} \Rightarrow Basma sabiti

$\rho_{köpük}$ \Rightarrow Köpük malzemenin yoğunluğu

$\rho_{katı}$ \Rightarrow Katı malzemenin yoğunluğu, şeklindedir.

(1) numaralı eşitlik kullanılarak çeşitli basma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Hesaplanan değerlerin test sonuçlarına yakın olduğu Şekil 2.16.'daki grafikte görülebilir (Fraunhofer).



Şekil 2.16. AlSi12 metalik köpük malzeme için basma gerilmesi – yoğunluk değişimi (%20 lineer küçülme) (Fraunhofer)

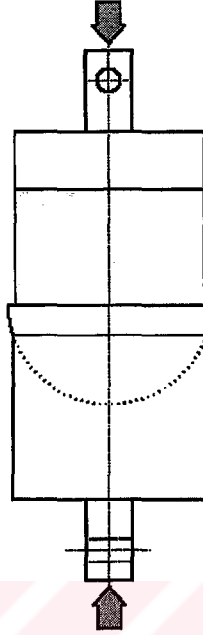
Al-köpük metallerin basma davranışları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. HANSEN ve ark. (2002) Al esaslı köpük malzemelerin çarpma davranışını inceledikleri makalelerinde şekil 2.15'e benzer bir grafik elde etmiş ve yorumlamışlardır. Basma dayanımı altında kalan parçanın yüksek şekil değiştirme değerlerine kadar makul bir gerilme artışı göstermesi ve devam eden yükleme sonucunda gözenekli yapının sıkışmasıyla oluşan yapıyı incelemişlerdir

Fraunhofer Institute 'de uygulandığı gibi YU ve ark. (2002) köpük malzeme esaslı bir bloğun basma testi sonucunda oluşan gerilme – şekil değiştirme grafiğini 3 bölgede incelemişlerdir. Bu üç bölgeyi düşük şekil değiştirmelerin olduğu ilk bölüm, şekil değiştirmenin arttığı fakat gerilmenin sabit kaldığı ikinci bölüm ve yüksek şekil değiştirmenin dolayısıyla parçalanmaların gerçekleştiği üçüncü bölüm olarak incelemişlerdir. RUAN ve ark. (2002) ise elde ettikleri grafiği dört bölgede incelemişlerdir. Yu ve arkadaşlarından farklı olarak akma noktasını da dikkate almışlardır .

Diğer bir araştırmacı BURMAN (1998) Gözenekli Rijit Plastik Yapıların Basma Testi (ASTM D1621-73) standardını kullanarak çalışmalarını sürdürmüştür. Şekil 2.17'de Magnus Burman' ın kullandığı deney tesisatı şematik olarak görülmektedir.

ÖCHSNER ve LAMPRECHT (2002) de yaptıkları eş eksenli basma testinde benzer deney tesisatını kullanmışlardır. Basma testi çerçevesinde yapının morfolojisini

(geometri, açık veya kapalı hücre), gözenek boyutunu ve yoğunluğu en önemli yapısal parametreler olarak göstermişlerdir.



Şekil 2.17. ASTM D1621-73 Eksenel simetrik basma testi (BURMAN 1998)

PAPADAPULOS ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada sıvı metal halden üretilmiş bir Al esaslı köpük malzemenin geleneksel basma testiyle mekanik özelliklerini ve numunenin elektron mikroskobu altındaki yapısını incelemişlerdir.

Köpük malzemelerin basma özelliklerinin yanı sıra çekme yükü altındaki davranışı da bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. LIU (2004) nikel esaslı köpük malzemeler üzerinde yaptığı çekme deneylerinde, deney numunesindeki uzamanın gözenek boyutuyla olan değişimini incelemiştir. Çalışmasının sonunda, katı malzemeler ile köpük malzemelerin arasındaki kırılma mekanizmasının farklı olduğunu vurgulamıştır.

Malzemenin sahip olduğu bileşim basma davranışı açısından çok önemlidir. HAYES ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada %56,5Ni %12,5Co %22Cr ve %9Mo kompozisyonuna sahip nikel esaslı köpük malzeme kullanmışlardır. Çizelge 2.2’de görülen değerlerin alüminyum esaslı köpük malzemelere kıyasla yüksek oluşunda yapıdaki krom ve molibden katkısının etkisi büyüktür. Gözenek boyutunun yaklaşık aynı olması ve dağılımının düzenli oluşu yapının basma davranışını olumlu yönde etkilemiştir.

Çizelge 2.2 Farklı kompozisyonlara sahip nikel esaslı köpük malzemelerin mekanik özellikleri ve gözenek boyutları

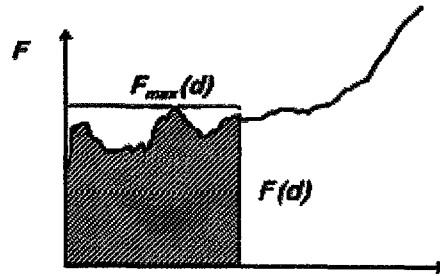
Malzeme	Akma Mukavemeti [MPa]	Elastisite Modülü [MPa]	Gözenek Boyutu [mm]
18Ni(200)	1310 - 1550	181	-
18Ni(350)	2427	194	-
DRM 18Ni(200)	1150	224	0,01 - 0,03
DRM 18Ni(350)	1600	160	0,005 - 0,03
DRM Düşük-Mo(HT1)	1200	1150	0,015 - 0,03
DRM Düşük-Mo(HT2)	1225	1175	0,01 - 0,02

2.3.2 Enerji Sönümlenmesi

Otomotiv endüstrisinde metalik köpük yapılar çoğunlukla enerji sönümleyebilecekleri yerlerde kullanılmaktadırlar. Bu malzemeler 20 km/saat hızlara kadar çıkabilen çarpışmalarda taşıtın ön aksamına gelecek hasarı elimine ederler. Yönden bağımsız darbelerde körük kesitli yapılara kıyasla daha verimlidirler.

Darbe enerjisini sönümlemek için metalik köpük yapıdaki darbe-kutuları (crash-box) ön tampon altına koyulmaktadır. Mekanik yapıları sebebiyle ön-arka fark etmeksizin tasarım özgürlüğü sağlamaktadırlar. Metalik köpük malzemelerin enerji sönümlenmesi basma testi ile hesaplanabilir.

Absorbe edilmiş enerji miktarı, basma mesafesine bağlı olarak basma kuvvetinin integralidir. Şekil 2.18'de kuvvet-basma mesafesi grafiği görülmektedir.

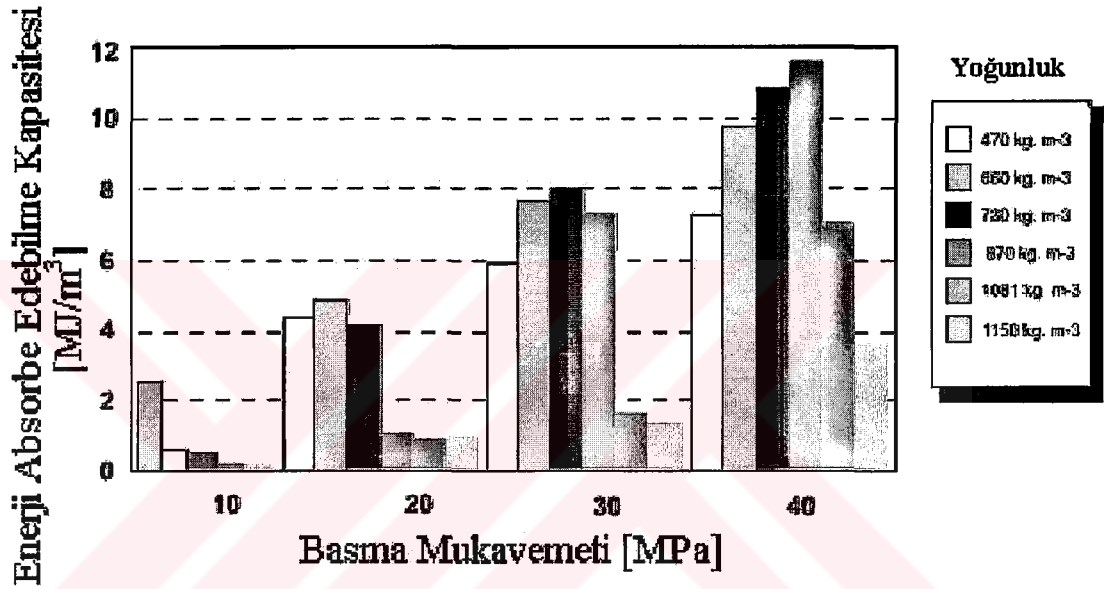


$$\text{Enerji} \Rightarrow E(d) = \int_0^d F(x) dx = \text{Area under the curve}$$

Şekil 2.18. Enerji sönümlenme özelliği (Fraunhofer v1.6)

Metalik köpük malzemeler, darbe enerjisini sönümleyen diğer yapılara kıyasla fazla miktarda darbe enerjisini nispeten düşük gerilme değerlerinde absorbe ederler. Bu özellik, insanları ve kırılabilir yapıları ani darbe etkisinden korumaktadır. Hasara sebep olan en yüksek kuvveti, korunmak istenen kısım üzerinde tutarak darbe sonucunda absorbe edilen enerjiyi plastik deformasyon enerjisine dönüştürürler.

Örnek olarak AlSi12 metalik köpük alaşımının enerji sönümleyebilme kapasitesi Şekil 2.19'da görülebilir (ALULIGHT).



Şekil 2.19. AlSi12 metalik köpük alaşımının farklı yoğunluklardaki enerji sönümleyebilme kapasitesi (ALULIGHT).

Metalik Köpük malzemeler yolcu güvenliğini sağlayan araba parçalarında (ayrıca yan darbelere karşı koruma işlemlerinde), emniyet yastığı olarak asansör veya konveyör sistemlerinde, yüksek hızlarla çalışan makine parçalarında koruyucu kapak olarak darbe emici amaçlı kullanılmaktadırlar (Fraunhofer).

Darbeyi yönden bağımsız bir şekilde sönümlemesi diğer bir çok araştırmacı tarafından da değerlendirilmiştir. KRETZ ve ark (2002) Al esaslı köpük malzemeyi bir arabanın A sütununda kullanmışlar ve üstten darbe testi uygulamışlardır. Test sonucunda, parçanın kuvvetli bir enerji sönümleme özelliğinin olduğu ancak önemli ölçüde malzemenin içerdiği alaşım elementine bağlı olduğu ortaya çıkmıştır.

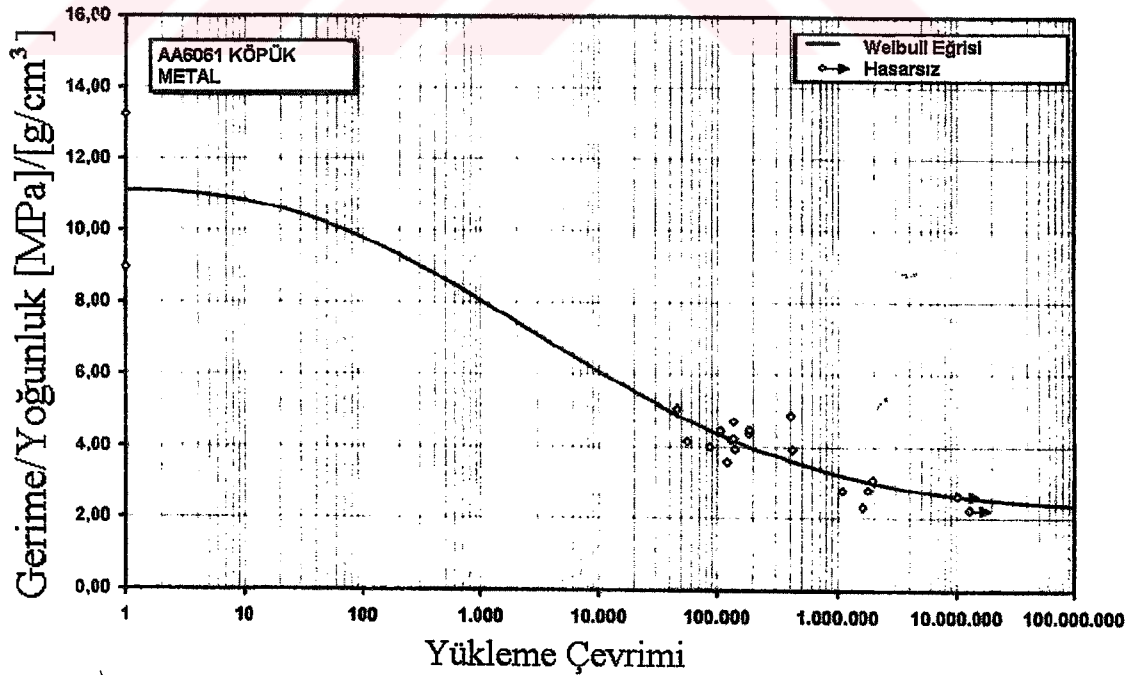
Kapalı hücre Al köpük malzemelerin enerji sönümleme özelliği, araştırmacıların ilgisini hücre boyutu ve hücre duvarı kalınlığı gibi parametrelere kaydırmıştır.

MIYOSHI ve ark. (1999), hücre duvarının kalınlığı arttırıldığında (1,91 mm'den 2,68 mm'ye) birim hacim başına elde edilen enerji sönümlenme miktarının %40 arttığını elde etmişlerdir.

ALPORAS (Japonya bulunan Shinko adlı bir tel firmasının ürettiği kapalı hücre köpük malzemenin ticari ismi) üzerinde çalışma yapan KUMAR ve ark (2002), düz ve küresel tabanlı ıstampalar kullanarak köpük malzemenin enerji sönümlenmesini incelemişlerdir. 30 mm kalınlığındaki ıstampalar parça yüzeyinden içeriye doğru bastırılmış, deformasyon miktarı ve basma hızı dikkate alınarak bir grafik oluşturulmuştur.

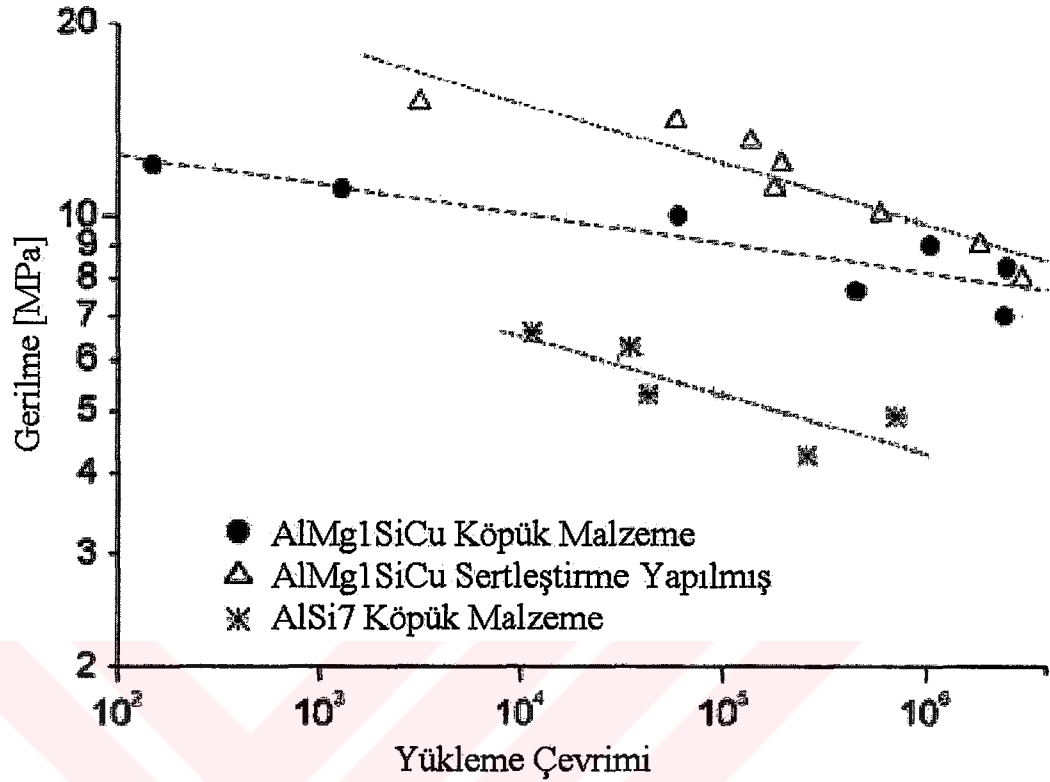
2.3.3 Yorulma

Yorulma, en genel anlamıyla malzemelerin tekrarlı yüklemeler etkisiyle hasara uğraması ve kullanılamaz duruma gelmesidir (SURESH 1991). S-N eğrisinin elde edilmesine yönelik kullanılan Gerilme-Ömür (Stres-Life) yöntemi genelde düşük yüklemeye çevrimlerinde hasara uğrayan parçalar için kullanılmaktadır (TAUSCHER 1983). AlMg1SiCu (6061) köpük alaşımı için yapılan basma-çekme yorulma testinden elde edilen S-N eğrisi Şekil 2.20'de görülmektedir. Burada yüklemeye çevrimine karşılık gerilmenin yoğunluğa oranı şeklinde grafik çizilmiştir (SCHULTZ ve ark. 1999).



Şekil 2.20. 6061 Al alaşımı için S-N Eğrisi (SCHULTZ ve ark. 1999).

Silindirik köpük metal numuneler üzerinde ölçümler sonucunda elde edilen S-N eğrileri şekil 2.21’de görülmektedir (LEHMUS ve ark. 2002).



Şekil 2.21. Farklı alaşım tipleri ve özelliklerine göre S-N eğrilerinin karşılaştırılması (LEHMUS ve ark. 2002)

Burada alaşım elementlerinin ve mekanik özellikleri iyileştirmeye yönelik işlemlerin yorulma ömrüne olumlu etkilerini de görmek mümkün olmaktadır. Bu işlemler ve alaşımlandırma ile yorulma ömrü 10^3 çevrimden 10^6 , 10^7 mertebelerine çıkarılmaktadır (Fraunhofer).

Al esaslı köpük malzemelerin yorulma dayanımı diğer araştırmacılar tarafından da incelenmiştir. Farklı yoğunluklar altında köpük malzemelerin (AlMg0.6Si0.3, AlMg1Si0.6 ve AlSi12) 10^4 ile 10^9 çevrim arasında kırıldığını elde etmişlerdir. Yorulma dayanımı 1,1 – 1,4 MPa civarında, %16 – 23 düzlem gerilmenin (yükleme sırasında gerilmenin sabit kalıp yer değiştirmenin devam ettiği evre) görüldüğü kısımda elde edilmiştir (ZETTL ve ark. 2000).

2.3.4 Isı Transferi

Alüminyum köpük malzemelerde sadece küçük bir kısım (gözenek duvarlarının kesiti) katıdır. Malzeme içerisindeki hacmin büyük bir çoğunluğu ise (herhangi bir Al alaşımına kıyasla) düşük ısı iletkenliğe sahip gazla doludur. Köpük yapının yoğunluğu gözenek duvarlarının boşluklara oranı olarak verildiğinden metal köpük yapının ısı iletkenliği herhangi bir katı malzemeye kıyasla düşüktür.

Alüminyum köpük malzemelerin yoğunluğa bağlı olarak ısı iletim katsayıları ve özgül ısıları çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Alüminyum köpük metallerin ısı özellikleri (Fraunhofer).

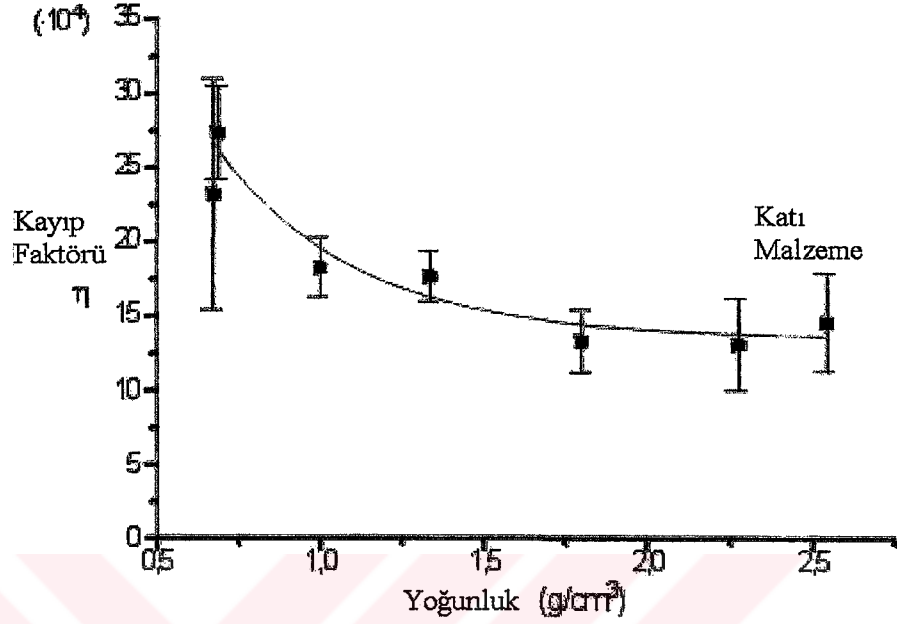
Özellikler	AlSi7	AlSi7	AlSi12
Yoğunluk [g/cm ³]	0,55	0,63	0,6
Isıl İletim Katsayısı [W/mK]	6,1 (50°C) 6,9 (100°C) 7,7 (200°C)	7,8 (50°C) 8,8 (100°C) 9,8 (200°C)	16,7 - -
Özgül Isı [kJ/kg.K]	0,9	0,9	0,88
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /K)	-	-	19,9-20,6

Al esaslı köpük malzemelerin ısı transferi özelliği diğer mekanik özellikleri gibi başka araştırmacılar tarafından da incelenmiştir. BOSMA ve ark (2003) yaptıkları çalışmada Ni esaslı köpük malzeme kullanmışlardır. Yapı üzerine termoakustik dalgalar göndererek, gözenekliliğin azalmasıyla nusselt katsayısında çok küçük bir artışa sebep olduğunu, kalınlığın 1,6 mm' den 1,4 mm' ye düşürülmesiyle nusselt katsayısının 2 katına çıktığını gözlemlemişlerdir. COX ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada sıvı haldeki metal esaslı köpük malzemenin katılaşmasını ve ortaya çıkan ısı transferi problemlerini incelemişlerdir.

2.3.5 Akustik Özellikler

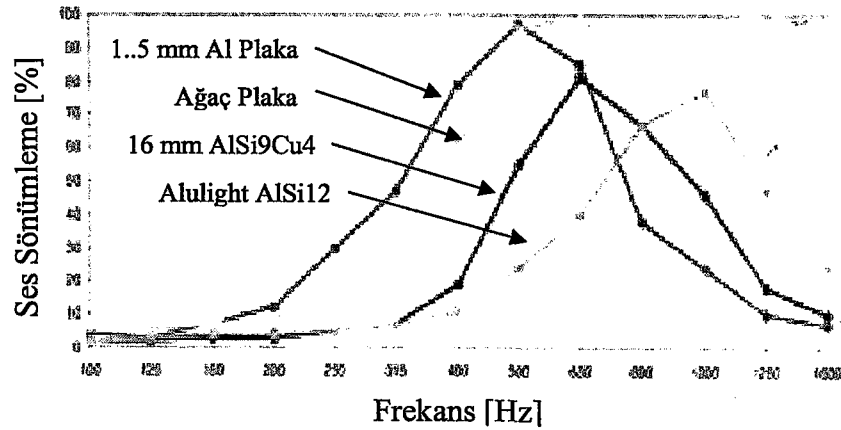
Katı metallere karşılaştırıldığında köpük yapılar mekanik titreşim sönümlemede olduğu gibi ses enerjisini sönümlemede de iyi özellikler göstermektedirler (Fraunhofer). Mekanik titreşimler neticesinde oluşan mekanik enerjiden açığa çıkan ses için kayıp

kayıp faktörü η , alüminyum köpük metalinin yoğunluğuna bağlı olarak şekil 2.22’de görülmektedir.



Şekil 2.22. AlSi12 köpük metali için farklı yoğunluk değerlerinde ses kayıp faktörleri (ALULIGHT)

Alüminyum yoğunluğunun azalması ile kayıp faktörü artmaktadır. Bu da bize yoğunluk artışının belli değerlerine kadar ses enerjisinin daha iyi sönümlendiğini göstermektedir. Alüminyum köpük metalinin ses sönümleme özelliği Şekil 2.23.’de görülen diğer malzemelerle karşılaştırıldığında birbirine çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir (ALULIGHT).



Şekil 2.23. Farklı malzemeler için ses sönümleme yüzdeleri (ALULIGHT).

Bu malzeme yukarıda belirtilen özelliklerinden dolayı;

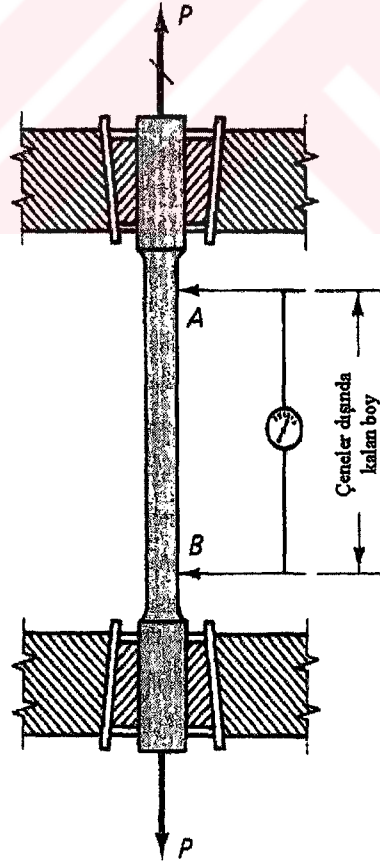
- Yüksek sıcaklık, tozlu ve çamurlu, gaz akış ortamlarında ses sönümleyici olarak,
- Uçaklar gibi yanmaya karşı yüksek dirençli alanlarda ses sönümleyici olarak kullanılmaktadır.

2.4 GENEL MUKAVEMET HESAPLAMALARI

2.4.1 Gerilme – Şekil Değiştirme Arasındaki İlişki

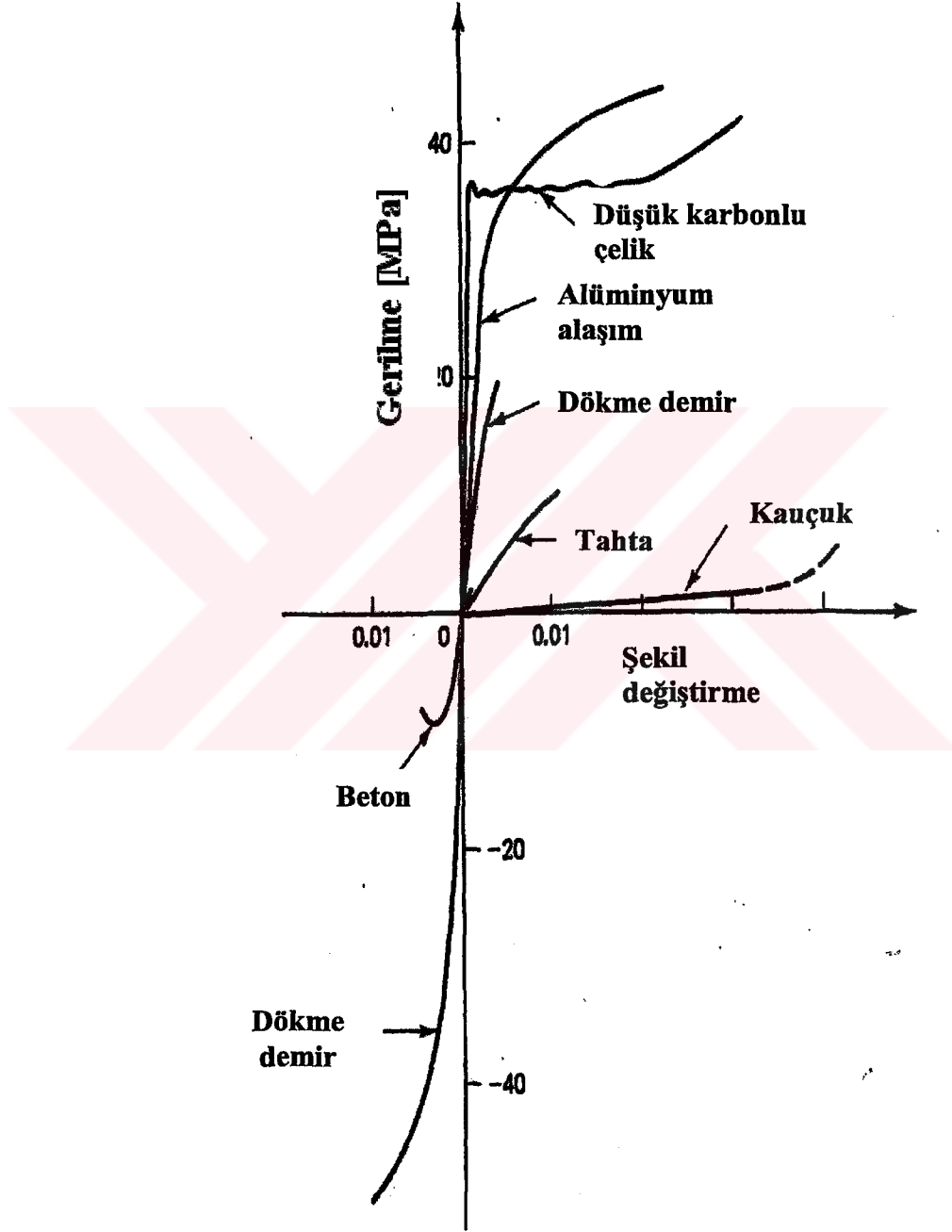
Katı cisimler mekaniğinde, gerçek malzemelerin yükleme altındaki davranışı önemlidir. Çekme ya da basma testleri bu davranış hakkında temel bir bilgi edinilmesini sağlar. Deney numunesinin uygulanan yüke karşı toplamda göstermiş olduğu cevap, kuvvetin deformasyona bağlı dağılımı olarak elde edilir.

Gerilme, numunenin kesit alanına bağlı olarak uygulanmış kuvvetten daha önemlidir. Bu nedenle, malzemelerin mekanik davranışının incelendiği deneylerde gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilir. Bu grafikler, deney numunesinin boyutu ve iki çene arasında kalan uzunluktan bağımsız olacak şekilde elde edilir (şekil 2.24).



Şekil 2.24. Test makinesine bağlı bir çekme numunesi (POPOV 1990)

Farklı tipteki malzemeler için yine farklı tipte gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilebilir. Aynı malzeme için yapılan testlerde bile, test koşullarındaki sıcaklığa, test hızına ve başka değişkenlere bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilebilir. Bazı malzemelerden elde edilmiş gerilme-şekil değiştirme grafikleri şekil 2.25'de görülmektedir.



Şekil 2.25. Farklı malzeme tipleri için gerilme-şekil değiştirme grafikleri (POPOV 1990).

2.5 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

2.5.1 Giriş

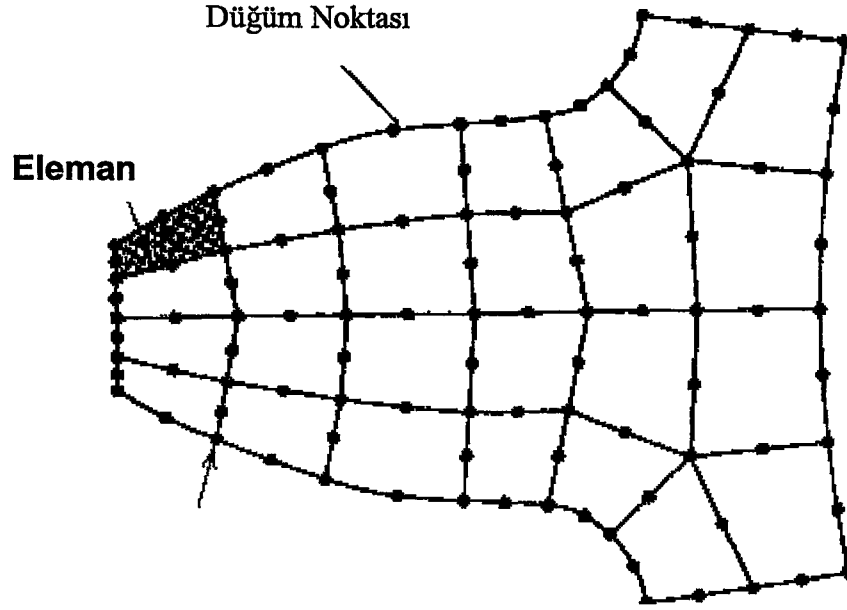
Sonlu elemanlar metodunun temeli mühendisler tarafından atılmış ve geliştirilmiştir. Metot ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda bir büyüklük alanının hesaplanması istenmektedir. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme alanı; ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akısı; akışkan problemlerinde ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur.

Sonlu elemanlar metodunda tüm yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan bir çok elemana bölünür. Şekil 2.26'da görüldüğü gibi elemanlar "nod" adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde bir denklem takımı elde edilir (ANSYS Theory Manual 1999). Gerilme analizinde bu denklemler nodlardaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunda temel fikir sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile temsil etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin deplasmanın) değeri o elemanın nodlarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler nodlardaki değerlerdir. Belirli bir prensip (örneğin; enerjinin minimum olması prensibi) kullanılarak büyüklük alanının nodlardaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi;

$$[K] \cdot [D] = [R] \quad [2.2]$$

şeklindedir. Burada [D] büyüklük alanının nodlardaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, [R] bilinen yük vektörü ve [K] ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde [K] rijitlik matrisi olarak bilinmektedir.



Şekil 2.26. Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanlar.

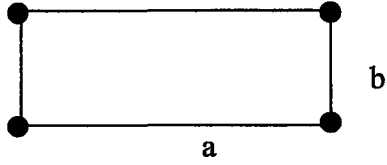
2.5.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanarak Modelleme

2.5.2.1 Genel Modelleme

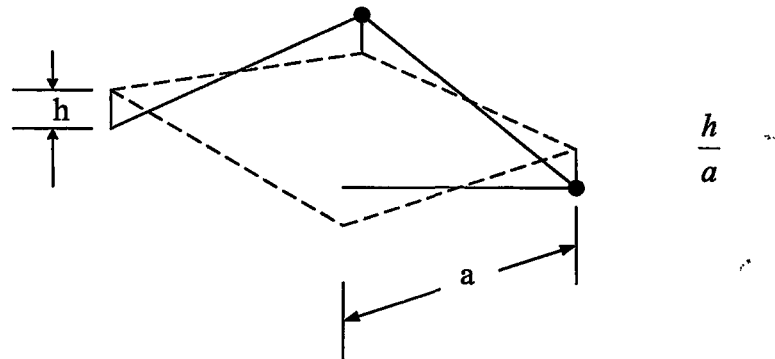
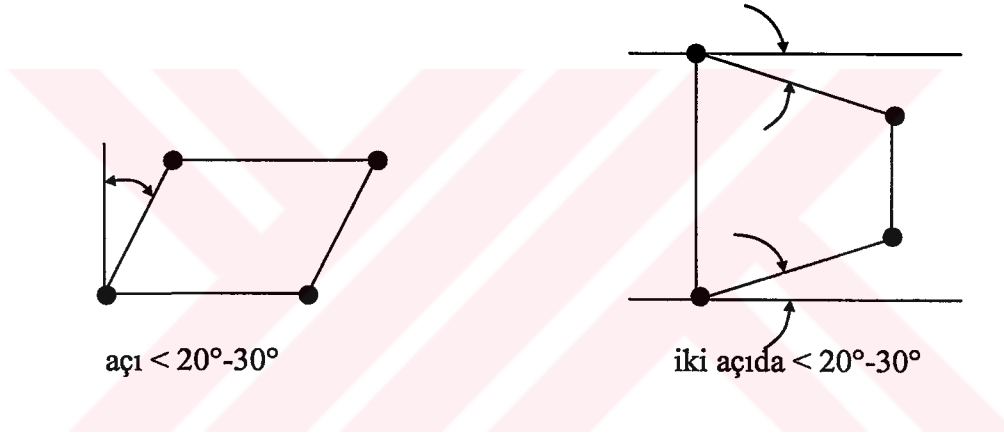
Modelleme, bir fiziksel yapı veya sürecin analitik veya sayısal olarak yeniden inşa edilmesidir. Sonlu elemanlar metodunda modelleme basit bir nod ve elemanlardan oluşan ağ yapısı hazırlamak değildir. Problemi gerekli şekilde modelleyebilmek için gerekli sayı ve tipteki elemana karar vermek ancak problemin fiziğinin iyi şekilde anlaşılmasıyla mümkündür.

Kötü şekil verilmiş elemanlar ile hesaplanması istenilen büyüklüğün hesaplama alanı içindeki değişimini yansıtamayacak kadar büyük boyutlu elemanlar modellemede istenmez. Şekil 2.27'de elemanlarda genelde izin verilebilecek geometrik biçim bozukluklarının seviyesi gösterilmektedir. Diğer yandan zaman ve bilgisayar olanaklarını boş yere harcamamıza neden olacak, gereğinden fazla sayıda elemanlardan oluşan bir modelleme de istenmemektedir. Hesaplanması istenilen büyüklüğü ve hesaplama alanı içindeki değişimini yeterli doğrulukta verecek kadar sıklıkta bir eleman dağılımına ihtiyaç vardır. Örneğin Şekil 2.28'de silindirik yüzeylerin modellenmesi için 4 nodlu veya 8 nodlu dört kenarlı elemanlar kullanılması durumunda

tipik bir eleman dağılımı gösterilmiştir. Diğer yandan Şekil 2.29'da bir delik etrafında olması gereken tipik eleman dağılımı görülmektedir. Hesaplanan değerlerin kabul edilebilir olup olmadıklarının kontrol edilmesi ayrı bir öneme sahiptir. Dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda kısaca belirtilecektir (ANSYS Theory Manual 1999).

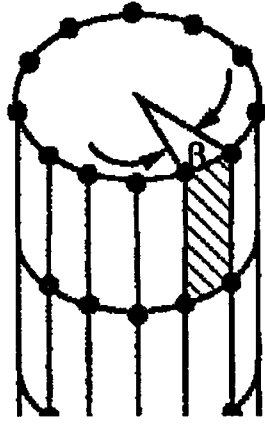


uzunluk oranı a/b için genelde 10:1 oranına kadar izin verilebilir.



genelde h/a oranı %5 den küçük olmalı

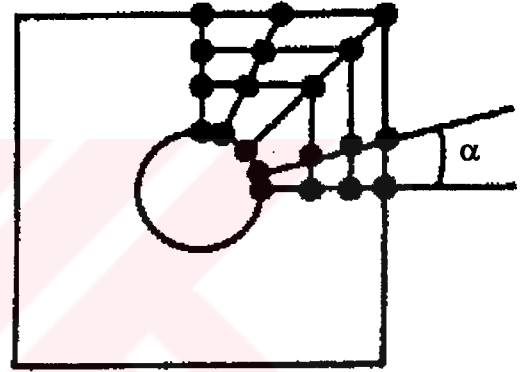
Şekil 2.27. Eleman geometrisinde müsaade edilebilir deformasyonlar



$\beta < 15^\circ$ 4 nodlu dört kenarlı elemanlar için
 $\beta < 30^\circ$ 8 nodlu dörtgen elemanlar

Şekil 2.28. Bir silindirik yüzey etrafındaki tipik eleman dağılımı

$\alpha = 15^\circ$ veya
daha küçük



Şekil 2.29. Bir delikli geometride delik etrafındaki tipik eleman dağılımı

2.5.2.2 Eleman Seçimi

Sonlu elemanlar ile modelleme aşamasında, "eleman tipi (çubuk, kabuk. v.s). eleman şekli (dörtgen, üçgen) ve eleman sayısı ne olmalı?", "ara nodlu elemanlara ihtiyaç var mı?" gibi soruların cevaplanması gerekmektedir. Bu soruların cevabı ancak analiz edilen yapının ve seçilen eleman tiplerinin davranışı hakkında bilgi sahibi olunduktan sonra verilebilir. Örneğin, gerilme analizinde yapının bir bölgesindeki gerilme durumunu en iyi yansıtan eleman tipi o bölge için seçilmelidir. Aşağıda bazı eleman tipleri ve bunların kullanılabileceği mühendislik problem tipleri haklarında bilgi verilmektedir.

3D Kiriş Elemanı

3D Kiriş elemanı genel amaçlı bir sonlu eleman tipi olup 3 boyutlu işlemi yapabilme kapasitesine sahiptir. Bu eleman tipi aynı zamanda uzay kiriş elemanı olarak

da adlandırılmaktadır. Eleman uzayda iki adet nod ile tarif edilmektedir. Üçüncü bir nod ise serbestlik derecesine haiz olmayan ve eleman koordinat sistemini tarif etmek amacıyla kullanılmaktadır. Elemanın iki ucunu tespit eden iki adet nod için 12 adet serbestlik derecesi mevcuttur. Her bir nod 3 adet öteleme ve 3 adet dönme serbestliğine sahiptir. Eleman herhangi doğrultuda gelen kuvvet ve herhangi bir eksen etrafında dönme zorlamasına direnç gösterecek kapasiteye sahiptir. Elemanı tarif etmek için nodların koordinatına, elastisite modülüne (E), kayma modülüne (G), kesit alanına, kesit atalet momenti değerlerine, burulma sabitine (J) ve kiriş eksenine dik doğrultudaki deformasyon faktörlerine ihtiyaç vardır

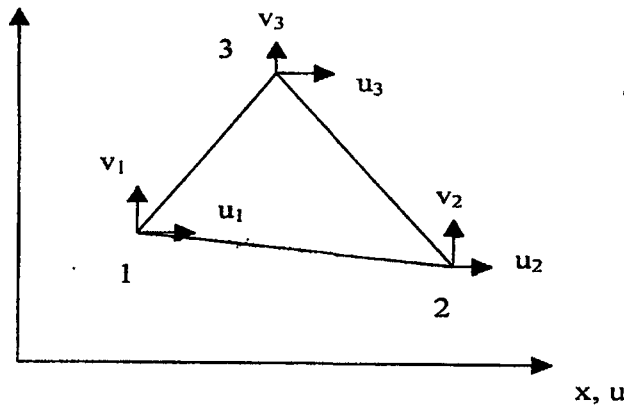
Sabit Gerilmeli Üçgen Eleman (SGU)

SGU elemanı sabit kalınlığı olan, üç nod noktasını birleştiren ve toplam altı serbestlik derecesi ile tarif edilen bir elemandır (Şekil 2.30). Eleman deplasman alanı aşağıdaki gibi tarif edilmektedir.

$$u = a_1 + a_2x + a_3y \quad [2.3]$$

$$v = a_4 + a_5 + a_7y \quad [2.4]$$

Yukarıdaki deplasman bağıntılarından görüldüğü gibi deplasman alanı eleman içinde ve kenarlar boyunca lineerdir. Eleman sınırları içinde ise gerilme değerleri sabittir. Birbirine bağlı elemanlar arasında deplasman uyumluluğu (compatibility), bağlı iki nod noktası arasındaki lineer kenar deformasyon karakteristiği dolayısıyla sağlanmaktadır. Yapının bütün olarak kuvvet dengesi ise nod noktalarında sağlanır (ANSYS Elements Manual 1999).



Şekil 2.30 Sabit Gerilmeli Üçgen Eleman

SGU elemanı sonlu eleman modellerinde küçük gerilme gradyeni karakteristiğine sahip bölgelerde iyi sonuç verecektir. Diğer durumlarda SGU elemanının kullanılması iyi sonuç vermeyecektir. Örneğin sadece eğilmeye maruz bir yapıyı SGU elemanlarıyla modellemek gerçek problem ile uyumsuz sonuçlar verecektir. SGU elemanlarının bu olumsuzlukları, daha sık bir eleman ağ yapısıyla kısmen giderilebilir.

Lineer Gerilmeli Üçgen Eleman(LGU)

LGU elemanları SGU tip elemanların aksine, köşe noktalarına ilaveten kenar orta noktalarında birer adet daha nod noktasına sahiptir. Böylece her bir LGU elemanı 6 adet nod noktasına ve toplam olarak 12 nod serbestlik derecesine sahiptir. Eleman deplasman alanı ise aşağıdaki gibi tarif edilmektedir.

$$u = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 x^2 + a_5 xy + a_6 y^2 \quad [2.5]$$

$$v = a_7 + a_8 x + a_9 y + a_{10} x^2 + a_{11} y + a_{12} y^2 \quad [2.6]$$

SGU elemanının aksine gerilme büyüklüğü LGU elemanı içerisinde x ve y koordinatları ile lineer olarak değişmektedir. Sadece eğilmeye maruz yapılar için LGU elemanlarıyla yapılan modellemelerde, deplasman ve gerilme alanları için çok iyi yaklaşımlar elde edilecektir.

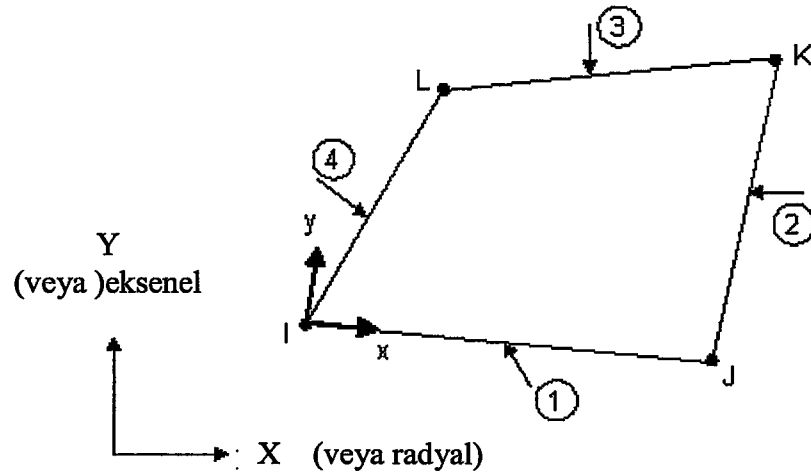
Çifte Lineer Dörtgen Eleman

2 Boyutlu problemler için diğer bir tip eleman, çifte lineer dörtgen elemanlardır. Şekil 2.31'deki elemanın köşelerinde dört adet nod yer almaktadır ve eleman sekiz nodal serbestlik derecesine sahiptir. Diğer yandan 8 nodlu eleman tipi için ise kenarların orta noktalarında dört adet nod vardır. Dört nodlu eleman için deplasman alanı aşağıdaki bağıntılarda verilmiştir.

$$u = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 xy \quad [2.7]$$

$$v = a_5 + a_6 x + a_7 y + a_8 xy \quad [2.8]$$

Burada elemanın çifte lineer diye isimlendirilmesi u ve v deplasman bağıntılarının iki lineer polinomun çarpımından oluşmasından dolayıdır.



Şekil 2.31. Dört Nodlu Çifte Lineer Dörtgen Eleman

Elemanın en önemli özelliği σ_x değeri x - koordinatından bağımsızdır. Bu eleman tipi, örneğin ucundan yüklü konsol kirişlerin modellenmesinde uygun sonuç vermeyecektir (ANSYS Elements Manual 1999).

Kabuk Elemanlar

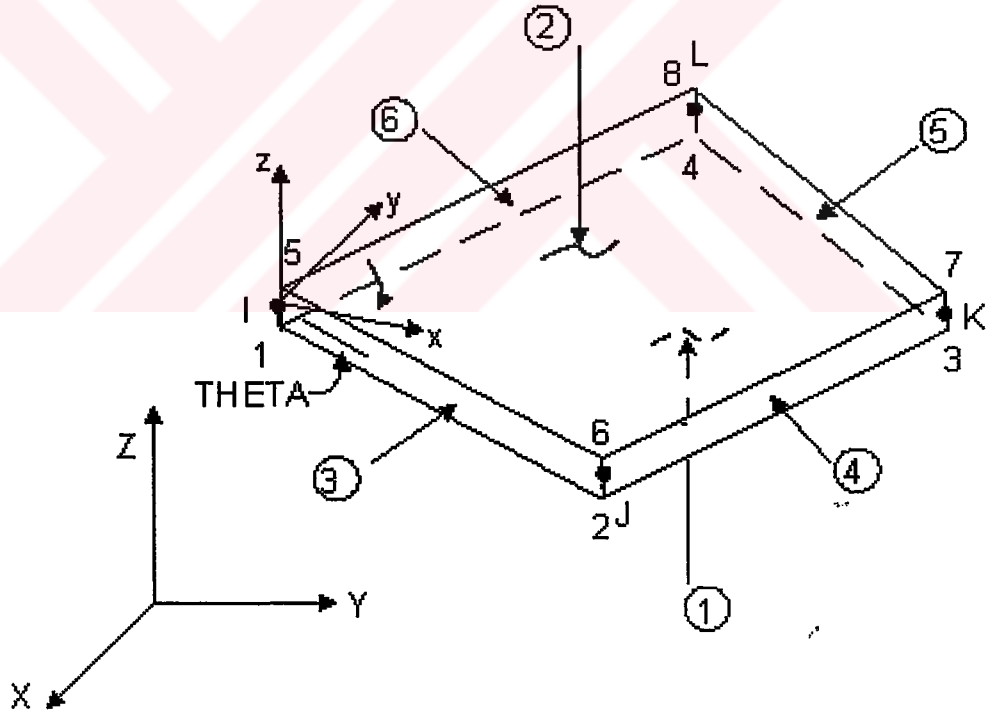
Bir genel kabuk eleman membran ve eğilme etkisini aynı anda temsil edebilmelidir. Örneğin dört nodlu basit bir dörtgen eleman tarif edilebilir. Elemanı tarif eden tüm nodlar aynı düzlem üzerinde olmayabilir. Bu da elemanda çarpılmaya neden olur. Elemanın çarpılması performansını olumsuz yönde etkiler. Ticari paket programlarda küçük miktarlarda çarpılmaya izin vermektedir. Bu dört nodlu elemanın en büyük avantajı formülasyonunun basit olmasıdır. Genellikle az sayıda daha karışık bir eleman tipi kullanılması yerine, daha fazla sayıda basit bir eleman tipi kullanılması tavsiye edilmektedir.

Dört kabuk elemanın en büyük dezavantajı düzgün eğrisel yüzeylerin düzlem elemanlarla veya az miktarda çarpılmış şekle sahip olan elemanla temsil edilmesidir. Kabuk teorisine dayanarak elde edilen eğrisel yüzeyli elemanlar düzlemsel elemanların yaratmış olduğu problemleri ortadan kaldırmaktadır. Fakat diğer yandan beraberinde başka zorlukları getirmektedir. Eğrisel elemanı tarif etmek için çok daha fazla geometrik bilgiye ihtiyacımız olmaktadır. Elemanın formülasyonu ise düzlemsel elemanlara nazaran çok daha zordur (ANSYS Elements Manual 1999).

Dört Nodlu ve Dört Kenarlı Elastik Kabuk Eleman

Çoğu ticari programda yer alan bu eleman tipi eğilme ve membrane yüklerini taşıyabilme özelliğine sahiptir. Eleman düzlemi içinde ve düzlemine dik doğrultudaki yüklemelere müsaade eder. Her nod, üç tanesi x, y, z - doğrultusunda öteleme ve üç tanesi de bu eksenler etrafında dönme serbestliği olmak üzere altı adet serbestlik derecesine sahiptir (şekil 2.32).

Eleman dört nod ile tarif edilmekte ve değişken kalınlığa müsaade edilebilmektedir. Değişken kalınlıklı elemanlar için kalınlık eleman içerisinde düzgün olarak değişmelidir. Bu eleman tipi plakların olduğu kadar düzgün eğrisel yüzeylerin modellenmesinde de kullanılmaktadır. Eğrisel yüzeylerde iyi bir yaklaşım elde edebilmek için fazla sayıda bu elemandan kullanılmalıdır. Formülasyonunun basit olması nedeniyle diğer tip elemanlara göre daha avantajlıdır (ANSYS Elements Manual 1999).



Şekil 2.32. Dört nodlu ve dört kenarlı elastik eleman (x,y eksenleri eleman düzlemi içindedir).

2.5.2.3 Yüklemler ve Sınır Koşulları

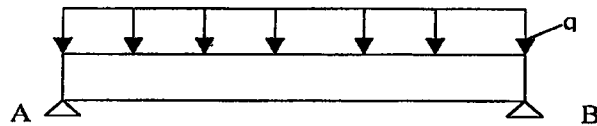
Tekil yükler mutlaka nod noktalarına uygulanmalıdır. Bu nedenle ağ yapısı tekil yüklerin nodal noktalara uygulanmasını sağlayacak şekilde yapılandırılmalıdır. Klasik lineer teoriye göre bir noktaya tekil yük uygulandığı zaman, o noktada;

- Kiriş için sonlu bir deplasman ve gerilme değeri oluşur,
- Levha için sonlu deplasman, sonsuz gerilme değeri oluşur,
- İki veya üç boyutlu geometrik cisim için ise sonsuz deplasman ve gerilme değeri oluşur.

Diğer yandan bir tekil yük malzemede o bölgede akmaya neden olacaktır. Lineer teori ise akmayı modellemez. Sonuç olarak tekil yükler küçük alanlar üzerine dağıtılmış yüksek yoğunluklu yayılı yükler olarak modellenebilir. Eğer tekil yük bir nod noktasına uygulanırsa sonsuz deplasman ve gerilme değerleri hesaplanmaz.

Bir tekil moment sadece öteleme serbestlik derecesine sahip bir noda uygulanamaz. Bu durumda tekil momentler eşlenik kuvvetler olarak temsil edilirler. Diğer yandan yayılı yükler nod noktalarına tekil yükler olarak uygulanırlar.

Sınır koşulları yapıların mekaniğinde mesnet şartları olarak da isimlendirilmektedir. Sonlu eleman modellemelerinde sınır koşulları (mesnet şartları) sık sık yanlış veya eksik olarak tanımlanmaktadır. Modellemede sınır koşullarına gerekli özen daima gösterilmelidir. Her ne kadar yapılan hata küçük gibi görülse de, sonuçlar üzerindeki etkisi oldukça büyük olacaktır. Örneğin şekil 2.33'de görülen ve iki ucu basit mesnetlenmiş kirişin sonlu elemanlar modelinde, elemanlar tarafsız ekseninden geçen çizgi üzerinde yer alırlar. Kiriş parçasının uçlarının yatay doğrultudaki hareketi sınırlandırıldığı için, kiriş bu doğrultuda zorlanmaya maruz kalacaktır. Bu nedenle kirişin sonlu eleman modelinin uçları düşey bağlantılarla A ve B noktalarına bağlanır.



Şekil 2.33. İki ucu basit mesnetli kiriş

Sonlu elemanlar modelinde aktif olmayan serbestlik dereceleri çözüm işleminden önce sınırlandırılmalıdır. Bu sınırlandırılması gereken serbestlik derecesi modelin sınırdaki veya başka bir bölgesinde olabilir. Örneğin düzlem elemanlar nodlarında düzlem içinde iki doğrultudaki ötelemeye karşı direnç gösterirler. Fakat genel amaçlı bir sonlu elemanlar programı her bir noda üçü öteleme ve diğer üçü de dönme olmak üzere altı serbestlik derecesi atayacaktır. Rijidlik matrisinde tekillikleri önlemek amacıyla düzlem elemanlar için her noddaki üç dönme serbestliği ve eleman düzlemine dik doğrultudaki öteleme serbestliği kısıtlanmalıdır. Çünkü seçilen eleman tipi bu serbestlik dereceleri için direnç gösteremeyeceğinden, rijidlik matrisinde tekillikler oluşacak, bu da denklemlerin çözümünü zorlaştıracak veya imkansız hale getirecektir. Doğru bir modelleme için düzlem elemanların her bir nodu için üç serbestlik derecesi atanır. Sınır koşulları için ise yine sınırdaki yer alan nodlar için bu serbestlik derecelerinden bazılarının kısıtlanması gerekebilir.

Bazı durumlarda gerçek problem için sınır koşulları net olarak anlaşılır olmayabilir. Böyle durumlarda çözümün üst ve alt sınırlarını iki ayrı analizle saptamak fiziksel olarak daha anlamlı olabilir. Örneğin iki ucundan mesnetlenmiş uniform yüklü bir kirişin uçları dönmeye belli olmayan bir dereceye kadar kısıtlanmış olabilir. Böyle bir durum için kirişin uçları bir çözüm için basit mesnetli olarak kabul edilir, diğer bir analiz içinse tamamıyla tespit edilmiş olarak kabul edilerek problem çözülür: İki analizden elde edilen değerler aslında gerçek problem için alt ve üst sınırları göstermektedir (ANSYS Structural Analysis Guide 1999)

2.5.2.4 Önemli Noktalar ve Ayrıklaştırma

Bir problemin sonlu elemanlar metoduyla çözümü için kaç adet eleman gereklidir? Böyle bir soruya cevap aramak için aynı problemi iki farklı modelle ayrı ayrı analiz edelim. İkinci analizde daha fazla sayıda eleman ile daha sık bir ağ kullandığımızı farz edelim. İkinci sonlu eleman modeli daha küçük bir ayrıklaştırma hatası verecektir. Ayrıca gerçek fiziksel objenin geometrisi daha iyi modellenmiş olacaktır. Eğer iki analiz neticesinde bulduğumuz sonuçlar arasında önemli bir fark yoksa, sonuçların yakınsamış olduğunu kabul edebiliriz.

Yazılımlarda genelde bir takım hatalar bulunabilir. Sonlu eleman paket programları oldukça büyük yazılımlar olup, devamlı düzeltmeler yapılmaktadır. Elde

edilen hatalı sonuçlar için programı suçlamak kolay bir yol olmasına rağmen, hatalı sonuçlara genelde yanlış modellemeler neden olmaktadır. Doğru modelleme yapabilmek için ayırıştırma esnasında bir takım hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu hususlar aşağıda sıralanmaya çalışılmıştır.

- i. Sonlu elemanlar grid ağının mümkün olduğu kadar üniform olmasına dikkat edilmelidir. Fakat yüklemeye ve yapının davranışında hızlı değişimlerin görüldüğü bölgelerde daha sık bir ağ yapısı için üniformluğun bozulmasına izin verilebilir.
- ii. Dört kenarlı elemanların üçgen elemana göre bir çok avantajı olması nedeniyle, dört kenarlı elemanlar daima üçgen elemanlara tercih edilmelidir. Fakat geometrinin ve/veya yüklemenin üçgen eleman gerektirdiği durumlarda bu kural bozulabilir.
- iii. Deplasman analizi için gerilme analizinde kullanıldığı kadar sık ağ yapısına gerek yoktur.
- iv. Geometride veya malzemede non-lineerliliği hesaba katan analizler için lineer - analizlere kıyasla daha sık bir ağ yapısına ihtiyaç vardır.
- v. Titreşim modlarının hesabı doğal frekansların hesabına kıyasla daha sık ağ yapısı gerektirmektedir.
- vi. Nodların numaralandırılması mümkün olduğu kadar büyük deplasman bölgelerinden küçük deplasman bölgelerine doğru yapılmalıdır. Fakat genelde sonlu eleman paket programlarında sonuçlar numaralandırmadan etkilenmezler
- vii. Eğrisel yüzeylerin düzlemsel elemanlar ile tarif edilmesi durumunda yüzey normali etrafındaki dönme serbestliği kaldırılmalıdır. Aksi takdirde kötü koşullu bir matrisle uğraşılması gerekecektir.
- viii. Elemanların kenar uzunluk oranları (aspect ratio) eleman tipleri arasında değişiklik gösterse de, uzunluk oranı deplasman hesapları için 10'un altında, gerilme hesapları için ise 5'in altında kalmalıdır.
- ix. Yüksek mertebeden elemanlar için ara nodların dağılımı mümkün olduğu kadar uniform olmalıdır

- x. Sonlu eleman hesaplarının ilk kontrolü için yüklerin, kuvvetlerin ve reaksiyonların dengesinin kontrol edilmesi tavsiye edilmektedir.
- xi. Eğer analiz edilen yapı ve yükleme simetrik ise, hesaplamalarda bu avantaj kullanılmalıdır. Yani analiz için yapının yarısı veya dörtte biri modelleme için kullanılabilir. Fakat burkulma ve özdeğer problemlerinde dikkatli olunması gerekir. Çünkü anti-simetrik nodlar bu problemler için önemli olabilir.
- xii. Yüksek frekanslı tepkisel değerlerin önemli olmadığı dinamik analizler için. statik analizde kullanılan benzer bir ağ yapısı yeterli olacaktır.
- xiii. Transient dinamik analizlerde eleman boyu, zaman adımı, integrasyon metodu ve pulse süresi uyumlu olmalıdır.
- xiv. Yüksek uzunluk oranlı dörtgen elemanlar, büyük açılı üçgen eleman gibi elemanlardan mümkün olduğu kadar sakınılması gerekmektedir.
- xv. Yakınsaklık analizinde orijinal mesh kullanılarak ağ sıkılaştırılmalıdır. Eğer farklı bir mesh kullanılırsa yakınsaklık analizine tekrar başlamak gerekecektir.
- xvi. Yüksek ve düşük mertebeden elemanların birbirine bağlanması gerilmelerde düzensizliklere neden olacaktır.
- xvii. Eleman boyutlarında hızlı değişiklikler mümkün olduğu kadar minimize edilmelidir
- xviii. Anisotropik malzemeler için Poisson oranı açıkça tanımlanmalıdır. Ayrıca ν , E ve G değerlerinin teorik limitlerinin aşılmaması kontrol edilmelidir.
- xix. Kompleks yapıların sonlu elemanlar metoduyla analizinde, tüm yapı göreceli olarak kaba bir ağ yapısıyla analiz edilir. Bu analiz sonuçları yapı içinde detaylı bilgi sahibi olmak istediğimiz bölge için sınır koşulu olarak kullanılarak, bu bölge daha sıkı bir ağ yapısı ile analiz edilebilir (ANSYS Elements Manual 1999).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 KULLANILAN MALZEME

Deney numunesi olarak kullanılan Al esaslı köpük malzeme Almanya'daki Fraunhofer Institute tarafından sağlanmıştır. Malzeme içeriği AlSi7'dir. İç yapı oluşturulurken saf alüminyum tozları, %7 saf silisyum ve %0.5 titanyum hidrür ile karıştırılmıştır. Parçanın dış yüzeyi farklı bir malzeme ile kaplanmamıştır. "Köpükleme yüzeyi" diye tabir edilen dış yüzey, numunenin üretimi sırasında yüksek oranda oksitlenme sonucunda kendi malzemesinden oluşur. Deney numunesi, kalıp içerisinde sıvılaştırma sıcaklıklarına yakın bir sıcaklık değerinde iken hava ile soğutulur ve katılaşma sağlanır. Bu işlem haricinde herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır.

Basma deneyleri 40 kN'luk basma kuvvetine sahip olan test cihazında gerçekleştirilmiştir. Zwick 1455 (Ulm, Almanya) basma test cihazı şekil 3.1'de görülmektedir.



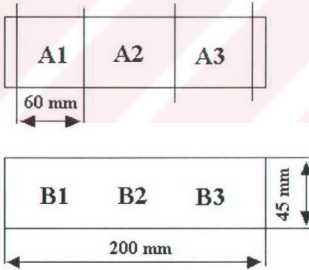
Şekil 3.1. Zwick 1455 test makinesi

Yapılan testler sonucunda deney numuneleri 40 kN basma yüküne maruz bırakılmaktadır. Test sırasındaki parçadaki değişim şekil 3.2’de üç adım halinde görülmektedir.

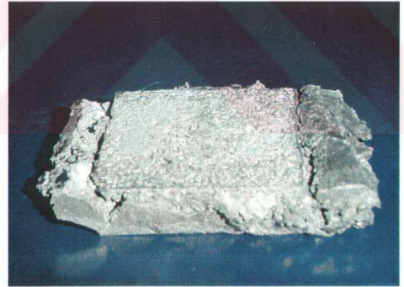


Şekil 3.2. Deney numunesinin basma sırasındaki deformasyonu

Basma testi 2 numunenin 3’e bölünmesiyle elde edilen 6 eşit boyuttaki deney numunesine uygulanmıştır. Şekil 3.3’de deney numunesi, kullanılan test numunelerinin temsili şekli ve şekil 3.4’ de test sonucunda basılmış numune görülmektedir. Test makinesine bağlı olan yazıcıdan kaynaklanan bir aksaklıktan dolayı A1 parçasından kuvvet deformasyon eğrisi elde edilememiştir. Bu nedenle A1 parçasından alınan değerler hesaplama katılmamıştır.



Şekil 3.3. Deney numunesi



Şekil 3.4. Test sonucundaki deney numunesi

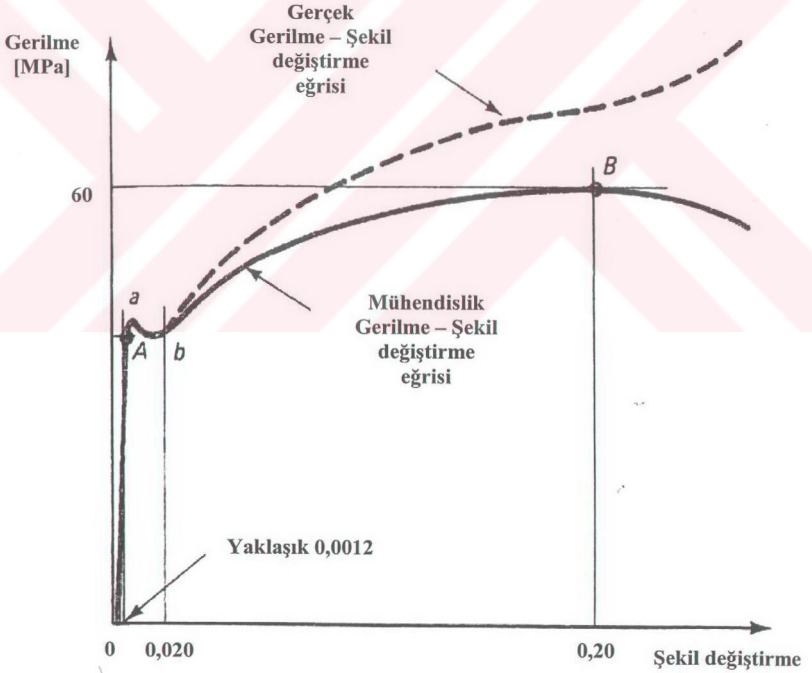
Kullanılan numunelerin bir tanesinin hacmi 125304 mm^3 ’dür. Beş deney numunesinin kütleleri ve yoğunlukları çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1 Kütle ve yoğunluk değerleri

	Kütle [kg]	Yoğunluk [g/cm ³]
A2	0,062	0,49
A3	0,044	0,35
B1	0,048	0,38
B2	0,046	0,37
B3	0,04	0,32
Ort.	0,048	0,38

3.2 MÜHENDİSLİK GERİLMESİ VE GERÇEK GERİLME

Sabit sıcaklıklarda bir çok farklı gerilme – şekil değiştirme grafiği statik testler sonucunda elde edilebilir. Şekil 3.5'deki diyagram yumuşak çeliğin karakteristiklerini göstermektedir.



Şekil 3.5. Yumuşak çelik için gerilme-şekil değiştirme grafikleri (POPOV 1990)

Gerilme değerleri, çoğunlukla deney numunesinin orijinal kesit alanından hesaplanır. Bu şekilde elde edilen gerilmelere Mühendislik Gerilmesi adı verilir. Mühendislik gerilmesi ve şekil değiştirmesi aşağıdaki gibidir:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [3.1]$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [3.2]$$

ε : mühendislik şekil değiştirmesi

σ : mühendislik gerilmesi

L : anlık uzunluk

F : uygulanan yük

L_0 : başlangıç uzunluğu

A_0 : başlangıç kesit alanı

Bu gerilme tipi için orijinal kesit alanı kullanılmasına rağmen deney numunesinde daima enine daralma ya da genişleme meydana gelmektedir. Alüminyum yada yumuşak çelik için özellikle kopma noktasına yakın olan bu etki “boyun verme” diye adlandırılır. Kırılğan malzemeler küçük çekme kuvvetlerinde çok büyük bir enine daralma göstermelerine rağmen alışılmış sıcaklıklarda bu davranışı göstermezler. Test sırasında her noktada uygulanan yükün o anda oluşan kesit alanına bölünmesiyle Gerçek Gerilme elde edilir. Böylece, şekil 3.4’de bulunan gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrisi oluşturulur.

Metallere şekil verme gibi bazı mühendislik uygulamalarında, şekil değiştirme değerleri çok üst değerlere çıkabilmektedir. Bu durumlar için, gerçek şekil değiştirme $\bar{\varepsilon}$ tanımlanmıştır:

$$\bar{\varepsilon} = \int_{L_0}^L dL / L = \ln(L / L_0) = \ln(1 + \varepsilon) \quad [3.3]$$

L : anlık uzunluk

L_0 : başlangıç uzunluğu

ε : mühendislik şekil değiştirmesi

3.2.1 Basma Gerilmesi

Basma gerilmesi çekme gerilmesine benzer şekilde numunenin bir eksenine doğrultusunda etkiyen basma kuvvetlerinin etkisiyle eksene dik kesitte oluşan gerilmedir:

$$\sigma_b = \frac{F}{A} \quad [3.4]$$

σ_b Basma gerilmesi [N/mm²]

F Basma Kuvveti [N]

A Alan [mm²]

İncelenen kesit kuvvete dik değil de α eğimli ise kesitte hem normal hem de kayma gerilmesi oluşur.

$$\text{Normal Gerilme: } \sigma_\alpha = \frac{F}{A} \cos^2 \alpha = \sigma_b \cdot \cos^2 \alpha \quad [3.5]$$

$$\text{Kayma Gerilmesi: } \tau_\alpha = \frac{F}{A} \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \sigma_b \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad [3.6]$$

Cisimler üzerinde yapılan basma deneyi çekme deneyi kadar kolay değildir. Numunenin uzunluğu büyük olduğunda burkulma olayı meydana gelir. Cismin boyu küçük alındığında ise uç şartlar sonuçlara etkir. Çekme cihazının tablasının cismin uç kesitlerinin genişlemesine mani olduğundan numunenin orta kısımları daha fazla genişleyerek sonuçlara etkir. Bu nedenle deney sonuçları deney numunesi formu ile birlikte verilmesi (örneğin boyutları verilen silindir veya küp gibi) basma deneylerinde daha önem kazanır. Çelik türü malzemeler basınç deneyi altında da çekme deneyine benzer davranış gösterirler (BAKİOĞLU 2001).

3.3 SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

3.3.1 Statik Analiz

Giriş

Statik analizde zaman bağımsız bir değişken olarak göz önüne alınmaz. Deformasyonların sabit ve yavaşça değiştiği kabul edilir. Bazı problemlerde titreşim frekansı çok düşük olabilmektedir (en düşük doğal frekansın 1/3'ünden daha küçük). Bu durumlarda problem "quasi-statik" olarak düşünülebilir. Yani atalet kuvvetleri hesaplanarak, bunlar sanki birer statik yükümüş gibi yapıya uygulanarak, yapı statik olarak analiz edilebilir.

Bir statik analiz için aşağıdaki adımların yerine getirilmesi gerekmektedir:

1. Sonlu elemanlar modelini hazırlanması:

- Yapı sonlu elemanlara bölerek ayrıklaştırılır
- Yapının nasıl yüklendiğini tanımlanır
- Yapının nasıl desteklendiğini tanımlanır

2. Hesaplamaların gerçekleştirilmesi. Program sırasıyla aşağıdaki adımları gerçekleştirir:

- Rijitlik matrisi $[K]$ her bir eleman için hesaplanır.
- Elemanlar birbirleriyle birleştirilerek, tüm sistem için global rijitlik $[K]$ elde edilir.
- Yükler global yük vektöründe, $[R]$, yerleştirilir.
- Mesnet koşulları uygulanır.
- Global denklem takımı $[K] \cdot [D] = [R]$, bilinmeyen $[D]$ değerleri için çözülür.

Yapı problemlerinde $[D]$ matrisi nodal deplasman değerlerini temsil etmektedir.

Rijitlik Matrisinin Oluşumu

Genel olarak rijitlik matrisi $[K]$ bir eleman için aşağıdaki şekilde temsil edilebilir.

$$[K] = [B]^T [E] [B] dV \quad [3.6]$$

Burada $[B]$ şekil değiştirme-deplasman matrisi, $[E]$ sabitler matrisi olup, malzeme özelliklerini göstermektedir. dV ise elemanter hacim elemanıdır. Rijitlik matrisleri eleman tipine bağlı olarak, eleman deplasman alanını tarif eden şekil (shape functions) fonksiyonları kullanılarak her tip eleman için ayrı ayrı hesaplanabilirler

Eleman rijitlik matrisiyle, sistem global rijitlik matrisleri simetriktir. Bu durum yapıya etkiyen kuvvetler ile deformasyonlar arasında lineer ilişki olduğu sürece geçerlidir. Rijitlik matrislerinde diyagonal terimler daima pozitifdir. Diğer yandan bir yapı hiç mesnetlenmemiş veya uygun şekilde mesnetlenmemişse, rijitlik matrisinde tekillikler oluşur. Bu durumda program $[K] \cdot [D] = [R]$ denklemini nodal serbestlik dereceleri için çözemeyecektir. Matristeki tekillikleri önleyebilmek amacıyla tüm rijid

cisim hareket serbestlikleri uygun şekilde engellenmelidir. Bu rijid hareket serbestlikleri yapı içerisinde deformasyon ve dolayısıyla gerilme yaratmayan hareket şekilleridir.

Her bir nod noktasına genel amaçlı bir sonlu eleman programı altı serbestlik derecesi atayacaktır. Bunlar üç adet öteleme ve üç adette dönme serbestliğidir. Eğer bu global serbestlik derecelerinden biri bile bu noda bağlı olan elemanların biri için bile şekil değiştirme oluşturmuyorsa, rijitlik matrisinde tekilik oluşacaktır. Bu tür serbestlik dereceleri çözümden önce kısıtlanmalıdır.

Yükler

Yükler yapıya değişik şekillerde uygulanabilir. Bu tek bir noktaya uygulanan kuvvet veya moment olarak veya yüzey basınç yükü olarak gerçekleştirilebilir. Diğer bir yükleme şekli ise cismin kendi ağırlığı dolayısıyla veya atalet kuvvetlerinin varlığı dolayısıyla oluşan kuvvetlerdir.

Yayılı yükler sonlu eleman programlarında "Kinematik Eşdeğer" nodal yüklerle değiştirilirler. Kinematik eşdeğer nodal yükler toplamda orijinal yüke eşit olup, herhangi bir noktaya göre orijinal yüklemeyle aynı moment değerini vermektedir. Kinematik eşdeğer olmayan nodal yüklemeler ise genelde "lumped" yükleme olarak adlandırılır ve genelde dönme serbestliğine sahip elemanlar için tercih edilmektedir (ANSYS Stuctural Analysis Guide 1999).

3.4 HESAPLAMALI ÇALIŞMA

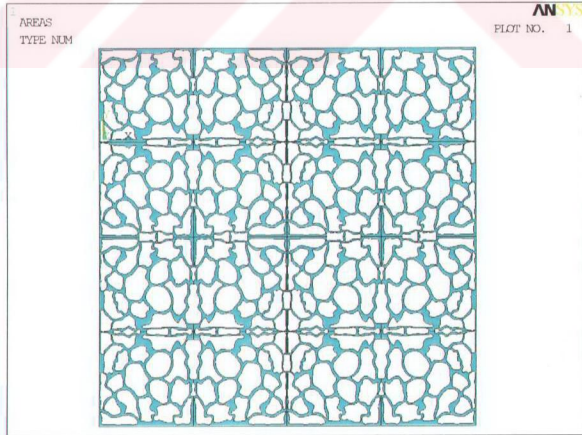
3.4.1 Katı Modelin Kurulması

Dency numunesinin iç yapısına ve dış boyutlarına dikkat edilerek katı model oluşturulmuştur. Üç boyutlu model için test sırasında kullanılan parçalardan biri (Şekil 3.4) ölçülerek ANSYS 8.0 programında modellenmiştir. Şekil 3.6'da üç boyutlu parça modeli görülmektedir.



Şekil 3.6. Üç boyutlu katı model.

İki boyutlu model hazırlanırken elektron mikroskopunda çekilmiş kırılma yüzeyi fotoğrafları kullanılmıştır. Gözenek dağılımının daha düzgün olduğu bir tanesi seçilip (şekil 4.1) AutoCAD programı kullanılarak iç yapı modellenmiştir. Daha sonra model üzerinde ANSYS 8.0 yazılımı yardımıyla modifikasyonlar gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu parça modeli şekil 3.7’de görülmektedir.



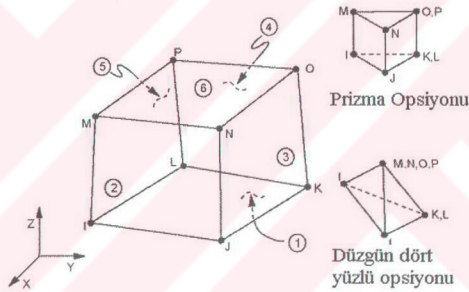
Şekil 3.7. İki boyutlu katı model.

3.4.2 Sonlu Elemanlar Modelinin Kurulması

Sonlu elemanlar modeli mühendislikte sıkça kullanılan ve büyüklüklerin sayısal olarak ifade edilmelerini sağlayan bir yöntemdir. Katı cisimlere ve akışkanlara uygulandığında matrislerle ifade edilen bir takım büyüklükler elde edilir.

Üç boyutlu köpük malzemenin sonlu elemanlar modeli oluşturulurken ANSYS 8.0; iki boyutlu malzemenin modeli oluşturulurken CAD programından yararlanılmıştır. Analizlerin tümü ANSYS 8.0 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. 2 boyutlu model ANSYS 8.0 yazılımı ile oluşturulmuş, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulacak mesh (sonlu elemanlar ağı) için düzeltilmiştir.

Üç boyutlu model için ANSYS 8.0 eleman kütüphanesinden SOLID185 kullanılmıştır. Şekil 3.8'den de görüldüğü gibi SOLID185 elemanı üç boyutlu olup 8 noda sahiptir.



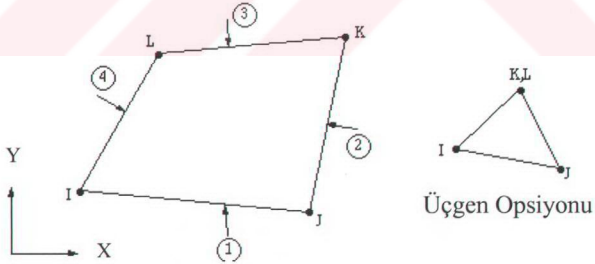
Şekil 3.8 SOLID185 elemanı.

Basma işleminin fiziksel modeli ve elemanların deforme olma miktarı hesaba katılarak eleman boyutlandırması yapılmıştır. Üst ve alt plakalar rijit olacak şekilde elemanlara ayrılmış ve kontak oluşturulmuştur. Şekil 3.9'da mesh atılmış üç boyutlu model görülmektedir. Model içerisinde 1019 eleman ve 1123 nod kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Al Köpük malzemenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli.

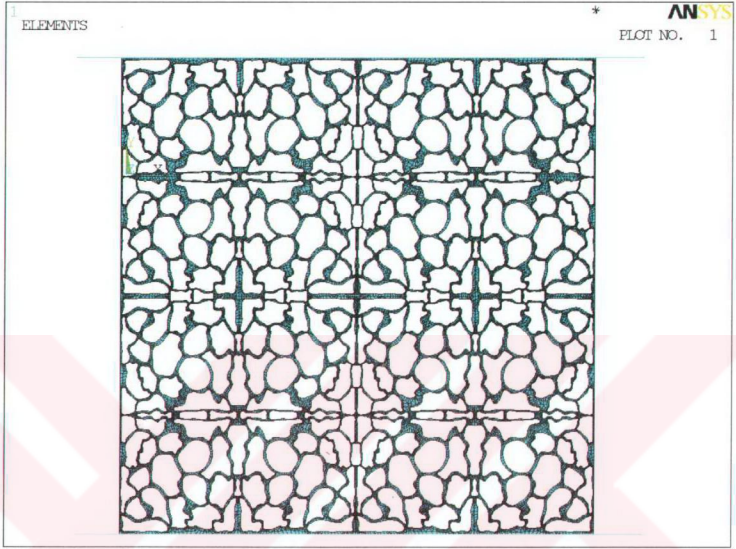
İki boyutlu model için ANSYS 8.0 eleman kütüphanesinden PLANE182 seçilmiş, opsiyonlar kısmından Düzlem Gerilme özelliği (Plane Stress) aktif hale getirilmiştir. Şekil 3.10'da dört nodlu PLANE182 elemanı görülmektedir.



Şekil 3.10. PLANE182 elemanı.

Sonu elemanlar modeli içerisinde 63764 eleman ve 83275 nod kullanılmıştır. 2 boyutlu modelde üst ve alt plakalar, rijit çizgiler halinde modellenmiş ve köpük

malzeme ile aralarında kontaklar oluşturulmuştur. 2 boyutlu yapının sonlu elemanlar modeli şekil 3.11'da görülmektedir.

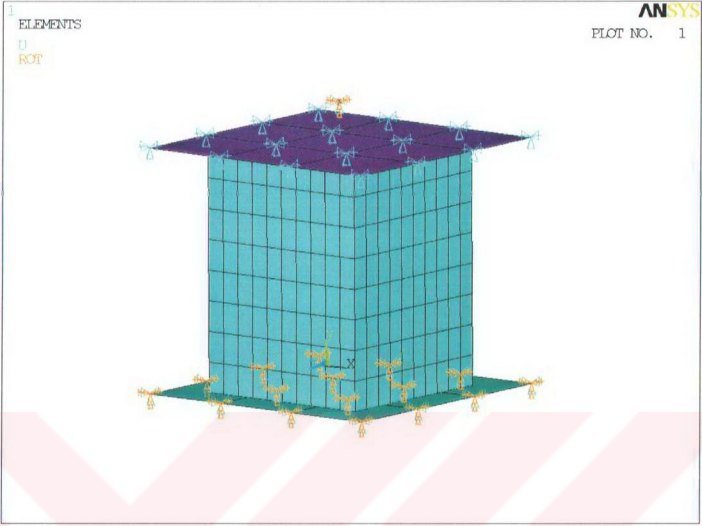


Şekil 3.11. Köpük malzemenin iki boyutlu sonlu elemanlar modeli.

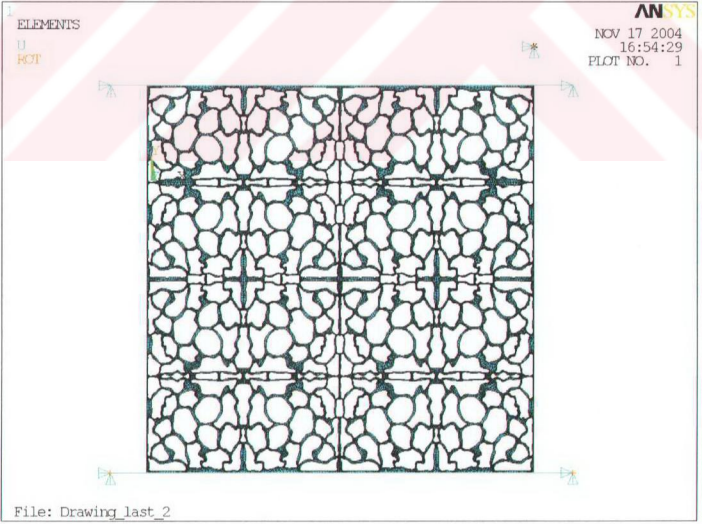
3.4.3 Yüklemeleler

Test sonucunda elde edilen yapı belirli bir basma kuvveti altında belirli deformasyonlar göstermiştir. Uygulanan kuvvet Al esaslı deney numunesinin yaklaşık yarısına kadar basılmasını sağlamıştır. Bu nedenle, yapılan sonlu elemanlar analizlerinde (aynı boyuttaki deney numunesine) 30 mm yer değiştirme uygulanmıştır. Yükleme pilot nod sayesinde üst rijit plakaya aktarılmıştır.

Test cihazındaki sistemi bire bir modellemek için deney numunesinin alt tarafından ankastre tutulmuştur. İki ve üç boyutlu sonlu elemanlar modelinin sınır şartları şekil 3.12 ve 3.13'de görülmektedir.



Şekil 3.12. Üç boyutlu modelin sınır şartları.



Şekil 3.13. İki boyutlu modelin sınır şartları.

3.5 ELEKTRON MİKROSKOBİSİ

Deney numuneleri, köpük yapının bozulmaması için keserek değil kırılarak yüksek çözünürlüğe sahip taramalı bir elektron mikroskopunda incelenmiştir (JEOL / JSM-6335F). Elektron mikroskopunun ayrıntılı özellikleri çizelge 3.2 ve resmi şekil 3.14'de görülmektedir.

Çizelge 3.2. JEOL / JSM-6335F ayrıntılı özellikleri

Çözünürlük	1.5 nm (15 kV için), 5.0nm (1.0 kV için)
İvmelenme Voltajı	0.5 den 2.9 kV'a kadar (10 V'luk adımlarla) 2.9 den 30 kV'a kadar (100 V'luk adımlarla)
Büyütme	x10 - 500,000
Lens sistemi	Elektro manyetik 3 lensli sistem
Numune Kısmı	X=50mm, Y=70mm, Z=24mm (4-8-15-25-39 mm) ile Z ekseninde hassas ayarlama -2mm 'den 2mm ' ye kadar. T=-5°'den +60°'ye kadar R=360° (motor sürücülü) X,Y,R otomasyon
Numune Boyutu	12,5mm den 100mm ye kadar (çap) X 10mm (dik boy). 32mm (çap), 50mm (çap), 32mm (çap) standart tutucular
İşlem ve Görüntü Sistemi	Gözlem için: 18.1inch, yüksek çözünürlüklü FPD Kayıt için: 5 in, çok yüksek çözünürlüklü CRT--opsiyonu
Dijital Görüntü	2048 x 2048 piksel e kadar
Görüntü çözünürlüğü	1280 x 1024 piksel
Ölçü skalası	Yatay, dikey, çapraz, noktadan noktaya, açılı
Görüntü İşleme	gamma, parlaklık : kontrast, Kernal Filtreleri, görüntü açıklayıcıları,
Görüntü seçici	SEI, COMPO, TOPO, EDS, Yardımcı girdiler
Otomatik Fonksiyonlar	AFD (Otomatik odaklanma), ACB (otomatik kontrast ve parlaklık kontrolü), ASD (otomatik damgalayıcı), AFD + ACB, Otomatik fotoğraf alma



Şekil 3.14. JEOL / JSM-6335F

Numuneler $45,4 \times 46 \text{ mm}^2$ farklı yüksekliklerde hazırlanarak elektron mikroskobu tutucusuna özel yapıştırıcısıyla tutturulduktan sonra içeri yerleştirilmiştir. Burada fotoğraflar dijital olarak çekilerek CD'lere kayıt edilmiştir. Şekil 3.15'de elektron mikroskobunda kullanılan numunelerden biri görülmektedir.



Şekil 3.15. Elektron mikroskobunda kullanılan deney numunesi

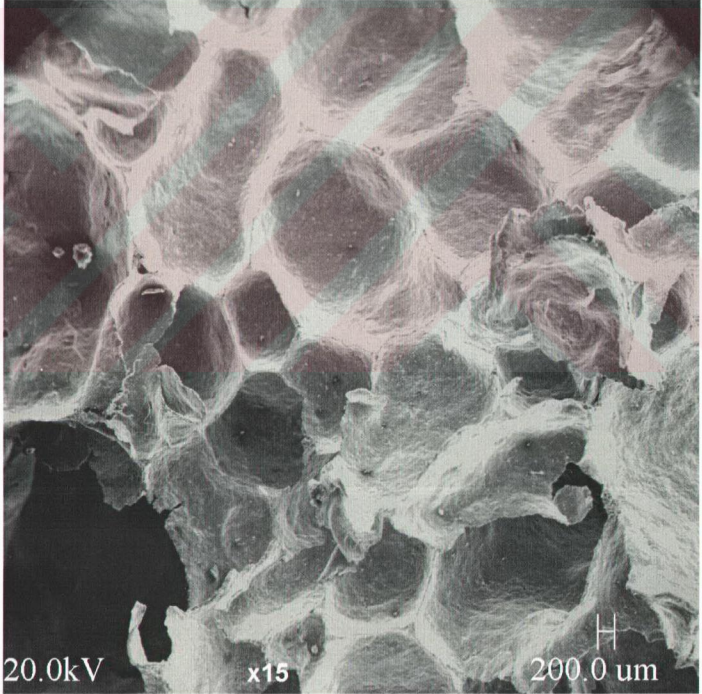
4. SONUÇLAR

4.1 DENEYSEL ÇALIŞMA

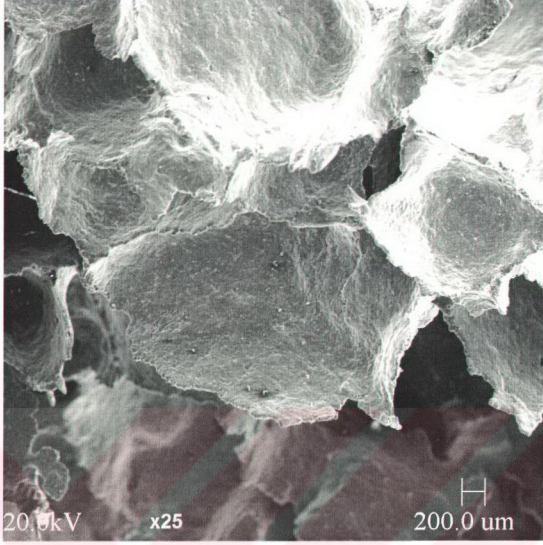
4.1.1 Malzemenin Mikro Yapısı

Bir köpük malzemenin iç yapısı, gözenek boyutu, gözenek dağılımı ve bunun gibi önemli parametrelerin tayininde elektron mikroskobisi önemli bir yer tutmaktadır. Deneysel numunesi olarak kullanılan Al esaslı köpük malzemenin mikroskop için hazırlanması mikro yapının elde edilmesi için gereken ilk adımdır. İstenilen boyuta ulaşan malzeme çeşitli büyütme değerleri kullanılarak incelenir.

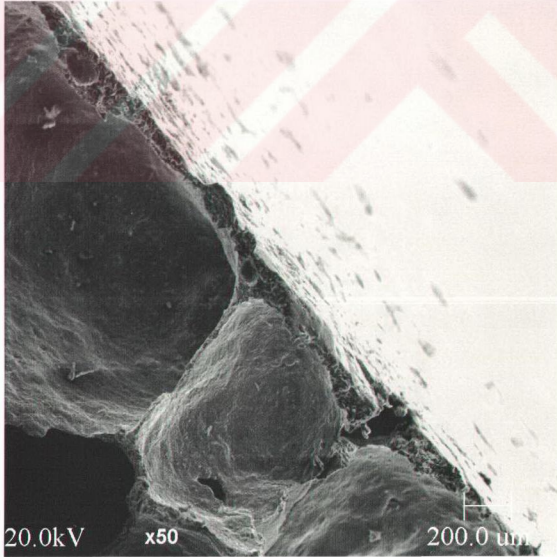
Aşağıda TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen farklı büyütme değerine sahip elektron mikroskobu fotoğrafları sırasıyla şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, ve 4.5'de görülmektedir.



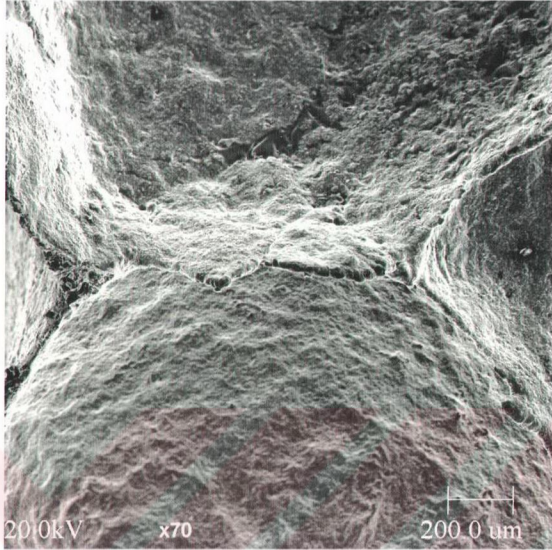
Şekil 4.1. Deneysel olarak kullanılmış AlSi7 köpük malzemenin genel kırılma yüzeyinin elektron mikroskobu fotoğrafı



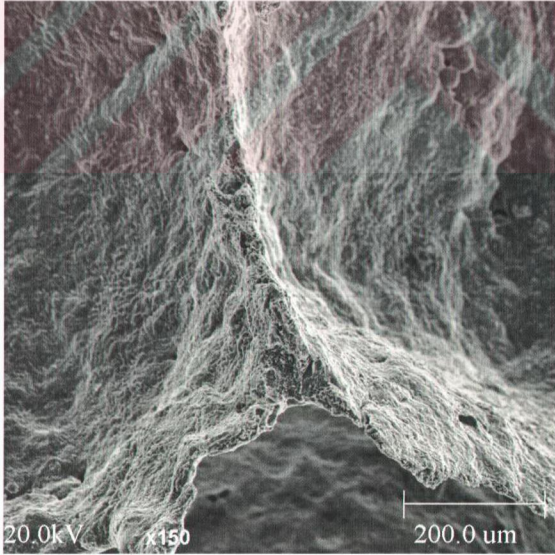
Şekil 4.2. Kullanılan numunelerin birinden alınmış yakın hücre görüntüsü



Şekil 4.3. Kabuk ve hücre duvarlarının yakın görüntüsü



Şekil 4.4. Hücrelerin kesişim noktalarının yakından görünüşü



Şekil 4.5. Hücre duvarının ayrıntılı görüntüsü

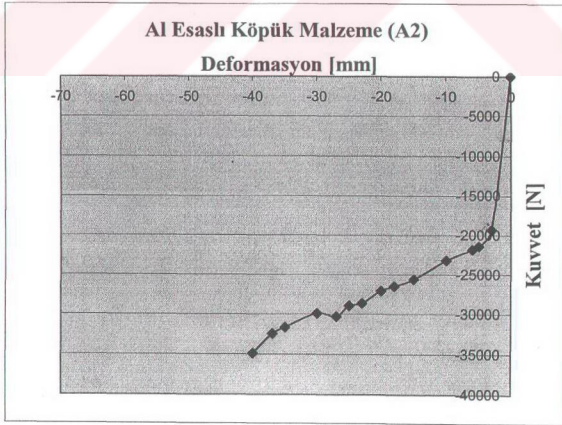
4.1.2 Gerilme – Şekil Değiştirme Eğrileri

Test işlemi sonrasında elde edilen kuvvet – deformasyon değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Çizelge 4.1’ de her bir parça için kuvvet değerleri ve ortalama kuvvet değeri görülmektedir.

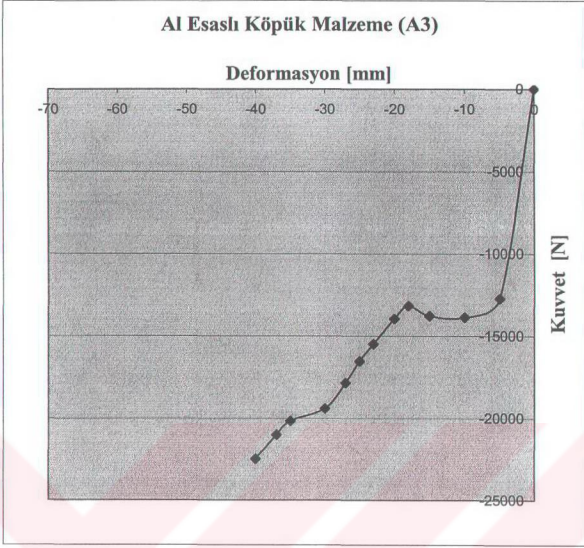
Çizelge 4.1. Deneysel kuvvet – basma (mm) değerleri

Basma (mm)	A2 (N)	A3 (N)	B1 (N)	B2 (N)	B3 (N)	Ortalama Kuvvet (N)	Standard Sapma (N)
0	0	0	0	0	0	0	0
5	21401	12722	11577	10540	9432	13134	± 4779
10	23232	13874	13247	10227	10495	14215	± 5293
15	25612	13772	14860	10886	10598	15145	± 6130
18	26498	13166	15667	12000	11501	15766	± 6211
20	27059	13964	16153	12601	12063	16368	± 6181
23	28666	15501	16333	13554	12333	17277	± 6558
25	28953	16524	16703	14182	12396	17751	± 6509
27	30335	17831	16999	14668	13498	18666	± 6751
30	29926	19391	17446	15462	13798	19204	± 6350
35	31692	20159	19545	17830	16025	21050	± 6163
37	32500	20995	20333	18831	17332	21998	± 6038
40	34918	22476	22207	21196	18572	23873	± 6363
50							

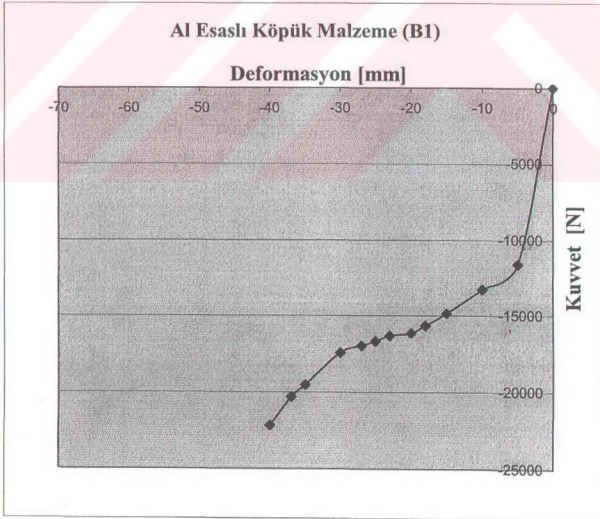
Yapılan basma testi sonucunda deney numunesi için kuvvet – deformasyon eğrileri çıkartılmıştır. Sırasıyla şekil 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10’ de görülmektedirler.



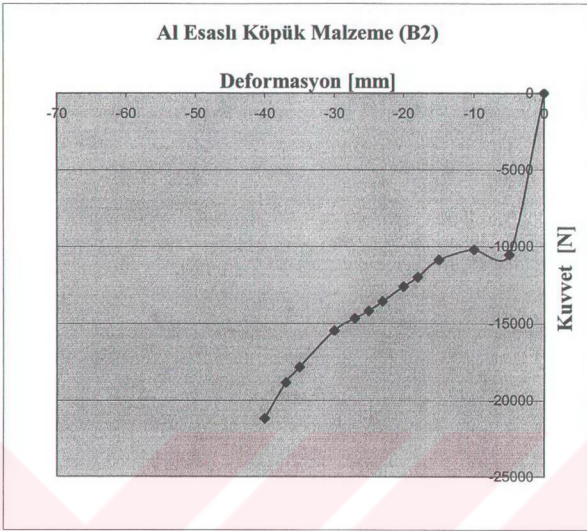
Şekil 4.6. Deney numunesi A2 parçasının kuvvet – deformasyon diyagramı



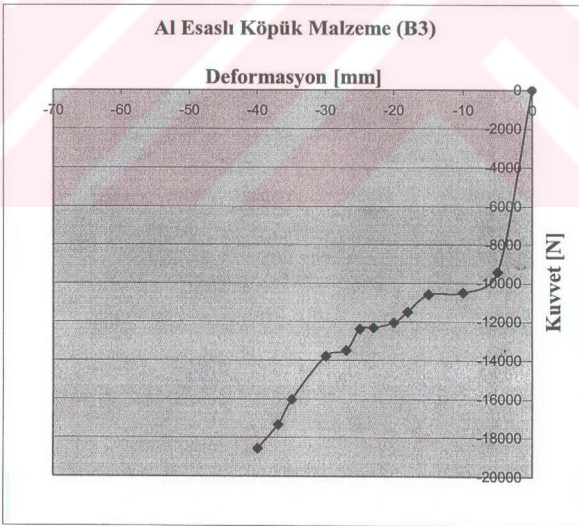
Şekil 4.7. Deney numunesi A3 parçasının kuvvet – deformasyon diyagramı



Şekil 4.8. Deney numunesi B1 parçasının kuvvet – deformasyon diyagramı

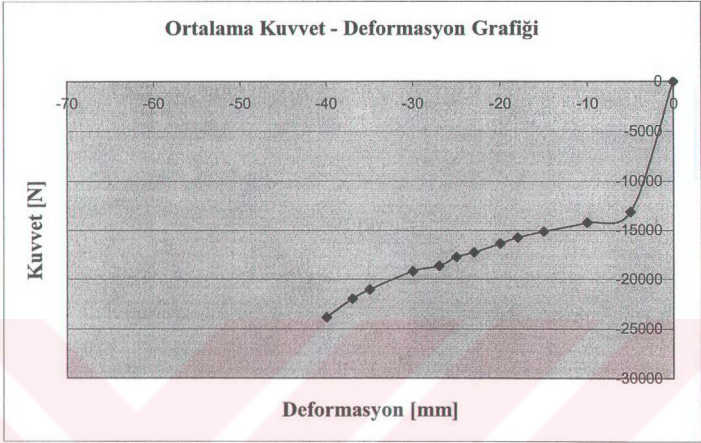


Şekil 4.9. Deney numunesi B2 parçasının kuvvet – deformasyon diyagramı



Şekil 4.10. Deney numunesi B3 parçasının kuvvet – deformasyon diyagramı

5 farklı parça için elde edilen kuvvet değerleri toplanıp ortalaması alınmıştır. Şekil 4.11’de ortalama kuvvet – deformasyon diyagramı görülmektedir.



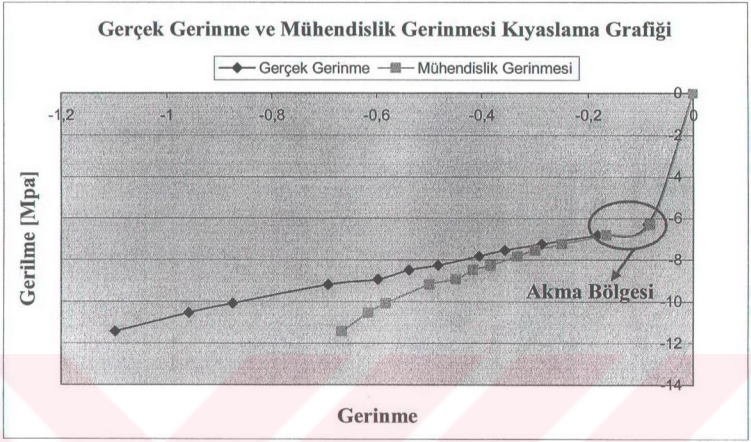
Şekil 4.11. Ortalama kuvvet – deformasyon diyagramı

Kesit alanı ($A_0=2088,4 \text{ mm}^2$) ve ortalama kuvvet değerleri kullanılarak [3.1], [3.2] ve [3.3]’deki eşitliklerinin yardımıyla hesaplanan değerler çizelge 4.2 görülmektedir.

Çizelge 4.2. Gerilme ve şekil değiştirme değerleri

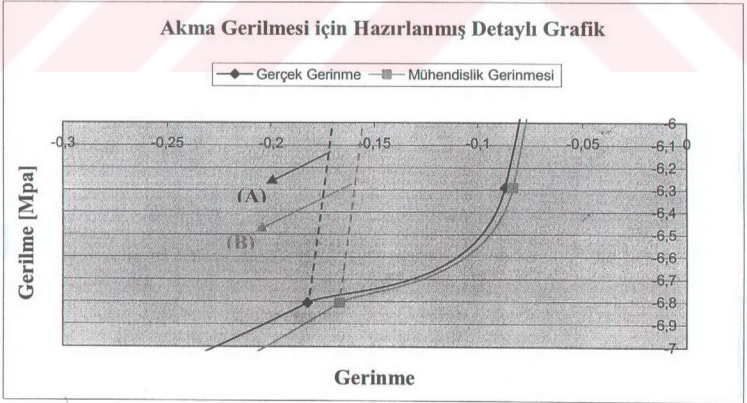
Mühendislik Gerilmesi (MPa) σ	Mühendislik Gerinmesi ε	Gerçek Gerilme $\frac{\sigma}{\varepsilon}$
0	0	0
-6,29	-0,0833	-0,0870
-6,81	-0,1666	-0,1823
-7,25	-0,2500	-0,2876
-7,55	-0,3000	-0,3566
-7,83	-0,3333	-0,4054
-8,27	-0,3833	-0,4834
-8,50	-0,4166	-0,5389
-8,94	-0,4500	-0,5978
-9,19	-0,5000	-0,6931
-10,08	-0,5833	-0,8754
-10,53	-0,6166	-0,9588
-11,43	-0,6666	-1,0986

Bu değerlere bağlı kalarak elde edilen gerilme – şekil değiştirme diyagramları şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.12. Gerilme – Şekil değiştirme diyagramları

Şekil 4.12’deki diyagramda bulunan Akma Bölgesinin detayı şekil 4.13’de görülmektedir. Diyagram üzerindeki (A) çizgisi %17 ve (B) çizgisi %16 kalıcı deformasyonları temsil etmektedir.



Şekil 4.13. Akma bölgesinin detaylı görüntüsü

Malzemenin elastisite modülü [4.1] eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

Burada;

$$E_{Köpük} = E_{Kati} \left[\frac{\rho_{Köpük}}{\rho_{Kati}} \right]^n \quad [4.1]$$

(Fraunhofer)

$E_{Köpük}$: Köpük malzemenin elastisite modülünü,

E_{Kati} : Alüminyumun elastisite modülünü,

$\rho_{Köpük}$: Köpük malzemenin yoğunluğunu,

ρ_{Kati} : Alüminyumun yoğunluğunu,

n : Titreşim deneyleri kullanılarak elde edilen elastisite değeri ile yoğunluğun oluşturduğu doğrunun eğimini göstermektedir ($1.7 \leq n \leq 2.3$).

Hasarsız titreşim deneyleri sonucunda elde edilen elastisite değeri ile yapının yoğunluğunun oluşturduğu diyagram çizdirilmiş ve oluşan doğrunun eğimi okunmuştur. Elde edilen bu eğim eşitlikteki n katsayısı olarak kullanılmıştır. Yapı içerisindeki gözenek boyutunun ve dağılımının farklı oluşu böyle bir hesabın oluşmasını sağlamıştır.

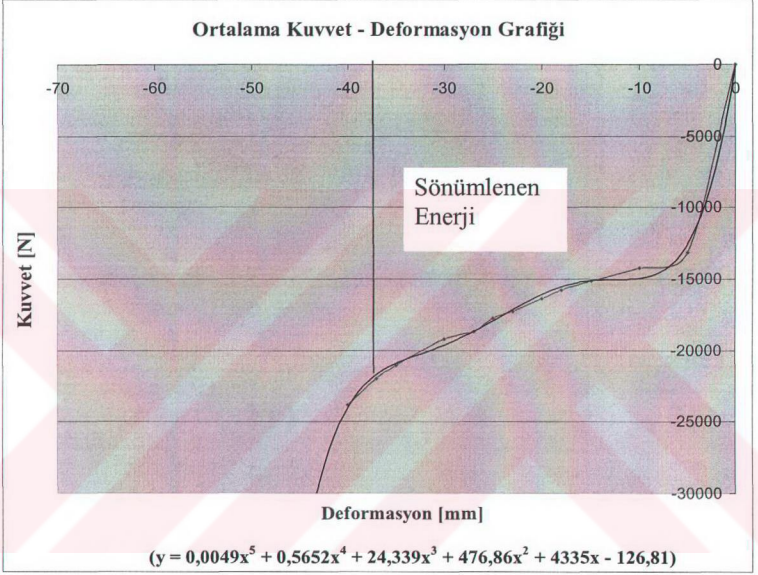
AlSi7 kompozisyonuna sahip deney numunesi için yapılan elastisite modülü hesabı aşağıda görülmektedir:

$$E_{Köpük} = 7.10^5 \left[\frac{3,83.10^{-7}}{2,71.10^{-6}} \right]^{1.85}$$

$$E_{Köpük} = 1875,1 \text{ MPa'dır.}$$

4.1.3 Sönümlenen Enerji Miktarı

Şekil 4.14'de ortalama kuvvet – deformasyon diyagramını kullanarak basma kuvvetinin basma mesafesine bağlı olarak integrali alınmıştır. Plato gerilme 38 mm civarında sonlanmıştır. Bu miktarın üstündeki deformasyon değerlerinde deney numunesi yoğunluk artışı sebebiyle daha fazla enerji sönümleyemez. Bu nedenle integralin üst sınırı (d) 38 mm= 0,038 m olarak alınmıştır.



Şekil 4.14. Ortalama kuvvet – deformasyon diyagramını kullanarak absorbe edilen enerji bölgesi

Eğilim çizgisi yardımıyla elde edilen eşitlik [4.1] denklemi olarak görülmektedir.

$$F(x) = 0,0049x^5 + 0,5652x^4 + 24,339x^3 + 476,86x^2 + 4335x - 126,81 \quad [4.1]$$

Eğri altında kalan alan absorbe edilen enerjiyi verdiğiinden,

$$E(d) = \int_0^d F(x)dx$$

$$E(d) = \int_0^{0,038} (0,0049x^5 + 0,5652x^4 + 24,339x^3 + 476,86x^2 + 4335x - 126,81) dx$$

$$E(d) = \int_0^{0,038} \left[\frac{0,0049}{6} x^6 + \frac{0,5652}{5} x^5 + \frac{24,339}{4} x^4 + \frac{476,86}{3} x^3 + \frac{4335}{2} x^2 - 126,81x \right]$$

$E(d) = 38,61$ joule, elde edilir.

Bu enerji miktarı deneylerde kullanılan tek bir numuneden elde edilmiştir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi deney numuneleri 3 eşit parçaya ayrılarak basma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tek bir numunenin hacmi yaklaşık $1,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ 'tür. Hesaplanan enerji miktarı bir numunenin hacmine bölersek;

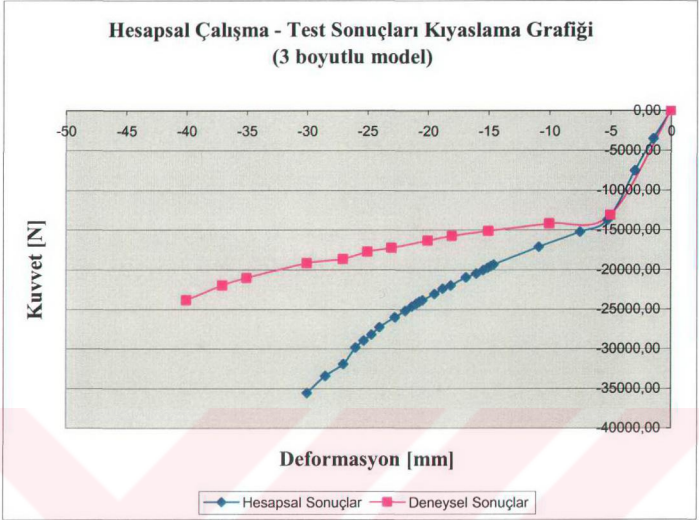
$$\text{Birim numune başına sönmölen enerji} = \frac{38,61}{1,25 \cdot 10^{-4}} = 308880 \text{ j/m}^3 = 0,31 \text{ Mj/m}^3$$

elde edilir (Şekil 2.19 ile karşılaştırınız).

4.2 HESAPLAMALI ANALİZ SONUÇLARI

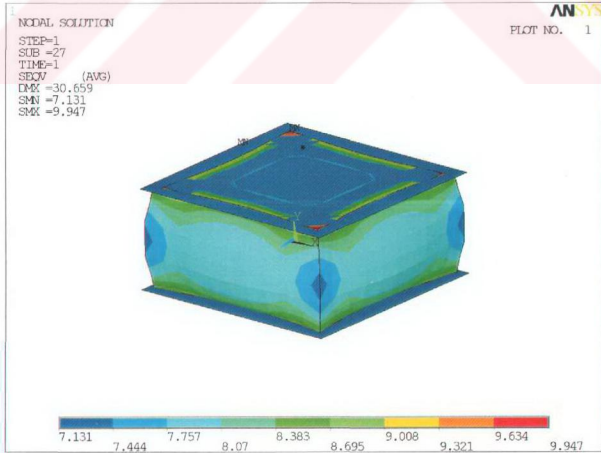
Yapılan analizler sonucunda ayrı ayrı elde edilen reaksiyon kuvveti değerleri ile uygulanan deplasman değerleri kullanılarak bir diyagram oluşturulmuştur.

Reaksiyon kuvvetleri pilot nod uygulaması sayesinde okunarak bir metin dosyasına kaydedilmiştir. Aynı işlem adım adım uygulanan deplasman değerleri içinde gerçekleştirilmiştir. Microsoft Excel yardımıyla açılan metin dosyaları tablo haline getirilip istenilen diyagram oluşturulmuştur. Şekil 4.15'de üç boyutlu modelden elde edilen değerlerle deneysel sonuçlar arasındaki reaksiyon kuvveti – deformasyon diyagramı görölmektedir.

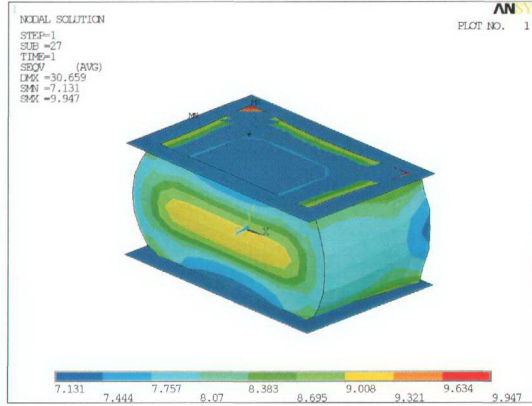


Şekil 4.15. 3 Boyutlu model için hesaplamalı sonuçların deneysel sonuçlar ile kıyaslanması.

Yapılan analizler sonucunda üç boyutlu modelde oluşan eş değer gerilme dağılımları şekil 4.16 ve 4.17'de görülmektedir.

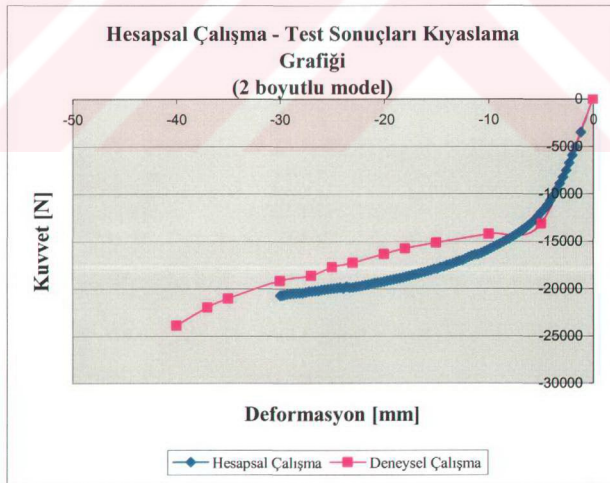


Şekil 4.16. Üç boyutlu modelde eş değer gerilme dağılımı



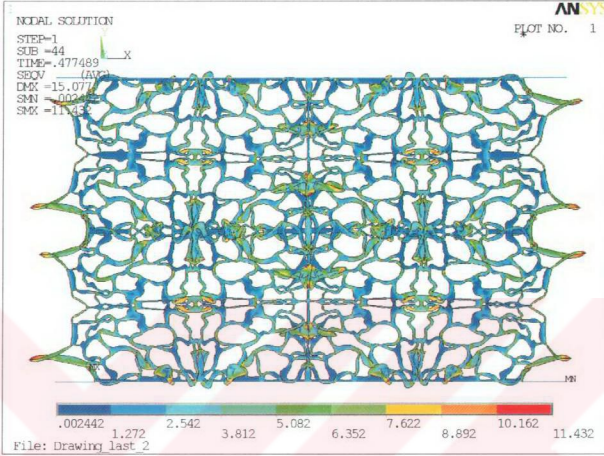
Şekil 4.17. Kesit alınmış üç boyutlu modeldeki eş değer gerilme dağılımı

Üç boyutlu modelde izlenen yöntem aynı şekilde iki boyutlu model için de uygulanmıştır. Şekil 4.18'de iki boyutlu modelden elde edilen değerlerle deneysel sonuçlar arasındaki reaksiyon kuvveti – deformasyon diyagramını görülmektedir.

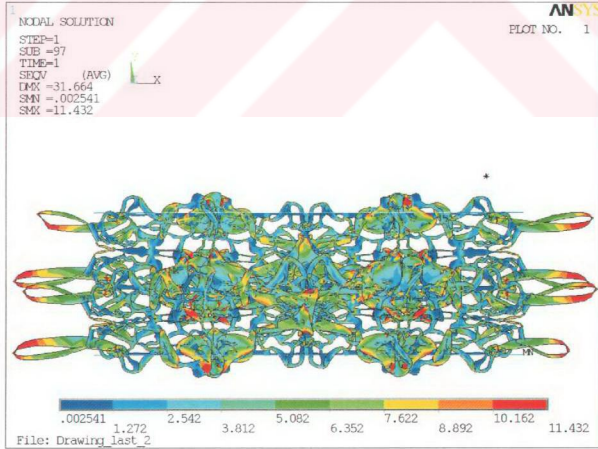


Şekil 4.18. 2 Boyutlu model için hesaplamalı sonuçların deneysel sonuçlar ile kıyaslanması.

Yapılan analizler sonucunda iki boyutlu modelde oluşan eş değer gerilme dağılımları şekil 4.19 ve 4.20'de görülmektedir. Şekil 4.18'de 15 mm; şekil 4.19'de ise 30 mm deplasman uygulanmıştır.



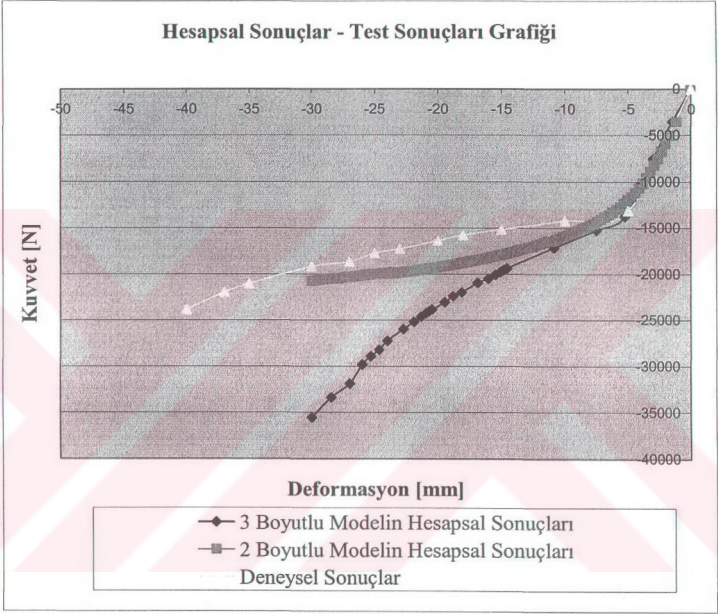
Şekil 4.19. 15 mm deplasman uygulanmış iki boyutlu modelde eş değer gerilme dağılımı



Şekil 4.20. 30 mm deplasman uygulanmış iki boyutlu modelde eş değer gerilme dağılımı

4.3 SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

İki ve üç boyutlu Al esaslı köpük malzeme üzerinde yapılan analizler sonucu bulunan reaksiyon kuvveti değerleri bölüm 4.1.3'de anlatıldığı gibi hesapsal Microsoft Excel yardımıyla diyagramlara dönüştürülmüştür. Şekil 4.21'de iki tip katı modelin hesaplamalı sonuçlarıyla, deneysel çalışmadan elde edilen reaksiyon kuvveti değerleri görülmektedir.



Şekil 4.21. Hesaplamalı sonuçların deneysel sonuçlar ile kıyaslanması.

Diyagramda da görüldüğü gibi akma noktasının üstündeki deformasyonlarda farklı reaksiyon kuvvetleri oluşmaktadır. Orijinal parça içerisinde farklı boyutlarda gözeneklerin bulunması ve bunların rasgele dağılımı yüksek deplasman değerlerinde diyagramları farklı kılmaktadır. Üç boyutlu model sonuçları ile test sonuçları arasındaki fark modelleme sırasında yapılan geometrik kabullerdir.

İki boyutlu model sonuçları test sonuçlarına daha yakın çıkmıştır. Model hazırlanırken deney numunesinin kesitindeki belli bir kısmının kullanılması bunun başlıca nedenidir. Çünkü yapı basma kuvvetine maruz kaldığı anda iç yapıdaki gözenekler darbe sönümleme işlemini içi dolu parçaya göre daha iyi gerçekleştirmişlerdir.

4.4 TARTIŞMA

30 mm deplasman sonucu şekil 4.21'deki grafikten okunan reaksiyon kuvvetleri aşağıdaki gibidir:

- Test Sonucunda bulunan reaksiyon kuvveti : **19204 N**
- İki boyutlu model için bulunan hesaplamalı reaksiyon kuvveti : **20748 N**
- Üç boyutlu model için bulunan hesaplamalı reaksiyon kuvveti : **35572 N**

Kullanılan beş deney numunesinin kütle ve yoğunluklarının ortalamaları çizelge 3.1'de görülebilir. $0,38 \text{ g/cm}^3$ ortalama yoğunluğa sahip malzeme için hesaplanan elastisite modülü $1875,1 \text{ MPa}$ 'dır.

Fraunhofer Institute'ün elde ettiği değerler ve malzeme bileşenleri çizelge 4.3'de görülmektedir. AISi12 kompozisyonlu numune için, elastisite modülü ve yoğunluk değerleri kıyaslandığında yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.3 AISi12 için yoğunluk ve elastisite değerleri (Fraunhofer)

Yoğunluk	g/cm^3	0,5	0,6	0,7	0,8
Elastisite Modülü	GPa	3,5	4,9	6,6	8,4

İki boyutlu parça üzerinde 30 mm deplasman uygulandıktan sonra elde edilen maksimum eş değer gerilme değeri $11,432 \text{ MPa}$; üç boyutlu modelde $9,947 \text{ MPa}$ ' dır. Fraunhofer Institute' ün elde ettiği basma mukavemeti değerleri çizelge 4.4'de görülmektedir. Özellikle AISi7 alaşımı için değerler kıyaslandığında, test sonucunda elde edilen sonuçların yakın ve kabul edilebilir olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.4 Farklı kompozisyonlara sahip malzemelerin basma mukavemetleri
(Fraunhofer)

Malzeme	AlSi7	AlSi12	AlSi12	AlSi12	AlMg1Si (6061)	AlMg1Si (6061)	AlMg1Si (6061)
Numune	Dik	Yatay	Yatay	Dik	Yatay	Yatay	Dik
Kaplama	Yok	Yok	Var	Yok	Yok	Var	Yok
Yoğunluk [g/cm ³]	Basma Mukavemeti [MPa]						
0,5	7,9	13,9	11,1	11,6	14,3	14,1	9,0
0,6	11,9	18,8	16,1	15,1	22,0	20,6	12,6
0,7	16,9	24,3	22,1	18,9	31,8	27,5	16,7
0,8	22,8	30,2	29,0	23,0	43,6	35,8	21,4

PAPADAPULOS ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada kullandıkları parça alüminyum tozları (%99,8 alüminyum, %0,15 demir) içerisine %1,8 kalsiyum ve %1,4 titanyum hidrür katılarak üretilmiştir. Basma testi sonucunda elde ettikleri elastisite modülü 23000 MPa' dır. Elastisite modüllerindeki fark kompozisyondaki titanyum katkısının fazla oluşu ve gözenek boyutunu daha küçük olmasından kaynaklanabilir.

4.5 ÖNERİLER

DeneySEL çalışma sonucunda elde edilen değerlerin kıyaslanması ve doğrulanması için kullanılan sonlu elemanlar analizi yazılımının deneySEL çalışmaları desteklemesi ve maliyetlerini azaltılması açısından tercih edilmesi gereken bir yoldur.

Aynı sınır koşullarına ve aynı non-lineer malzeme verilerine sahip bu modellerden farklı reaksiyon kuvvetleri elde edilmiştir. Sırasıyla iki boyutlu model, üç boyutlu model ve deneySEL çalışmadan elde edilen değerlere bakıldığında bir yakınsama görülmektedir. Bu değerler modellerin geometrik non-lineerite açısından doğru çalıştığını göstermektedir.

Kullanılan deney numunesine sadece basma değil diğer mekanik testler de uygulanarak mekanik davranışı hakkında daha ayrıntılı bilgiler elde edilebilir. Bunun yanı sıra malzeme bileşimi değiştirilerek farklı uygulama alanları için köpük malzemeler üretilebilir.

KAYNAKLAR

ALULIGHT International GmbH, Outstanding Properties of Aluminium Metal Foams.
www.alulight.com.

ANSYS Structural Analysis Guide, 1999. ANSYS Inc, Canonsburg, p950.

ANSYS Theory Manual, 1999. ANSYS Inc, Pittsburgh, 6-1 – 6-3.

ANSYS Elements Manual, 1999. ANSYS Inc, Canonsburg. 4-85 - 4-94.

BAKIOĞLU, M. 2001. Cisimlerin Mukavemeti. ISBN 975 – 486 – 435 – 7, s91-92.

BANHART, J. 2000. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. Fraunhofer- Institute for Manufacturing and Advanced Materials. Wiener Strasse 12, Bremen, Germany

BOSMA, A., STOFFELS, G. ve VAN DER MEER, T., 2003. Heat Transfer fo Metallic Foam in Thermoacoustic Waves. University of Twente, Division of Thermal Engineering, The Netherlands

BURMAN, M., 1998. Fatigue Crack Initiation and Propagation in Sandwich Structures. Department of Aeronautics Division of Lightweight Structures. Royal Institute of Technology, Report No. 98-29, ISSN 0280-5656, Sweden, p21.

COX, S.J., BRADLEY, G. ve WEAIRE, D., 2001. Metallic Foam Processing From the Liquid State. The European Physical Journal Applied Physics, 14, 87*96 (2001), p87

CYMAT, Aluminium Foam Technology Applied to Automotive Design.
www.cymat.com/foam.asp.

DEGISCHER, H.P. ve KRISZT B., 2002. Hand Book of Cellular Metals: Production. Processing, Applications. Wiley-VCH, 3527303391, Portland, USA. p340-338.

Fraunhofer Institute, FOAMINAL Properties Overview and Design Guideline v1.6

HANSEN, H. , LANGSETH M. ve HOPPERSTAD O.S., 2002. Crash Behavior of Foam-based Components: Validation of Numerical Simulations. Advanced Engineering Materials, 4, No:10, p772-773

KRETZ, R., HAUSBERGER, K. ve GÖTZINGER, B., 2002. Energy – Absorbing Behavior of Aluminum Foams: Head Impact Tests on the A-Pillar of a Car. Advanced Engineering Materials, 4, No:10, p783-784

KUMAR SUDHEER, P., RAMACHANDRA, S. ve RAMAMURTY, U., 2002. Effect of Displacement-Rate on the Indentation Behavior of an nAluminum Foam. Materials Science and Engineering, A347 (2003) 330-337, p333-334

LEHMUS, D., MARSCHNER, C., BANHART J. ve BOMAS H., 2002. Influence of Heat Treatment on Compression Fatigue of Aluminium Foams. Journal of the material science 37 (2002) 3447 - 3451

LIU, P.S., 2004. Tensile Fracture Behavior of Foamed Metallic Materials. Materials Science and Engineering. A384 (2004) 352-354, p353-354

MIYOSHI, T., ITOH, M., MUKAI, T., KANAHASHI, H., KOHZU, H., TANABE, S. ve HIGASHI, K., 1999. Enhancement of Energy Absorption in a Closed-Cell Aluminum by the Modification of Cellular Structures. Scripta Materialia. Vol. 41, No. 10, pp. 1055-1060, Elsevier Science Ltd, PII S1359-6462(99)00255-9, p1060

OKA, H.S. 2002. Rotkolu Mafsal Milinde Hasar Birikimi Modellenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bursa,. s34-47

ÖCHSNER, A. ve LAMPRECHT, K., 2002. On the Uniaxial Compression Behavior of Regular Shaped Cellular Metals. Institute of Applied Mechanics. Mechanics Research Communications 30 (2003) 573-579, University of Erlangen-Nuremberg, Germany, p574

PAPADAPULOS, D.P., KONSTANTINIDIS, I.Ch., PAPANASTASIOU, N. SKOLIANOS, S., LEFAKIS, H. ve TSIPAS, D.N., 2004. Mechanical Properties of Al Metal Foams. Materials Letters, 58 (2004) 2574-2578, p2574

POPOV, E.P. 1990. Engineering Mechanics of Solids. Prentice-Hall Inc., Adivision of Simon & Shuster Englewood Clifs, New Jersey 07632, p61-66

RUAN, D., LU, G., CHEN, F.L ve SIORES, E., 2002. Compressive Behaviour of Aluminum Foams at Low and Medium Strain Rates. Composite Structures, 57 (2002) 331-336, School of Engineering and Science, Swinburne University of Technology, Australia, p335

SCHULTZ, O., DES LIGNERIS, A., HAIDER, O. ve STARKE, P., 1999. Fatigue Behavior, Strength and Failure of Aluminium Foam. Proceedings of the 1st International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam'99). Bremen (Germany), p379

SURESH, S. 1991. Fatigue of Materials. Cambridge University Pres.

TAUSCHER, H. 1983. Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı. MBEAE, Gebze.

YU, J.L., WANG, X., WEI Z.G. ve WANG, E.H., 2002. Deformation and Feilure Mechanism of Dynamically Loaded Sandwich Beams with Aluminum-Foam Core. International Journal of Impact Engineering 28(2003) 331-347, p332

ZETTL, B., MAYER, H. , STANZL-TSCHEGG S.E. ve DEGISCHER H.P., 2000.
Fatigue Properties of Aluminum Foams at High Numbers of Cycles. *Materials Science and Engineering*. A292 (2000) 1-7, p5-7



TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında bana her konuda destek olan, bildiklerini ve tecrübelerini benimle paylaşan Makine Yüksek Mühendisi Sn. S. Hakan OKA' ya, deney numunelerimin temininde Fraunhofer Inst.' e, tez konumun seçiminde ve destek konusunda yardımlarını esirgemeyen Danışman hocam Sn. Prof. Dr. Agah UĞUZ' a çok teşekkür ederim.

