



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM KÖPÜK METALİNİN FARKLI YÜKLEME KOŞULLARINDAKİ
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSSEL VE MATEMATİK MODELLEMESİ

SADRI HAKAN OKA

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2009



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM KÖPÜK METALİNİN FARKLI YÜKLEME KOŞULLARINDAKİ
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE MATEMATİK MODELLEMESİ

Sadri Hakan OKA

Prof.Dr. Agah UĞUZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BURSA-2009

ÖZET

Bu çalışmada, Alüminyum bazlı köpük metallerin farklı statik ve dinamik koşullardaki dinamik özellikleri incelenmiştir. Özellikle basma testi neticesinde elde edilen yük-deplasman eğrilerinin farklı yöntemlerle işlenmesi sonucu akma noktasının ve yoğunlaşma noktasının çok hassas şekilde tespiti sağlanmıştır. Benzer yöntem kullanılarak farklı tek eksenli çarpma hızlarında da testler gerçekleştirilmiş ve bu test sonuçları kurulan matematiksel modeller ile doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak, test ile ulaşılamayan hızlar için Sonlu elemanlar yöntemini kullanan benzetim araçları ile analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçta dinamik koşullarda çarpma hızına bağlı olarak enerji sönümlenme eğilimleri karakteristik olarak elde edilmiştir. Analizlerde elde edilen lineer bölgedeki plastik gerinim değerleri kullanılarak elde edilen saf elastik gerinme değerlerinden Alüminyum köpük malzemeler için Düzeltilmiş şekilde elastisite modülü elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum köpük metalleri, Sonlu Elemanlar yöntemi, çarpma, Enerji sönümlenme.

ABSTRACT

In this study, dynamic properties of aluminum based foams metals have been investigated under static and dynamic conditions. Especially the force deflection curves achieved after compression tests completed and the yield and densification points were accurately verified by using different methods. Some experiments were done at different impact velocities using similar method and they were verified with mathematical methods. After that, with the help of resultant solutions, some analyses were done by using finite element method for the unreachable impact velocities. As a result of this numerical study, energy absorption trends were achieved due to different impact conditions. Corrected Elastic modulus was achieved by using the plastic strain in the linear region which was extracted by the pure elastic strain values of the analysis results.

Key Words: Aluminum foam metals, Finite Element Method, Impact, Energy absorption

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAY SAYFASI	II
ÖZET.....	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
KISALTMALAR DİZİNİ.....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
SİMGELER DİZİNİ.....	IX
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Köpük metallerin üretim yöntemleri.....	4
2.1.1. Sıvı metal halinden üretim.....	7
2.1.2. Toz halindeki katı metalden üretim.....	9
2.1.3. Metal buharı ve gaz halinden üretim.....	11
2.1.4. Metal iyon çözeltisinden üretim.....	12
2.2. Köpük metallerin mekanik davranışları ve fiziksel özellikleri.....	13
2.2.1. Basma davranışı.....	23
2.2.2. Enerji sönmleme.....	26
2.2.3. Yorulma.....	35
2.2.4. Isıl özellikleri	37
2.2.5. Akustik özellikler.....	38
2.2.6. Patlama dayanımı davranışları.....	40
2.2.7. Deneysel gerilme gerinme eğrileri.....	43
2.2.8. Mekanik özelliklerin tayininde sonlu elemanlar yöntemi.....	61
2.3. Metalik malzemelerin test yöntemleri.....	71
2.3.1. Darbe ve çarpma testleri.....	71
2.3.2. 3 nokta ve 4 nokta eğme testleri.....	80
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	86
3.1. Alüminyum köpük malzemesi.....	86
3.2. Sonlu Elemanlar yöntemi.....	89
3.3. Eksplisit analiz temelleri.....	102
3.4. Basma testleri.....	116
3.4.1. Basma testi detayları.....	116
3.5. Çarpma testleri.....	119
3.5.1. Çarpma testleri detayları.....	119
3.6. Numerik yöntemlerle çarpma testi benzetimi.....	123
3.6.1. Katı model ve sonlu elemanlar modeli.....	123
3.6.2. Analizlerde kullanılan eleman tipleri ve malzeme modelleri.....	124

3.6.3. Analizlerde kullanılan kontak algoritması.....	126
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	127
4.1. Basma testi sonuçları ve Tartışma.....	127
4.1.1. Basma testi yük-deplasman eğrileri.....	127
4.1.2. Basma testi gerilme gerinme eğrileri.....	128
4.1.3. Basma testi sonuçlarında akma noktasının tespiti	131
4.1.4. Basma testi sonuçlarında yoğunlaşma noktasının tespiti.....	135
4.2. Basma testi sonuçlarında Elastisite modülünün tespiti.....	139
4.3. Çarpma testi sonuçları ve tartışma.....	146
4.3.1. 400 mm/sn-(1.44 km/saat) için test sonuçları.....	146
4.3.1.1. 400 mm/sn için yük-deplasman eğrileri.....	146
4.3.1.2. 400 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri.....	147
4.3.2. 800 mm/sn-(2.88km/saat) için test sonuçları.....	147
4.3.2.1. 800 mm/sn için yük-deplasman eğrileri.....	147
4.3.2.2. 800 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri.....	148
4.3.3. 1600 mm/sn-(5.76km/saat) için test sonuçları.....	148
4.3.3.1. 1600 mm/sn için yük-deplasman eğrileri.....	148
4.3.3.2. 1600 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri.....	149
4.4. Çarpma benzetimi sonuçları ve tartışma.....	152
4.4.1. 400 mm/sn-(1.44km/saat) için benzetim sonuçları.....	153
4.4.1.1. 400 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri.....	153
4.4.1.2. 400 mm/sn için yük-deplasman eğrileri.....	160
4.4.1.3. 400 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri.....	161
4.4.2. 800 mm/sn-(2.88km/saat) için benzetim sonuçları.....	162
4.4.2.1. 800 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri.....	162
4.4.2.2. 800 mm/sn için yük-deplasman eğrileri.....	167
4.4.2.3. 800 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri.....	167
4.4.3. 1600 mm/sn-(5.76km/saat) için benzetim sonuçları.....	168
4.4.3.1. 1600 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri....	168
4.4.3.2. 1600 mm/sn için yük-deplasman eğrileri.....	172
4.4.3.3. 1600 mm/sn için Gerilme-gerinme eğrileri.....	173
4.4.4. 3200 mm/sn-(11.52km/saat) için benzetim sonuçları.....	173
4.4.4.1. 3200 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri....	173
4.4.4.2. 3200 mm/sn için yük-deplasman eğrileri.....	178
4.4.4.3. 3200 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri.....	178
4.4.5. 6400 mm/sn-(23.64km/saat) için benzetim sonuçları.....	179
4.4.5.1. 6400 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri....	179
4.4.5.2. 6400 mm/sn için yük-deplasman eğrileri.....	182
4.4.5.3. 6400 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri.....	183
4.4.6. 12800 mm/sn-(46.08km/saat) için benzetim sonuçları.....	184
4.4.6.1 12800 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri...	184
4.4.6.2. 12800 mm/sn için yük-deplasman eğrileri.....	188
4.4.6.3. 12800 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri.....	188

4.4.7. 17500 mm/sn-(63km/saat) için benzetim sonuçları.....	189
4.4.7.1 17500 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri...	189
4.4.7.2. 17500 mm/sn için yük-deplasman eğrileri.....	192
4.4.7.3. 17500 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri.....	192
4.4.8. 25000 mm/sn-(90km/saat) için benzetim sonuçları.....	193
4.4.8.1 25000 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri...	193
4.4.8.2. 25000 mm/sn için yük-deplasman eğrileri.....	195
4.4.8.3. 25000 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri.....	196
4.5. Çarpma benzetimi ile çarpma testlerinin karşılaştırılması.....	197
4.5.1. 400 mm/sn için gerilme- gerinme eğrilerinin karşılaştırılması.....	197
4.5.2. 800 mm/sn için gerilme- gerinme eğrilerinin karşılaştırılması.....	198
4.5.3. 1600 mm/sn için gerilme- gerinme eğrilerinin karşılaştırılması.....	199
4.5.4. Hesaplanmış sönmümlenen enerjilerin değerleri.....	200
4.5.5. Hesaplanmış Tokluk değerleri.....	203
4.5.6. Tartışma.....	207
KAYNAKLAR.....	208
ÖZGEÇMİŞ.....	214

KISALTMALAR DİZİNİ

YYK -	Yüksek yoğunluklu köpük
DYB -	Düşük yoğunluklu köpük
DYO -	Düşük izafi yoğunluklu köpük
YMK -	Yüzey merkezli kübik
KSF -	Omurga Şok Faktörü (Keel shock factor)
LVDT-	Doğrusal değişkenli deplasman ölçer

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Hücre sel metalik malzemeler için üretim yöntemlerinin şeması.....	6
Çizelge 2.2	AlSi7 ve AlSi12 metalik köpük alaşımlarının farklı yoğunluklardaki basma mukavemetleri.....	24
Çizelge 2.3	Farklı kompozisyonlara sahip nikel esaslı köpük malzemelerin mekanik özellikleri ve gözenek boyutları.....	26
Çizelge 2.4	Alüminyum köpük metallerin ısı l özellikleri.....	37
Çizelge 3.1	İmplicit ve Eksplisit yöntemlerin karşılaştırılması.....	115
Çizelge 3.2	Köpük metal numunelerin Yoğunluk değerleri.....	117
Çizelge 3.3	Eğri uydurma yöntemi ve parametreleri.....	118
Çizelge 3.4	Örnek eğri için parametre değerleri.....	118
Çizelge 3.5	Çarpma testi hızları ve numune adetleri.....	119
Çizelge 3.6	Eğri uydurma yöntemi ve parametreleri.....	121
Çizelge 3.7	Örnek eğri için parametre değerleri.....	121
Çizelge 3.8	Rijit kabulü yapılan çelik malzeme özellikleri.....	125
Çizelge 3.9	Ezilebilir köpük malzeme özellikleri.....	125
Çizelge 4.1	Çarpma hız değerleri.....	152

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1	Farklı üretim yapıları için iç yapı değişimi	4
Şekil 2.2	Farklı Bir fazdan ikinci bir faza geçişteki dağılım.....	5
Şekil 2.3	Gaz akıtma ile doğrudan köpükleme işlemi.....	8
Şekil 2.4	Ara elemanlar ile doğrudan köpükleme işlemi.....	8
Şekil 2.5	100µm boyutunda bronz parçacıklarıyla sinterlenmiş gözenekli yapı.....	9
Şekil 2.6	Gaz tuzağı yöntemi.....	11
Şekil 2.7	Nikel Karbonil prosesi ile üretilmiş bir “Incofoam”.....	12
Şekil 2.8	Elektro-depozisyon tekniği ile metal esaslı köpük malzeme üretimi.....	13
Şekil 2.9	Köpük metal ve diğer bir enerji sönmüleyici malzemenin kıyaslanması....	16
Şekil 2.10	Basma durumunda sünek Al ve gevrek Al köpük metallerinin gerilme-gerinme cevapları.....	17
Şekil 2.11	a 0,155 izafi yoğunluğa sahip Alporas köpük metalinin mikro yapısı	19
	b Yapı kesitinin şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.12	1300 s ⁻¹ dinamik gerinme hızında mühendislik gerilmesinin gerinmenin bir fonksiyonu olarak gösterimi (YYK ve DYB köpük metal numunelerde)..	20
Şekil 2.13	Deney numunesinin kırılma yüzeyi.....	21
Şekil 2.14	AlSi7 alaşımının hücre yapısının görüntüsü.....	21
Şekil 2.15	Hücre sınırlarının görüntüsü.....	21
Şekil 2.16	Metalik Köpük yapının basma kuvveti altındaki davranışı.....	23
Şekil 2.17	ASTM D1621-73 Eksenel simetrik basma testi.....	25
Şekil 2.18	Enerji sönmüleme özelliği.....	27
Şekil 2.19	AlSi12 metalik köpük alaşımının farklı yoğunluklardaki enerji sönmüleyebilme kapasitesi.....	28
Şekil 2.20	Farklı gerinme hızlarında açık hücreli alüminyum alaşımlı köpük	

	metallerin gerilme-gerinme eğrileri.....	30
Şekil 2.21	Muhtelif gerinme hızlarında 0,9 mm hücre boyutuna sahip alüminyum alaşım köpüğünün enerji sönümlene grafiği.....	32
Şekil 2.22	Muhtelif gerinme hızlarında 1,6 mm hücre boyutuna sahip alüminyum alaşım köpüğünün enerji sönümlene grafiği.....	32
Şekil 2.23	Çarpma testi neticesinde elde edilen Gerilme-Gerinme eğrileri.....	34
Şekil 2.24	6061 Al alaşımı için S-N Eğrisi.....	36
Şekil 2.25	Farklı alaşım tipleri ve özelliklerine göre S-N eğrilerinin karşılaştırılması....	36
Şekil 2.26	AlSi12 köpük metali için farklı yoğunluk değerlerinde ses kayıp faktörleri...	38
Şekil 2.27	Farklı malzemeler için ses sönümlene yüzdeleri.....	39
Şekil 2.28	Devam eden zaman içerisindeki elde edilen iki farklı dalga formu görülmektedir. Soldaki grafik (a) genliğin devamlı bir şekilde artmasıyla elde edilen; (b) ilerleme zamanı dikkate alınmadan elde edilen dalga formu grafiği.....	40
Şekil 2.29	Alüminyum köpük malzeme üzerine patlama sonrası etkiyen basınç dalgası.	41
Şekil 2.30	Alüminyum köpük malzemelerin patlamaya karşı direnç karakteristikleri....	41
Şekil 2.31	Alüminyum köpük malzemelerin patlamaya karşı sönümlene yüzey..... matrisi (Örnek; 50kg patlayıcının, 3 metre uzaklıktan 10 atm basınç erişmesi durumundaki gerekli olan minimum kalınlık değeridir).....	42
Şekil 2.32	Alüminyum köpük dolgulu numune için basma testi yük-deplasman eğrisi..	43
Şekil 2.33	İçi boş numune için basma testi yük-deplasman eğrisi.....	43
Şekil 2.34	Alüminyum köpük dolgulu numune için çarpma testi yük-deplasman Eğrisi.....	44
Şekil 2.35	Farklı hücre yapıları için Relatif Kayma gerilmelerinin Relatif yoğunluğa göre değişimi.....	45
Şekil 2.36	a.31 adet çevrimsel yükleme için Gerilme-Gerinme eğrileri, b. Elastik bölgenin Gerilme eğrisi detayı.....	46

Şekil 2.37	Farklı malzeme tipleri için gerilme-Gerinme eğrileri.....	47
Şekil 2.38	Basma ve çekme durumları için farklı tipteki köpük malzemelerin tipik Gerilme-Gerinme eğrileri.....	48
Şekil 2.39	Farklı Alüminyum köpük malzemelerin bası yüklemesi altındaki Deformasyonları.....	49
Şekil 2.40	TiH ₂ köpük malzemesi mikro yapısı.....	50
Şekil 2.41	Al-12Si-0.6Mg köpük malzemesi mikro yapısı.....	50
Şekil 2.42	Kare petek yapılı köpük maragin çeliği için farklı hızlardaki Gerilme-Mühendislik gerinmesi eğrileri.....	51
Şekil 2.43	Farklı üreticilerin Alüminyum köpük malzemeleri için basma ve çekme gerilmesi altındaki gerilme- gerinme eğrileri.....	52
Şekil 2.44	Çekme sonucundaki yırtığın detaylı görüntüsü.....	53
Şekil 2.45	Elektro kaplama yöntemiyle üretilen Ni köpük malzemenin % uzama-gözeneklilik grafiği.....	54
Şekil 2.46	0.003 1/s deformasyon hızı ile elde edilen gerilme-gerinme grafiği.....	54
Şekil 2.47	Dinamik gerinme oranı 8×10^2 ve $1.4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$	55
Şekil 2.48	Köpük malzemenin gerilme-gerinme davranışını ısıtma işlemlerinin etkisi: (a) Gerinme değeri 0.5'e kadar olan gerilme-gerinme grafikleri. (b) üst dayanım, alt dayanım ve plato bölgesi tanımları.....	56
Şekil 2.49	Üç durum için (normal üretim, kuvvetlendirilmiş yapı, tavllanmış yapı) gerilme-gerinme grafikleri. Gerilme-gerinme grafikleri mikro-çekme testi ile elde edilmiştir. Her bir ısıtma işlemi için iki numune test edilmiştir.....	57
Şekil 2.50	Normal üretim (a kolonu), Kuvvetlendirilmiş yapı (b kolonu) ve tavllanmış yapı (c kolonu) için yüklemenin son aşamasındaki deformasyonlar.....	57
Şekil 2.51	Numune geometri üzerinde bası gerilmesi altındaki Eksenel gerinme Dağılımı.....	58

Şekil 2.52	Bası davranışının şematik gösterimi.....	59
Şekil 2.53	Farklı gerinme kademelerine göre gerime haritası.....	60
Şekil 2.54	Değişken boşluk boyutlarına bağlı olarak bası durumundaki gerilme-gerinme davranışı.....	61
Şekil 2.55	(Solda) Hücre duvarları arasına dağılmış küçük boşlukların olduğu..... Alüminyum köpük modeli ve (sağda) bir kesitinden türetilmiş birim sonlu elemanlar modeli.....	61
Şekil 2.56	Tekil ana boşluklu numune için deformasyon dağılımı, b. İlave boşlukların olduğu model üzerinde deformasyon dağılımı.....	62
Şekil 2.57	Tahmin edilen plastik gerinimleri gösteren Deforme olmuş mesh modeli.....	62
Şekil 2.58	Rastgele hücre yapıları için farklı modelleme yöntemleri.....	63
Şekil 2.59	Deneysel çalışma ile Simülasyon çalışması sonuçlarının karşılaştırılması.....	64
Şekil 2.60	Düzlemsel bası etkisi altındaki petek yapıları için temsili Mühendislik Gerilme- Gerinme eğrisi.....	65
Şekil 2.61	Hidro alüminyum köpüğün tipik hücre yapısı.....	66
Şekil 2.62	Geliştirilmiş birim hücre modeli a) üst görünüm b) isometrik görünüm.....	67
Şekil 2.63	Boyuna basma altında hidro alüminyumda oluşan bölgesel deformasyon a) %20 deformasyon b) %40 deformasyon.....	68
Şekil 2.64	%18.4 ortalama gerinimde çoklu hücre modellerinin boyuna sıkışması (a), (b) ve (c) farklı gelişmiş yoğunluk dağılımlı modeller, (d) ise sabit yoğunluklu modeldir.....	69
Şekil 2.65	%18.4 ortalama gerinimde çoklu hücre modellerinin düzlem içi sıkışması (a), (b) ve (c) farklı gelişmiş yoğunluk dağılımlı modeller, (d) ise sabit yoğunluklu modeldir.....	69
Şekil 2.66	Boyuna basma için nominal gerilme-gerinim eğrileri.....	70
Şekil 2.67	Düzlem içi basma için nominal gerilme-gerinim eğrileri.....	71
Şekil 2.68	Sarkaç tipi darbe test cihazının gösterimi.....	72

Şekil 2.69	Izod darbe testinin şematik gösterimi.....	74
Şekil 2.70	a Charpy testinde kullanılan V çentikli numune boyutları b Vurucu kafanın numuneye çarpma biçimi.....	75
Şekil 2.71	“S” eğrisi.....	76
Şekil 2.72	Ağırlık düşürme darbe testi şematik gösterimi.....	78
Şekil 2.73	Eğme test modu.....	80
Şekil 2.74	Gerilme-gerinme diyagramı.....	81
Şekil 2.75	3 nokta eğme testi.....	83
Şekil 2.76	Eğme test düzeneği.....	84
Şekil 3.1	Deney numunesi dış yüzeyi.....	86
Şekil 3.2	Farklı boyutlardaki Numune yüzeyleri.....	87
Şekil 3.3	70 kat büyütme için Hücre duvarları elektron mikroskobu görüntüsü.....	87
Şekil 3.4	200 kat büyütme için Hücre duvarları elektron mikroskobu görüntüsü.....	88
Şekil 3.5	15 kat büyütme için Hücre duvarları elektron mikroskobu görüntüsü.....	88
Şekil 3.6	Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanlar.....	90
Şekil 3.7	Eleman geometrisinde müsaade edilebilir deformasyonlar.....	91
Şekil 3.8	Bir silindirik yüzey etrafındaki tipik eleman dağılımı.....	92
Şekil 3.9	Bir delikli geometride delik etrafındaki tipik eleman dağılımı.....	92
Şekil 3.10	Sabit Gerilmeli Üçgen Eleman.....	94
Şekil 3.11	Dört Nodlu Çifte Lineer Dörtgen Eleman.....	95
Şekil 3.12	Dört nodlu ve dört kenarlı elastik eleman (x,y eksenleri eleman düzlemi içindedir).....	97
Şekil 3.13	İki ucu basit mesnetli kiriş.....	98
Şekil 3.14	a. Eksplisit dinamik analiz ile araba çarpma/çarpışma benzetimleri b. Eksplisit dinamik analiz ile levha ve kütle şekillendirme.....	102
Şekil 3.15	Parçanın mermi tarafından delinmesinin benzetimi.....	103
Şekil 3.16	Lagrange Uzayında Bulunan 3 Boyutlu Cisim, b Cisim içindeki bir	

	noktada gerilme durumu.....	105
Şekil 3.17	Geometrik uzayın elemanlara bölünmesi.....	107
Şekil 3.18	Düzlem bir elemanda 2X2 Gauss entegrasyon noktalarında gerilme hesabı...	112
Şekil 3.19	Hourglassing ile eleman şeklindeki bozulmalar.....	114
Şekil 3.20	Deney numunesinin basma sırasındaki deformasyonu.....	116
Şekil 3.21	Deney numunesi boyutları.....	116
Şekil 3.22	Test sonucundaki deney numunesi.....	117
Şekil 3.23	a. Eğri uydurma yöntemi ile elde edilen örnek yük -deplasman eğrisi b. Örnek yük-deplasman eğrisi için 1. türevin değişim eğrisi.....	118
Şekil 3.24	a Çarpma testi hazırlık aşaması b Test numunesinin sabitlemesi.....	119
Şekil 3.25	Çarpma testi sonrası numunenin şekli.....	120
Şekil 3.26	Çarpma testi sonuçlarından eğri uydurma yöntemi ile elde edilen örnek yük -deplasman eğrisi.....	122
Şekil 3.27	Örnek yük-deplasman eğrisi için 1. türevin değişim eğrisi ve İntegral Değişimi.....	122
Şekil 3.28	Numunenin katı modeli ve sonlu elemanlar modeli.....	123
Şekil 3.29	Test kurulumunda numune, sabit blok ve hareketli silindir.....	123
Şekil 3.30	Analizlerde kullanılan kabuk eleman / Shell 163.....	124
Şekil 3.31	Analizlerde kullanılan katı eleman / Solid164.....	124
Şekil 4.1	Basma testi yük-deplasman eğrisi.....	127
Şekil 4.2	Basma testi mühendislik gerilme - gerinme eğrileri.....	128
Şekil 4.3	Basma testi Gerçek gerilme - gerinme eğrileri.....	129
Şekil 4.4	Basma testi Gerçek mühendislik gerilme - gerinme eğrileri.....	130
Şekil 4.5	Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 100 kez.....	132
Şekil 4.6	Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 100 kez.....	133
Şekil 4.7	Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 1000 kez.....	134

Şekil 4.8	Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 100 kez.....	136
Şekil 4.9	Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 1000 kez.....	137
Şekil 4.10	Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 10000 kez...	138
Şekil 4.11	Plastik bileşen içeren gerinme değeri için Elastisite modülü hesaplama.....	141
Şekil 4.12	Akma noktasının başlangıç değerindeki gerilme dağılımı.....	141
Şekil 4.13	Akma noktasının başlangıç değerindeki plastik gerinme (EPPS).....	142
Şekil 4.14	Akma noktasının başlangıç değerindeki plastik gerinme detayı (EPPS).....	143
Şekil 4.15	400 mm/sn için çarpma testi yük-deplasman eğrileri.....	146
Şekil 4.16	400 mm/sn için çarpma testi gerilme – gerinme eğrileri.....	147
Şekil 4.17	800 mm/sn için çarpma testi yük-deplasman eğrileri.....	147
Şekil 4.18	800 mm/sn için çarpma testi gerilme – gerinme eğrileri.....	148
Şekil 4.19	1600 mm/sn için çarpma testi yük-deplasman eğrileri.....	148
Şekil 4.20	1600 mm/sn için çarpma testi gerilme – gerinme eğrileri.....	149
Şekil 4.21	Analiz modelinde sonlu elemanlar modeli ve kontak çiftleri.....	152
Şekil 4.22	Farklı aşamalardaki numune deformasyonları.....	153
Şekil 4.23	Deforme olmuş katı model görünümü.....	153
Şekil 4.24	~20 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	154
Şekil 4.26	~20 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	155
Şekil 4.26	Bası gerilmesi için Mohr çemberi.....	155
Şekil 4.27	0.051. saniyedeki x yönündeki deformasyon.....	156
Şekil 4.28	~0.0825. saniyedeki X yönündeki deformasyon.....	157
Şekil 4.29	~0.1. saniyedeki X yönündeki deformasyon.....	157
Şekil 4.30	~ 32mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	158
Şekil 4.31	~32 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	159
Şekil 4.32	~ 40mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	159
Şekil 4.33	~ 40mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	160
Şekil 4.34	~ 40mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı (element	

	gösterimi).....	161
Şekil 4.35	400 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri.....	162
Şekil 4.36	400 mm/sn için Analiz gerilme-gerinme eğrileri.....	162
Şekil 4.37	~20 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	163
Şekil 4.38	~20 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	164
Şekil 4.39	0.0255. saniyedeki x yönündeki deformasyon.....	164
Şekil 4.40	0.042. saniyedeki x yönündeki deformasyon.....	165
Şekil 4.41	~32 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	165
Şekil 4.42	~ 32mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	166
Şekil 4.43	~ 40mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	166
Şekil 4.44	~ 40mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı (element gösterimi).....	167
Şekil 4.45	800 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri.....	168
Şekil 4.46	800 mm/sn için Analiz gerilme-gerinme eğrileri.....	168
Şekil 4.47	~ 20 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	169
Şekil 4.48	~ 20 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	170
Şekil 4.49	0.0135. saniyedeki x yönündeki deformasyon.....	170
Şekil 4.50	~ 33 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	171
Şekil 4.51	~ 33mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	171
Şekil 4.52	~ 33mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı (element Gösterimi).....	172
Şekil 4.53	~ 42mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	172
Şekil 4.54	~ 42mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	173
Şekil 4.55	1600 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri.....	173
Şekil 4.56	1600 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri.....	174
Şekil 4.57	~23 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	175
Şekil 4.58	~23 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	176

Şekil 4.59	0.0075. saniyedeki x yönündeki deformasyon.....	176
Şekil 4.60	~33 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	177
Şekil 4.61	~33 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	177
Şekil 4.62	~42 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	178
Şekil 4.63	~42 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	178
Şekil 4.64	3200 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri.....	179
Şekil 4.65	3200 mm/sn için analiz gerilme – gerinme eğrileri.....	179
Şekil 4.66	~19 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	180
Şekil 4.67	~19 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	180
Şekil 4.68	0.003. saniyedeki x yönündeki deformasyon.....	181
Şekil 4.69	~37 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	181
Şekil 4.70	~37 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	182
Şekil 4.71	~47 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	182
Şekil 4.72	~47 mm deformasyon sırasındaki x yönündeki gerilme dağılımı.....	183
Şekil 4.73	6400 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri.....	183
Şekil 4.74	6400 mm/sn için analiz gerilme – gerinme eğrileri.....	184
Şekil 4.75	~19 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	185
Şekil 4.76	~19 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	185
Şekil 4.77	0.0015. saniyedeki x yönündeki deformasyon.....	186
Şekil 4.78	~38 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	186
Şekil 4.79	~47 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	187
Şekil 4.80	~60 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	187
Şekil 4.81	~59 mm deformasyon sırasındaki x yönündeki gerilme dağılımı.....	188
Şekil 4.82	~59 mm deformasyon sırasındaki x yönündeki gerilme dağılımı (element gösterimi).....	188
Şekil 4.83	12800 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri.....	189
Şekil 4.84	12800 mm/sn için analiz gerilme – gerinme eğrileri.....	189

Şekil 4.85	~38 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	190
Şekil 4.86	~38 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	190
Şekil 4.87	0.0015. saniyedeki x yönündeki deformasyon.....	191
Şekil 4.88	~58 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	191
Şekil 4.89	~58 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	192
Şekil 4.90	~58 mm deformasyon sırasındaki x yönündeki gerilme dağılımı (element gösterimi).....	192
Şekil 4.91	17500 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri.....	193
Şekil 4.92	25000 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri.....	193
Şekil 4.93	~38 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	194
Şekil 4.94	~38 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı.....	194
Şekil 4.95	0.0015. saniyedeki x yönündeki deformasyon.....	195
Şekil 4.96	~79 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı.....	195
Şekil 4.97	~79 mm deformasyon sırasındaki x yönündeki gerilme dağılımı (element gösterimi).....	196
Şekil 4.98	25000 mm/sn için analiz yük deplasman eğrileri.....	196
Şekil 4.99	25000 mm/sn için analiz gerilme – gerinme eğrileri.....	197
Şekil 4.100	400 mm/sn için test ve analiz gerilme – gerinme eğrileri.....	198
Şekil 4.101	800 mm/sn için test ve analiz gerilme – gerinme eğrileri.....	199
Şekil 4.102	1600 mm/sn için test ve analiz gerilme – gerinme eğrileri.....	200
Şekil 4.103	Farklı için Analiz yük-deplasman eğrileri karşılaştırması.....	201
Şekil 4.104	Farklı için Sönümlenen enerji değerlerinin karşılaştırılması.....	202
Şekil 4.105	Farklı için Sönümlenen birim enerji değerlerinin (m^3) karşılaştırılması.....	203
Şekil 4.106	Farklı hızlar için Analiz gerilme-gerinme eğrileri karşılaştırması.....	203
Şekil 4.107	Farklı hızlar için hesaplanan tokluk değerlerinin karşılaştırması.....	204
Şekil 4.108	Farklı hızlar için hesaplanan birim tokluk (m^3) değerlerinin karşılaştırması...	205

SİMGELER DİZİNİ

σ	- Gerilme
σ_{VM}	- Eşdeğer Gerilme
σ_1	- Maksimum asal gerilme
σ_2	- Ortalama asal gerilme
σ_3	- Minimum asal gerilme
ε_t	- Toplam gerinme
ε_e	- Elastik gerinme
ε_p	- Plastik gerinme
E	- Elastisite modülü
E_d	- Düzeltilmiş Elastisite modülü
$E_{Köpük}$: Köpük malzemenin elastisite modülü
E_{Kati}	: Alüminyumun elastisite modülü
Υ	- Poisson oranı
Σ	- Türev
k	- Statik Sürtünme katsayısı
μ	- Dinamik Sürtünme katsayısı
σ_{ij}	- Cauchy gerilme tensörünü
[D]	- Büyüklük alanının nodlardaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör
[R]	- Bilinen yük vektörü
[K]	- Bilinen sabitler matrisi
[M]	- Kütle matrisi
σ_{ij}	- Cauchy gerilme tensörünü,
ρ	- Malzemenin o anki yoğunluğunu
$\rho_{Köpük}$	- Köpük malzemenin yoğunluğu
ρ_{Kati}	- Alüminyumun yoğunluğu
$n_j S_T$	- Zorlama yüzeyine normal doğrultuda olan birim dış vektörü
$\delta\varepsilon_{ij}$	- Virtüel yer değişimi
δx_i	- Virtüel gerilme tensörü
ni	- Elemanın düğüm noktası sayısı
$N_\alpha \alpha$	- Düğüm noktasındaki şekil fonksiyonu
$\delta x_{\alpha i}$	- Düğüm noktasındaki yer değiştirmeleri
$x_{\alpha i}$	- Düğüm noktasının yer değiştirmesi

- \dot{x}_{ai} - Dügüm noktasının hızı
 \ddot{x}_{ai} - Dügüm noktasının ivmesi
 V_m - Elemanın hacmi
 n - Titreşim deneyleri kullanılarak elde edilen elastisite değeri ile yoğunluğun oluşturduğu doğrunun eğimini

1 GİRİŞ

Son yıllarda üretim sektörünün ihtiyaçlarına yönelik olarak, bilhassa alüminyum ve alaşımlarından üretilmiş köpük metaller gibi büyük oranlarda gözenek içeren metalik malzemelere olan ilgi artmıştır. Bu durumu tetikleyen olgu ise teknolojik üretim yöntemleri kullanılarak daha düşük maliyetli fakat daha yüksek kaliteli malzemelerin üretilmesi gerçeğidir. Bunun yanında, talepler doğrultusunda malzemelerin kullanım alanlarının farklılaşması ve genişlemesi diğer bir unsurdur.

Köpük metaller 1943 yılında Benjamin Sosnick tarafından keşfedilmiştir. Ergimiş alüminyum içinde köpükleştirici olarak civa kullanarak kendi deyimiyle “Sünger Metal”i oluşturmuştur. Bu yıldan sonra 1990 yılına kadar bu metaller üzerine ciddi araştırmalar yapılmamıştır. Fakat gelişen yeni üretim teknolojileri o yıllarda piyasalara birkaç köpük metalin takdimine olanak tanımıştır. Şu ana kadar köpüklendirilmiş metallerin ve alaşımların listesi oldukça uzundur. Bunlar arasında uygulamalarda en büyük potansiyele alüminyum, demir ve titanyum esaslı olanları sahiptir. Karbon, bakır, kurşun, kalay ve çinko malzemelerden köpük metal geliştirilmesi konusundaki çalışmalar hâlihazırda devam etmektedir. Bunlara ek olarak; köpük karbon bir yapı üzerine tantal, tungsten, zirkonya çökeltilerinin oluşturulmasına yönelik çalışmalar da mevcuttur. Yapı içinde köpük oluşumu platin, gümüş, silisyum karbür ve nikel kullanılarak sağlanmaktadır.

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

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

Otomobil üreticileri 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 hızla artmaktadır.

Bununla beraber günümüzde hafif sayılan (düşük yoğunluklu) metal alaşımlarının endüstride en çok aranan ve üzerine yatırım yapılan bir araştırma dalı haline gelmesi köpük metallerin kullanım alanlarını artırmaktadır. Özellikle yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve kabul edilebilir üretim maliyetlerine ulaşılması otomotiv sektöründe köpük metallerin potansiyel kullanım sahalarını genişletmiştir.

Daha birkaç sene öncesine kadar teknik ve ekonomik nedenlerden dolayı göz ardı edilen fakat günümüzde otomobillerde yolcu güvenliği veya geri dönüşümü daha kolay malzemeler için artan talepler köpük metalleri çekici bir hale getirmiştir.

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

Bu değişim otomobil üzerinde kendisini önemli bir şekilde hissettirmektedir. Otomobil karoserinde güvenlik amaçlı kullanılan bazı 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 sönümleyebilme 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 ve toplamda 100–150 kilogram civarında bir tasarruf sağlamıştır.

Açık hücreli köpük metaller birbiri ile bağlantılı kenarlardan oluşmuş ağlar gibi düşünülebilir. Böyle bir yapı akışkanların gövdesi boyunca geçişine olanak sağlamaktadır. Kapalı hücreli yapıda belirtilen durum kenarlar boyunca mevcut hücre duvarları nedeniyle mümkün değildir. Hücre duvarları birbirine bitişik boşluk ağları tarafından ortaklaşa da kullanılabilir. Her iki yapının bir arada bulunabildiği malzemeler de mevcuttur.

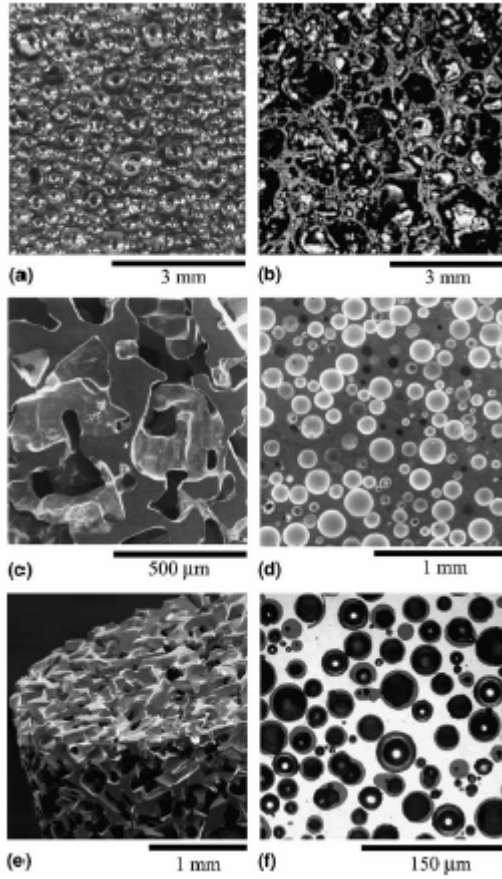
Bunun yanında ısı özelliklerinin, elektrik geçirgenliklerinin belirlenmesi, ses sönümleme ve akustik karakteristiklerinin çıkartılması başka kullanım alanları bulmalarına olanak sağlayacaktır.

2 KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Köpük Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Brothers ve Dunand (2006) tarafından, amorf köpük metallerin üretim yöntemlerindeki zorluklar ve gelecekteki muhtemel uygulamalar üzerine bir çalışma yapılmıştır.

Mevcut üretim yöntemlerinin zorlukları ve bu yöntemlerle üretilen köpük metallerin mekanik özelliklerindeki dramatik değişkenlikler incelenmiştir.



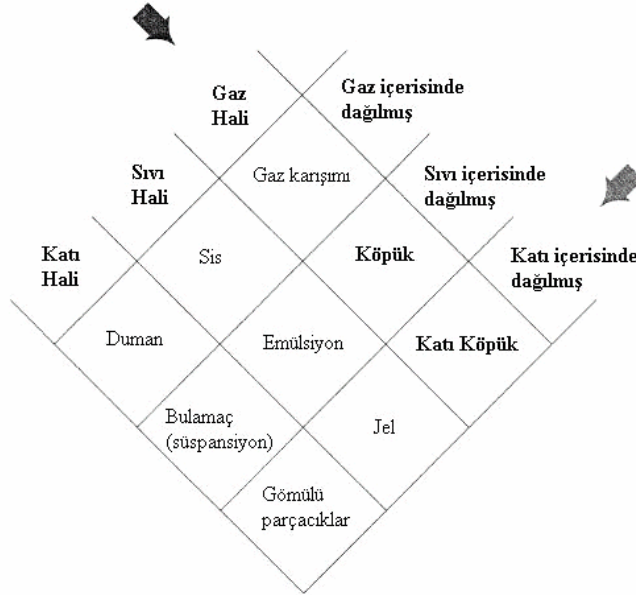
Şekil 2.1. Farklı üretim yapıları için iç yapı değişimi (Brothers ve Dunand 2006)

Şekilde 2.1'de görüldüğü gibi matris yapı ile gaz tarafından doldurulan küresel yapılar birbirleri ile büyük benzerlikler göstermektedir. Farklı üretim teknikleri ile elde edilen küresel, kapalı hücre yapılar 100 mikron'luk bir kontrol hacmi içinde benzer yapıdadırlar (Brothers ve Dunand 2006).

Banhart (2000) çalışmasında köpük metal üretim tekniklerini, avantaj ve dezavantajlarını incelemiştir. Metalik köpük malzemeler son yıllarda endüstriyel uygulamalardan, bilimsel çalışmalara kadar pek çok alanda araştırma konusu olmuştur.

Her ne kadar metal köpükler üzerinde yoğun araştırmalar sürse de, hücre yapısının köpük özellikleri üzerindeki etkisi halen açıkça ortaya konulamamıştır. Bunun en önemli nedeni köpük metal üretim parametrelerinin kontrolünün zorluğu ve henüz tam olarak bu kontrolün sağlanamamış olmasıdır (Matijasevic ve Banhart 2005)

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



Şekil 2.2 Farklı Bir fazdan ikinci bir faza geçişteki dağılım (Banhart 2000)

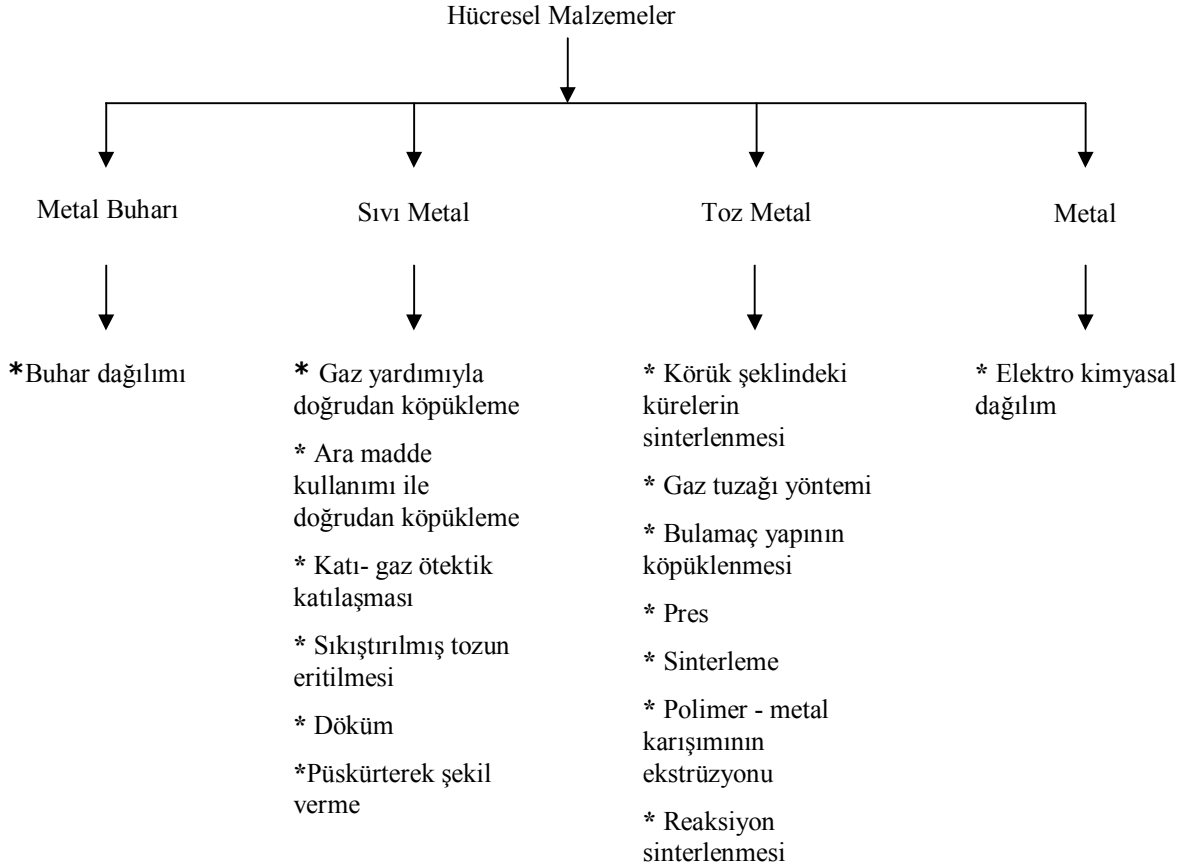
Bir fazdan diğer bir faza geçerken mümkün olan bütün dağılımların sıralandığı şekle göre köpük malzemeler gaz fazından gelen düzenli bir dağılımı katı ya da sıvı halde göstermektedirler (Şekil 2.2). Orijinal anlamı göz önünde bulundurulduğunda köpük: Bir sıvı içerisinde gaz baloncuklarının dağılmasıyla oluşmaktadır.

Bu yapılarda sıvı katılaşmasına izin verilerek köpük morfolojisi korunmuştur. Sonuçta oluşan yapı “Katı Köpük” halini almıştır. Al esaslı ya da Nikel esaslı köpük malzeme olarak bahsedilen malzemeler de aslında katı köpük yapılarıdır. Köpük

yapıların üretiminde birçok 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. Çizelge 2.1’de görülmekte olan bu değişik metotlar metalin faz durumuna göre sınıflandırılabilir.

Çizelge 2.1 Hücresel metalik malzemeler için üretim yöntemlerinin şeması



KAYNAK: Banhart 2000

Uçak ve ark. Fraunhofer enstitüsüne ait toz metalürjisi yöntemini kullanarak AA6061 tozları ve TiH₂ tozlarını kullanarak homojen bir karışım elde etmişler ve köpürtme işlemi ile teorik yoğunluğa yakın değerde bazı köpük parçalar elde etmişlerdir. Bu yöntemle üç boyutlu karmaşık yapılar, yüzeyi sac metal içi köpük dolu

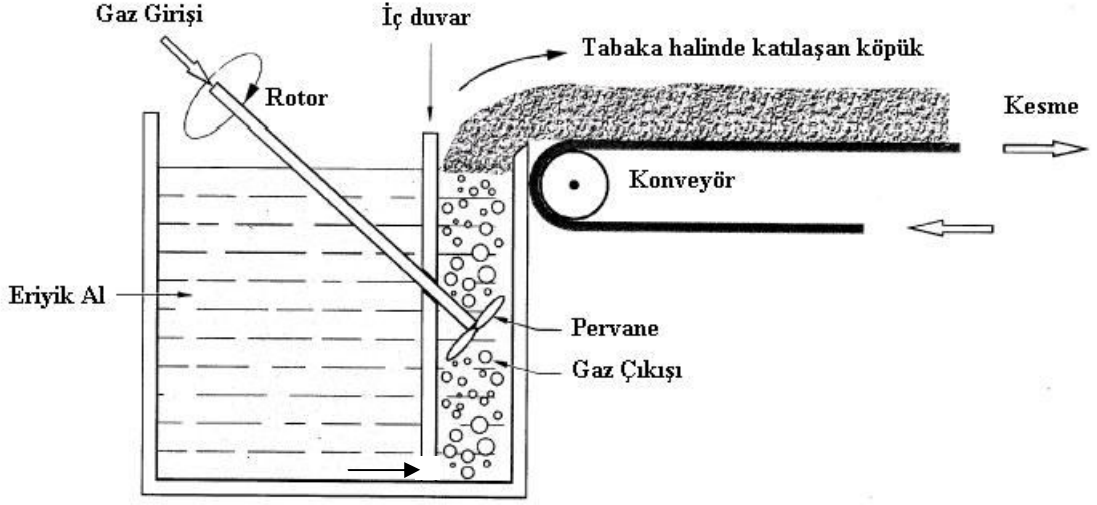
çarpışma kutuları üretilmektedir (Uçak ve ark. 2006). Alüminyum köpüklerin otomotiv sektöründeki kullanım alanları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir (Kennedy ve Asavavisitchia 2004);

- Tavan Panelleri
- A ve B sütunları
- Enerji sönümleyici çarpışma kutuları
- Kapı iç yan darbe kutuları
- Ön çarpışma çubukları
- Şase ve rol-barlar
- Askeri araçlarda patlamayı hafifletici paneller

2.1.1. Sıvı Metal Halinden Üretim

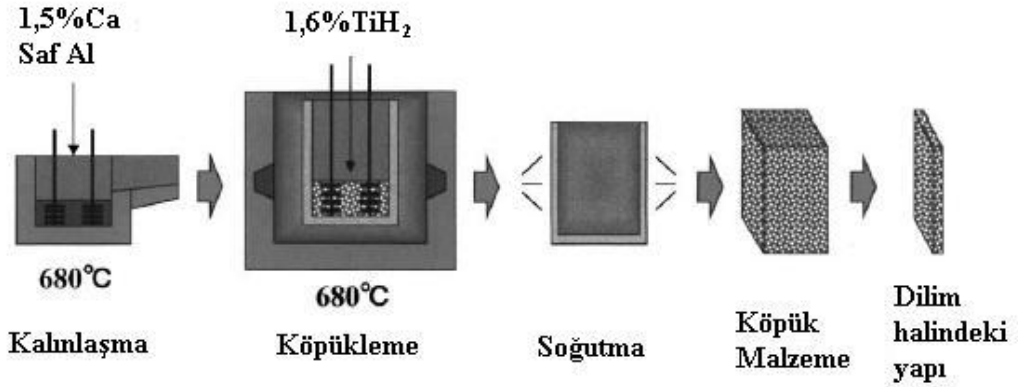
Ergiyik metal içerisinde doğrudan gaz baloncukları yaratılarak köpük malzeme elde edilebilir. Normal şartlar altında gaz balonları yüksek yoğunluklu sıvı içerisindeki kaldırma kuvveti sebebiyle hızlı bir şekilde yüzeye çıkmaya çalışırlar. Fakat bu yükseliş ergiyik metalin viskozitesi artırılarak engellenir. Bu işlem ince taneli seramik tozlarının ya da alaşım elementlerinin ergiyik yapıya katılmasıyla gerçekleştirilir.

Al ve Al-alaşımaları için bahsedebileceğimiz ilk üretim şekli Hydro Aluminum (Norveç) ve Cymat Aluminum (Kanada) firmalarının güncel bir şekilde kullandıkları yöntemdir. Bu yöntemde silisyum karbür, alüminyum oksit ya da magnezyum oksit parçacıkları, eriyik viskozitesini arttırmak amacıyla kullanılır. Bu yüzden üretim sürecindeki ilk adım bu eriyiğin hazırlanmasıdır. İkinci adımda hazırlanmış ergiyik içerisine özel bir şekilde hazırlanmış döner pervane veya titreşim nozulu yardımıyla gaz (hava, azot, argon) enjekte edilir. Bu parçaların hassasiyeti, oluşturulacak balonların dağılımı ve büyüklüğü açısından önemlidir. Balonların ve ergimiş metalin oluşturduğu karışım sıvı yüzeyine çıkararak kurur. Konveyör yardımıyla dışarıya alınır. Üretim şeması şekilde 2.3'de görülmektedir.



Şekil 2.3 Gaz akıtma ile doğrudan köpükleme işlemi (Banhart 2000)

Diğer bir alternatif üretim şekli ise gaz yerine ara maddeler kullanarak sıvı halden köpük malzeme elde edilmesidir. Sıcaklık artışıyla beraber ara madde (blowing agents) ayrışması esasına dayanır. Şekilde 2.4’de bu sürecin şeması görülmektedir.



Şekil 2.4 Ara elemanlar ile doğrudan köpükleme işlemi (Banhart 2000)

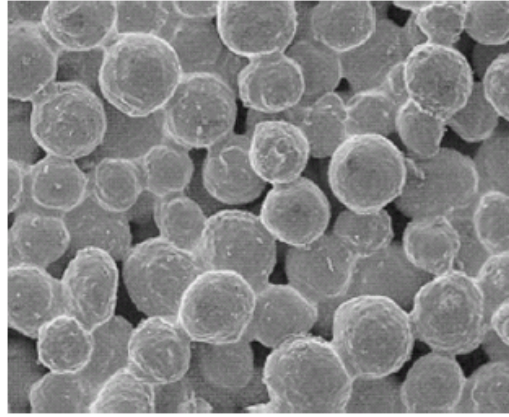
Bu yöntemde kalsiyum metali, 680°C sıcaklıkta eriyik saf alüminyum metalinin içine katılır. Asıl köpük üretimi için ağırlıkça %1,5–3 kalsiyum eklenir. Oluşan eriyik, kalsiyum oksit (CaO) veya yapıyı katılaştıran kalsiyum alüminyum oksit (CaAl₂O₄) oluşumu sebebiyle viskozitesi faktör 5’e yükselene kadar birkaç dakika karıştırılır.

Viskozitenin istenilen değere ulaşmasından sonra, sıcak viskoz sıvı içerisinde 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.

2.1.2. Toz Halindeki Katı Metalden Üretim

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

Bu üretim çeşitliliği içerisinde, serbest doldurma ve ağırlık sinterlemesi (gravity sintering) bronz malzeme ($Cu_{89}Sn_{11}$) için en çok tercih edilen yöntemlerdir. Sinterleme sıcaklığı $820^{\circ}C$ civarındadır ve yapının mukavemeti oldukça düşük iken bu sıcaklık değerinde % 20 ila 50 arasında gözenekli yapı elde edilebilir. Benzer bir yapıdaki malzeme şekil 2.5’de görülebilir.



Şekil 2.5. 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

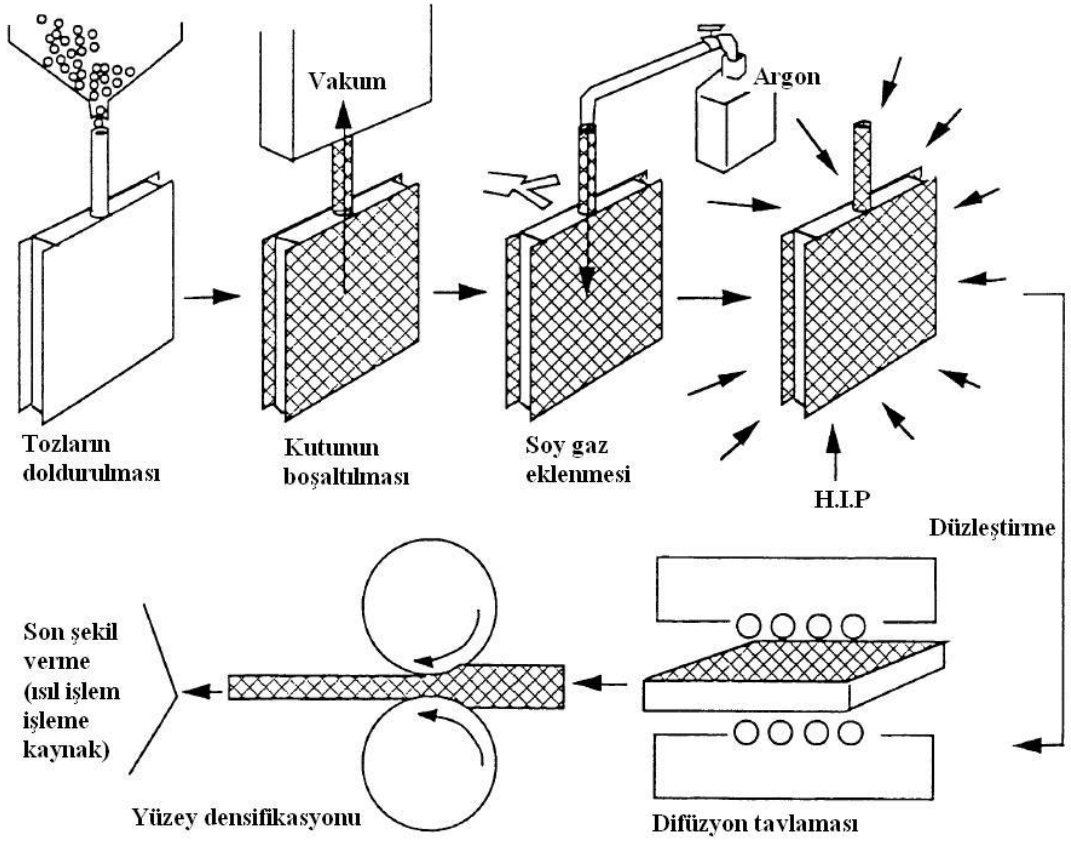
tabakasını kırmak için deforme edilebilir. Böylece parçacıklar arasında metalik bağlar oluşturulabilir.

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 metallere, ara bir eleman kullanmadan ya da ergiyik metal elde etmeden de üretilir. 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 sürünme işlemidir.

Sıvı halde bulunan metalin hızlı şekilde soğutulması ve stabilitesinin artırılması gerekmektedir. Bunun için direk olarak suda soğutulması ve bir fan yardımı ile soğutulması arasındaki farklar meydana gelecektir (Uçak ve ark. 2006).

Bu metot uçak üreticisi Boeing (USA) tarafından gözenekli titanyum yapıların üretilmesinde kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da 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 2.6. Gaz tuzağı yöntemi (Banhart 2000)

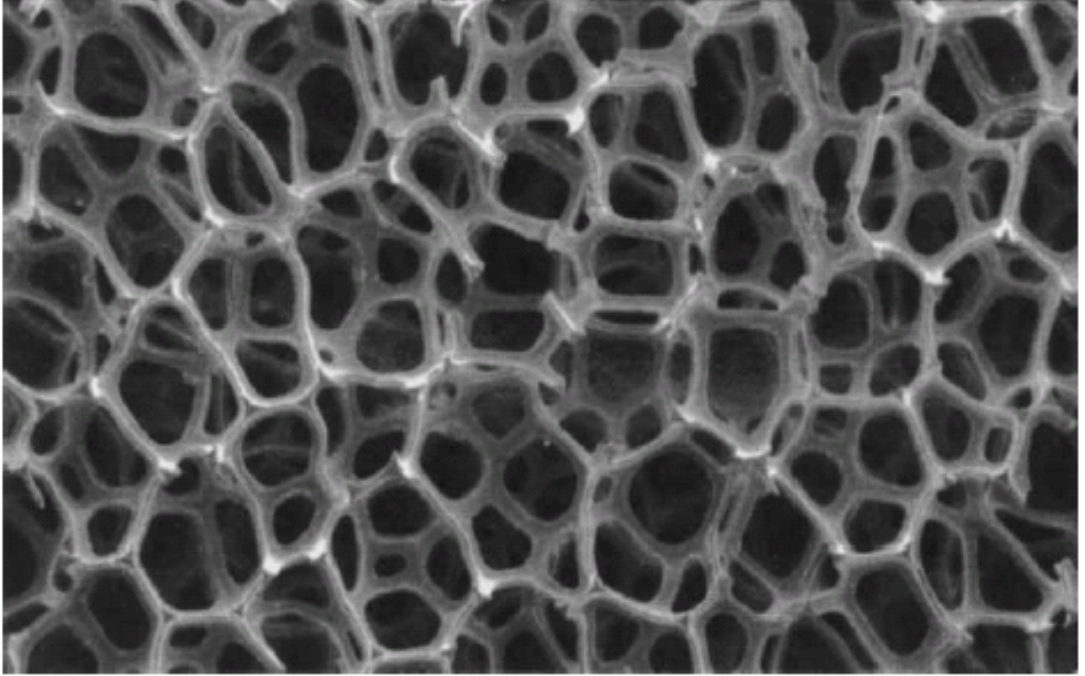
Böylece argon gazı sıkışır ve düzgün bir şekilde dağılmış yapı oluşturur. Yoğun halde bulunan bu malzemeye gerçek gözenekli şeklini vermek için uygun olan tavlama yöntemlerinden biri kullanılır. Tavlama işlemi 6 – 24 saat arası bir süre alır (Banhart 2000).

2.1.3. Metal Buharı ve Gaz Halinden Üretim

Metalik köpük malzemeler gaz halindeki metallere veya gaz halindeki metalik parçalardan üretilebilir. 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 yoğunlaştırma amaçlı gönderilir. Yoğuşmuş metal polimer öncü

malzemenin dış yüzeyini kaplar. Buharın yoğunluğu ve oluşma zamanı ile tanımlanabilen belirli bir kalınlıkta film tabakası oluşur.

Bu işlemin 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 ilemlerle kaldırılabilir. Aynı malzemedan başka bir tabaka ile kaplanabilir. Şekil 2.7’de görülen bu Nikel esaslı köpük malzemenin “Incofoam” adında ticari bir ismi bulunmaktadır (Banhart 2000).

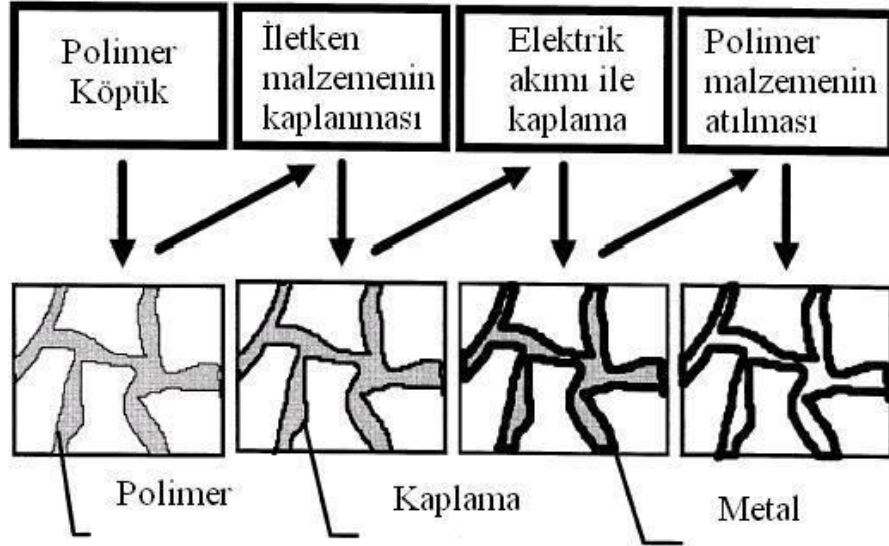


Şekil 2.7. Nikel Karbonil prosesi ile üretilmiş bir “Incofoam” (Banhart 2000)

2.1.4 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 2.8’de verilmiştir.

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



Şekil 2.8. Elektro-depozisyon tekniği ile metal esaslı köpük malzeme üretimi (Banhart 2000)

2.2 Köpük Metallerin Mekanik davranışları ve fiziksel özellikleri

Degisher ve Kriszt (2002) köpük metallerin mekanik davranışlarını ve enerji sönümlenme kapasiteleri ile ilgili çalışmalar yapmışlardır.

Metalik olmayan köpük malzemeler ve katı metallerle karşılaştırıldığında köpük metallerin birçok avantajları mevcuttur. Metalik olmayan köpüklere göre daha yüksek katılık, ağırlığına göre daha yüksek dayanım, yüksek darbe enerjisi sönümlenme kabiliyeti, yüksek sıcaklık dayanımı ve elverişsiz koşullara uygunluk başlıca avantajlarıdır. Katı metallerle kıyasla, köpük metaller daha yüksek katılık ve hücrelerin boyut, şekil ve hacimsel oranlarının ayarlanmasıyla çok geniş bir uygulama alanının taleplerine cevap verebilecek şekilde mekanik özelliklerinin ayarlanabilmesi gibi avantajları vardır (Degisher ve Kriszt 2002).

Marchi ve Mortensen (2001) bası yüklemesi altında yüksek saflıktaki alüminyum köpüklerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu köpükler homojen ve açık hücre yapısına sahip olup, hücre boyutları 500 mikron mertebesindedir. Elde edilen sonuçlara göre deformasyonlar genel olarak uniform ve düzlem gerilme bölgesi haricindeki bölgelerde gerilme sertleşme özellikleri dolu metallerle benzerlikler göstermektedir (Marchi ve Mortensen 2001).

Bir köpük metal malzemenin mekanik özelliklerini belirleyen en önemli iki parametre; bu metalin sahip olduğu hücresel yapı ve izafi yoğunluğudur. Köpük metaller açık, kapalı veya her ikisinin kombinasyonu olacak şekilde bir hücresel yapıya sahip olabilirler

Yapısal malzemelerin en önemli özelliklerinden biri “modül” olarak tanımlanan farklı yükler altındaki lineer elastik davranışlarının belirlenebilmesi zorunluluğudur. İzotropik malzemelerin lineer elastik cevaplarının karakterize edilebilmesi için iki farklı modülün bilinmesi gerekmektedir. Bunlar; Elastisite modülü (E) ile kayma modülüdür (G). Üretim yöntemlerindeki farklılıklar nedeniyle bazı köpük metaller anizotropik özellik göstermektedir (Degisher ve Kriszt 2002). Bundan dolayı, lineer elastik davranışın belirlenebilmesi için daha fazla modül tanımına ihtiyaç vardır.

Aslında köpük metaller konusunda bu tip modüllerin yerine malzemenin katılığı teriminin kullanılması daha doğru olacaktır. Henüz çok yeni bir malzeme grubu olan bu metallerin genel malzeme özelliklerinin belirlenmesinde modüller büyük kolaylıklar sağlasa da, hücresel metallerin yapısına bağlı olan Elastisite modülü gibi kavramlar tek başına bir malzeme sabiti olarak kullanılamazlar (Degisher ve Kriszt 2002).

Açık ve kapalı hücreler arasında temel farklılıklar mevcuttur. Açık hücreli köpükler birbirleri ile bağlantılı kenarlardan oluşmuş bir ağ yapıdadır. Bu türde temel deformasyon mekanizması hücre kenarlarının bükülmesidir. Daha yüksek izafi yoğunluklarda $\rho_x > 0.1$, bükülmenin yanı sıra kenarlar uzar ya da kısalırlar. (Degisher

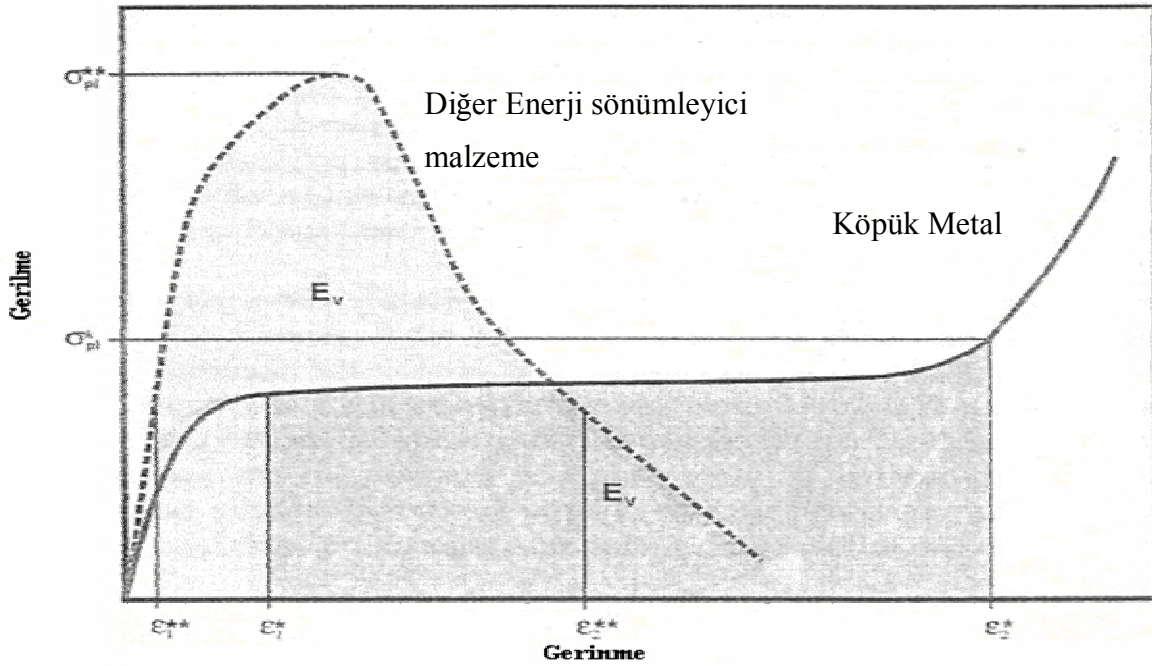
ve Kriszt 2002). Kapalı hücreli köpük metallerde hücre kenarları arasında bulunan hücre duvarları yapıyı mukavimleştirmektedir. Kenarların uzaması, kısalması ve bükülmesi yanında duvarlardaki duvar gerilmeleri deformasyon mekanizmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu türde hücre duvarlarının mevcudiyetinden kaynaklanan nispeten daha fazla kısıtlamalar nedeniyle Elastisite modülü aynı izafi yoğunluğa sahip açık hücreli yapılarla karşılaştırıldığında teorik olarak daha büyüktür.

Hücre duvar ve kenarlarının kütleşmesi gibi yapı içindeki hataların katılık üstüne önemli etkileri mevcuttur. Bu tip hataların yüksek oranlara ulaşması köpük metalin Elastisite modülüne büyük bir etkide bulunur. Hücre büyüklüğü, şekli ve bu gibi varyasyonların etkisi daha küçük ölçeklidir. Üretim süreci boyunca yapısal parametreler kolay bir şekilde kontrol edilemediğinden köpük metallerin elastik katılık bağımlılığının sonlu elemanlar analizi çalışmaları bu deneysel gözlemleri destekleyecek muhtelif parametrelere göre gerçekleştirilmektedir (Degisher ve Kriszt 2002).

Hücre duvar ve kenarlarının bükülmesi, burkulması, uzaması ve kırılması ile meydana gelen deformasyonlar köpük metalin yapısını değiştirecektir. Bu nedenle, Elastisite modülü uzama miktarı (gerinme) ile değişecektir. Genel olarak bir sünek köpük metalin gerilme-yüzde uzama eğrisinde sadece çok küçük bir yer lineer elastik bölgedir. Bundan dolayı Elastisite modülü ölçümü oldukça zordur. Birçok araştırmacı belirli bir yüzde uzama değerinde ölçüm yapmakta ve bunu malzeme sabiti olarak kullanmaktadır "E". Dolayısıyla bu modülün hangi gerinme değerinde elde edildiğinin bilinmesi önemlidir. Çünkü artan deformasyon miktarı ile "E" modülü de değişmektedir (Degisher ve Kriszt 2002).

Elastisite modülünün çekmeye nazaran bası gerilmeleri altında artan yüzde uzamayla (ϵ) çok daha hızlı bir şekilde düşer. Bu durum bükülen hücre duvarları ve kenarların katılığı düşürmesine dayandırılmaktadır. Hâlbuki çekme gerilmesi oluşturacak yükleme koşulları altında esneme, hücre duvarlarında çatlakların oluşması öncesinde katılığı arttırmaktadır.

Diğer sönümleyicilerle kıyaslandığında bu malzemelerin gerilme-gerinme cevaplarındaki avantaj Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Bu grafikte eğri altında kalan alan birim hacim tarafından sönümlenen enerji miktarını E_v vermektedir. Hem köpük metalde hem de diğer enerji sönümleyici malzemede bu değer aynıdır (Degisher ve Kriszt 2002). Şekle dikkatlice bakıldığında diğer malzemenin sönümleme esnasında ulaştığı gerilme değerinin daha fazla olduğu ve plato bölgesine sahip olmadığı görülmektedir. Bu durum darbe esnasında ortaya çıkan atalet kuvvetlerini arttırmaktadır. Bu nedenle istenen darbe enerjisi sönümlense bile ortaya çıkan kuvvetler nedeniyle araç içindeki yolcu ve sürücü güvenliğini tehlikeye sokabilecek bir durum oluşmaktadır. Köpük metallerde basma durumunda gözlemlenen plato rejimi kinetik enerjinin dengeli, sürekli ve daha düşük gerilmelerde sönümlenme imkânını sunmakta ve sahip oldukları hafiflik avantajlarıyla da ilerleyen yıllarda otomotiv endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılacağı inancını doğurmaktadır

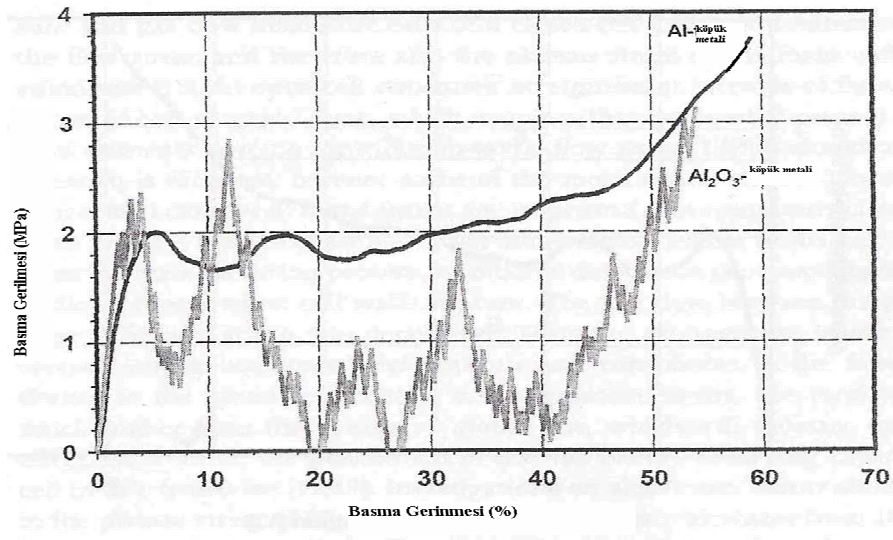


Şekil 2.9. Köpük metal ve diğer bir enerji sönümleyici malzemenin kıyaslanması (Degisher ve Kriszt 2002).

Köpük metalin üzerindeki yüklemenin daha da artırılması; bu metalin daha zayıf bölgelerindeki hücre duvarları ve kenarlarının limit seviyelerde bükülmesine

neden olur. Yükleme yönüne dik bir bantta hücrelerin plastik çökmelerinin meydana geldiği bir durum gelişir. Böylelikle gerilme-gerinme eğrisinde plato bölgesi denilen bir aşamanın başlaması söz konusudur. Artan gerinme (yüzde uzama) değerleriyle, birçok hücrenin de çökmesi ile sonuçlanan ardı ardına gelişen deformasyon bantları oluşur. Yine aynı eğride görülebilecek yoğunlaşma bölgesine ulaşılır (O'Neill2004).

Hücresel yapıya ve ana metalin özelliklerine bağlı olarak, gerilme-gerinme eğrisinin plato bölgesi düz olmayabilir. Malzeme gevrekliğinin sonucu olarak eğrinin bu bölümü dalgalı bir durum sergileyebilir. Şekil 2.10'da tek bir grafik üzerinde sünek bir Alüminyum köpük malzeme ile gevrek Alüminyum köpük metalin sahip oldukları düz ve dalgalı plato davranışlarını göstermektedir (O'Neill 2004).



Şekil 2.10. Basma durumunda sünek ve gevrek Alüminyum köpük metallerin gerilme-gerinme cevapları (O'Neill 2004).

Yeni bir tür mühendislik malzemesi olarak köpük metaller; basma yükleri altında elde edilen gerilme-gerinme eğrisinde mevcut uzun bir plato bölgesine sahip olduğundan potansiyel bir enerji sönmüleyici malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır (Mukai 2005).

Metalik köpüklerin üretimindeki ilerlemelere paralel gelişmeler otomobil, demiryolu ve uzay endüstrileri gibi alanlarda çok geniş bir uygulama alanı potansiyeli sunmaktadır. Bu alanlara yönelik tasarım uygulamalarında, mevcut malzemenin çok geniş bir gerinme hızı aralığındaki mekanik özelliklerinin en ince ayrıntılarına kadar karakterize edilmesi gerekmektedir. Köpük metallerin; sanki-statik(Quasi-static) yükleme koşulları altındaki dayanımları ve Elastisite modülleri gibi mekanik özellikleri üzerine birçok araştırmacı tarafından ayrıntılı çalışmalar yapılmıştır. Buna karşın; dinamik koşullar altında benzer özelliklerin tayini konusundaki çalışmalar çok kısıtlıdır. Bunun en önemli nedeni; metal köpüklerin mekanik özelliklerinin yüksek gerinme hızlarında belirlenebilmesinin oldukça zor olmasıdır (Mukai 2005).

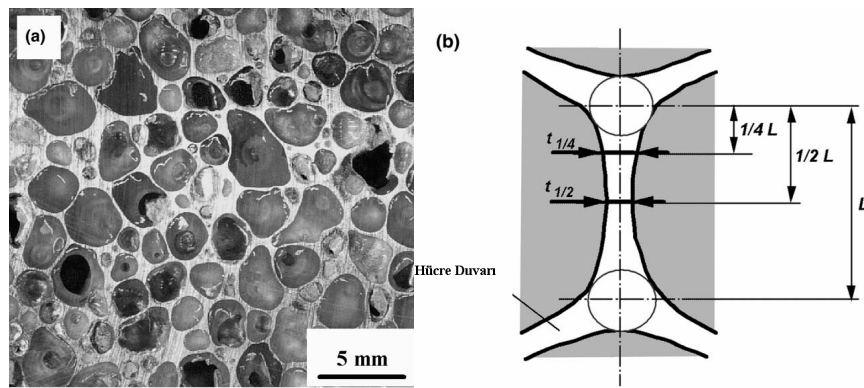
Kennedy ve Asavavisittchai (2004); enerji sönmüleyici olarak yoğun bir şekilde kullanılan açık hücreli Alcan köpüğünde 10^{-3} - 10^3 s^{-1} aralığındaki gerinme hızlarında pekleşme davranışı gözlemlenmediğini belirtmiştir. Kennedy ve Asavavisittchai; mekanik dayanımın gerinme hızına bağımlılığının açık hücreli Duocell ve kapalı hücreli Alulight köpük metallerinde ihmal edilebilecek düzeylerde olduğunu kanıtlamıştır.

Öte yandan Mukai (2006) ve birçok araştırmacı Al-Ca-Ti esaslı bir alaşımdan üretilen kapalı hücreli Alporas köpük metalinin, açık hücreli AZ91Mg ve SG91A AL köpüklerinin 4×10^2 - $2,5 \times 10^3$ s^{-1} gibi geniş gerinme hızı aralığında belirgin bir şekilde pekleşme davranışı sergilediğini ispatlamıştır.

Japonya'da Mukai (2006) tarafından yapılan deneylerde kapalı hücreli Alporas köpük metalinin pekleşme davranışı yüksek gerinme hızlarında ölçülmüştür. Ayrıca bu çalışmada dinamik gerinme hızlarında izafi yoğunluğun artırılmasının basma gerilmesine etkisi hakkında sonuçlara da ulaşılmıştır. AZ31 magnezyum alaşımlı destek barları kullanılarak ~ 560 s^{-1} gerinme hızında basma testleri gerçekleştirilerek sonuçlar yorumlanmıştır

Numune olarak kapalı hücreli; izafi yoğunluğu 0.155 olan Alporas köpük metali kullanılmıştır ($\rho_x = 0.155$ olan metal; yüksek yoğunluklu köpük olarak; YYK şeklinde temsil edilecektir). Bu köpüğün yapısı Şekil 2.11.a'da gösterilmektedir. Deney öncesinde hücrelerin ortalama boyutu $\sim 2,4$ mm olarak bulunmuştur. Daha düşük yoğunluklu iki köpük metal numune de izafi yoğunluğun etkisini göstermek üzere bu deneye dâhil edilmiştir. Bu numunelerden birisi daha büyük bir hücre boyutuna sahiptir; $\sim 3,74$ mm ve düşük izafi yoğunluklu büyük hücreli köpük malzeme olarak DYB notasyonu ile gösterilecektir. Üçüncü numune ise DYB köpük metali ile aynı izafi yoğunluğa sahiptir; $\sim 0,106$. Fakat bu numunenin hücre boyutu $\sim 3,0$ mm olarak ortalama bir büyüklüktedir ve düşük izafi yoğunluklu ortalama büyüklükteki hücreli köpük malzeme olarak DYO notasyonu ile gösterilecektir.

Deneyde her üç köpüğün de yapısal analizini yapmak için optik mikroskop kullanılmıştır. Numuneler üzerinde herhangi 200 hücre kenarından alınan ölçümlerle kenar uzunlukları; L ve hücre duvarlarının kalınlıkları ölçülmüştür. Hücrelerin yapısal karakterizasyonunun şematik gösterimi Şekil 2.11.b' de mevcuttur. Yapılan ölçümler sonucunda YYK köpüğünün; kenar uzunluğunun belirgin bir şekilde küçük olduğu görülmüştür. Hücre duvar kalınlığının kenar uzunluğuna oranı; YYK malzemede, DYB ve DYO köpüklere göre oldukça büyük olması durumu yapılan deneylerde hücre duvarlarının zar gerilmelerini arttıracak sonucunu doğurmaktadır (Mukai 2005).

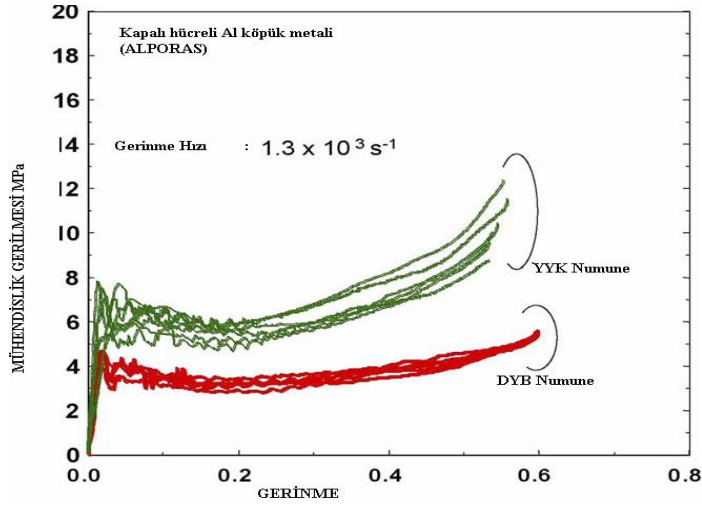


Şekil 2.11.a 0,155 izafi yoğunluğa sahip Alporas köpük metalinin mikro yapısı
b Yapı kesitinin şematik gösterimi (Mukai 2005).

Şekil 2.12’de YYK köpüğünün plato gerilmesinin, bu metalin daha büyük izafi yoğunluğa sahip olması nedeniyle, DYB numuneye göre iki kat fazla olduğu görülmektedir. Yüksek yoğunluklu numune diğerine kıyasla 0,2 gerinme değerinin üstünde belirgin bir şekilde pekleşme sergilemektedir. Aynı ana malzemedan üretilmiş, farklı izafi yoğunluklara sahip iki numunenin böylesine bir durum ortaya koymasının temel nedenleri olarak;

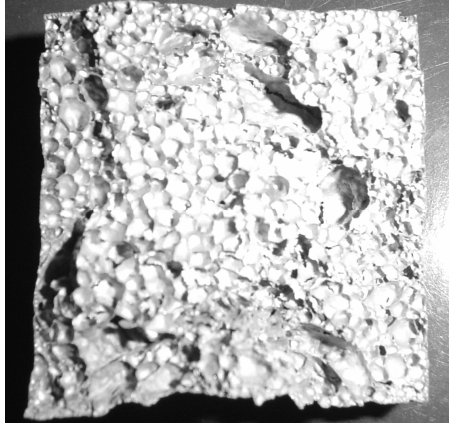
- İzafi yoğunlukla artan duvar kalınlığının kenar uzunluğuna oranı

Hücre kenarlarının tüm yapı hacmine oranı şeklinde düşünülmektedir



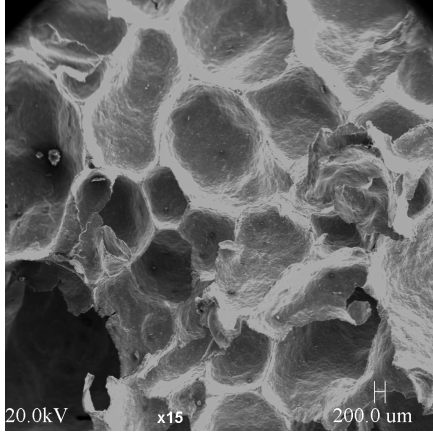
Şekil 2.12. 1300 s^{-1} dinamik gerinme hızında mühendislik gerilmesinin gerinmenin bir fonksiyonu olarak gösterimi (YYK ve DYB köpük metal numunelerde) (Mukai 2005)

Bir köpük malzemenin içyapısı, gözenek boyutu, gözenek dağılımı ve benzeri parametrelerin tayininde elektron mikroskopisi önemli bir yer tutmaktadır. OKA ve ark. (2006), köpük malzeme numuneleri üzerine çeşitli elektron mikroskobu çalışmaları yaparak, içyapı ve köpüklenme yüzeyleri hakkında daha geniş bilgiler elde etmişlerdir. Şekil 2.13’de ilgili alüminyum köpük malzeme görülmektedir.

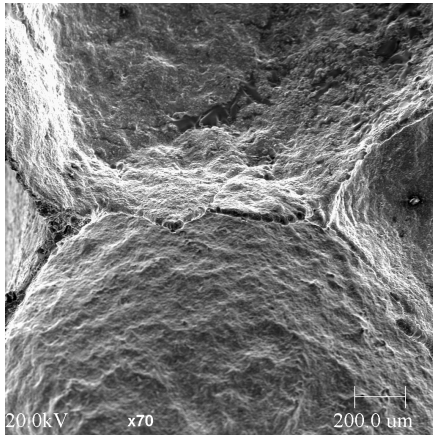


Şekil 2.13. Deney numunesinin kırılma yüzeyi (Oka ve ark.2006).

Elektron mikroskobu çalışmaları sonucu elde edilen farklı büyütme değerlerine sahip mikrograflar elde edilmiştir. Bunlar şekil 2.14 ve 2.15’de görülmektedir.



Şekil 2.14. AlSi7 alaşımının hücre yapısının görüntüsü(Oka ve ark. 2006).



Şekil 2.15. Hücre sınırlarının görüntüsü (Oka ve ark.2006).

Oka ve ark. (2006) elde edilen görüntüleri işleyerek, nümerik modele taban teşkil edecek şekilde bir geometri elde etmişlerdir.

Elde edilen bu modeli yaptıkları deneysel çalışmada çıkan yük deplasman eğrileri ile hazırladıkları nümerik model ile yapılan analizler sonucunda çıkan eğriler ile karşılaştırmışlardır. Deneysel çalışma ile nümerik hesaplar arasındaki farklar malzeme modellerindeki yetersizlikten (non linear etkiler göz ardı edildiği için) ve 2 boyutlu kabullerden kaynaklanmaktadır (Oka ve ark. 2006).

Bir malzemenin plastik deformasyon göstermeden (Hooke bölgesinde) birim hacim başına yüklenebileceği elastik şekil değiştirme enerjisinin büyüklüğü rezilyans olarak tanımlanabilir (Demirci 2004) . Tokluk içinde Rezilyans ile bağlantılı bir tanım verilebilir. Farkları ise tokluk kinetik enerjinin kopma meydana gelene kadar depolanmasıdır. Bu tanımdan hareket ile bir malzemenin enerji depolayabilme yeteneği akma mukavemeti ve Elastisite modülüne bağlıdır. Rezilyans direk olarak bu faktörlerden etkilenir.

Bu tanımlar arasındaki bileşke kümesi aslında tokluk enerjisinin içinde Rezilyans değerinin de bulunmasıdır. Pratikteki uygulamalarda elastik olarak depolanan enerji sistem bünyesinde barındırılacağı için darbe içeren uygulamalar için genellikle tokluk ve sönmölenen enerji esastır.

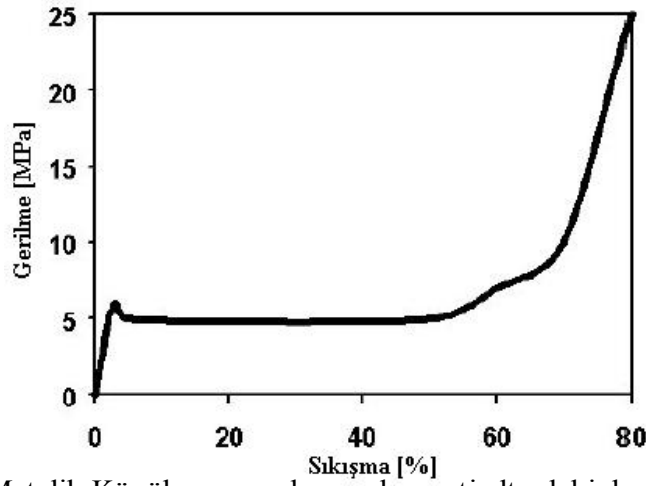
Saf alüminyum için önemli mekanik özellikler aşağıdaki gibidir;

Yoğunluk	: 2.7 g/cm ³
Ergime sıcaklığı	: 660 C
Elastisite modülü	:65000-70000 MPa
Akma Dayanımı	: 20 - 30 MPa
Çekme Dayanımı	: 70-140 MPa (Demirci 2004)

2.2.1 Basma Dayanımı

Metalik köpük yapıların basma mukavemeti metal yapılara kıyasla farklı bir davranış gösterir. Basma kuvvetine maruz kalan bölgelerde metalik köpük yapının davranışını Şekil 2.16'daki diyagram çok iyi özetlemektedir.

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 (Oka ve ark. 2006).



Şekil 2.16. Metalik Köpük yapının basma kuvveti altındaki davranışı (Fraunhofer 2007)

Çizelge 2.2'deki değerler aşağıdaki 2.1 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.

n : Titreşim deneyleri kullanılarak elde edilen elastisite değeri ile yoğunluğun oluşturduğu doğrunun eğimini göstermektedir ($1,5 \leq n \leq 2,5$).

Al-köpük metallerin basma davranışları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Hansen ve ark. (2002) Al esaslı köpük malzemelerin çarpma davranışını inceledikleri makalelerinde şekil 2.16' ya 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

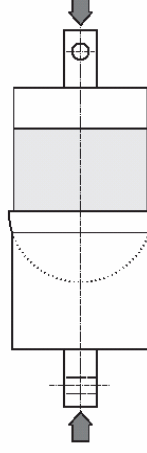
Çizelge 2.2. AlSi7 ve AlSi12 metalik köpük alaşımlarının farklı yoğunluklardaki basma mukavemetleri

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

KAYNAK: Fraunhofer 2000

Fraunhofer Enstitüsünde 'de uygulandığı gibi YU ve ark. (2002) köpük malzeme esaslı bir bloğun basma testi sonucunda oluşan gerilme – şekil değiştirme eğrisini 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 ark.ndan 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 Burman’ ın kullandığı deney tesisatı Şematik olarak görölmektedir.



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

Öchsner ve Lamprecht (2002) de yaptıkları eř eksenli basma testinde benzer deney düzeneğini kullanmışlardır. Basma testi çerçevesinde yapının morfolojisini (geometri, açık veya kapalı hücre), gözenek boyutunu ve yoğunluğu en önemli yapısal parametreler olarak göstermişlerdir.

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.

Çizelge 2.3’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 (Oka ve ark. 2004).

Çizelge 2.3. 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

KAYNAK: Oka ve ark. 2004

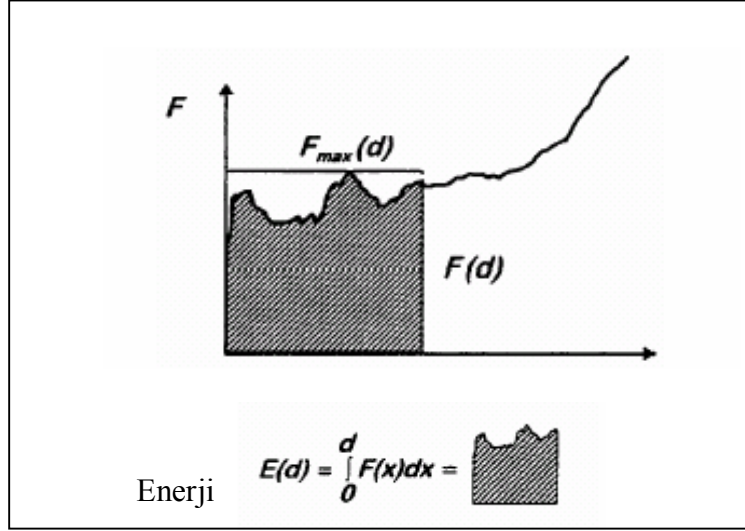
2.2.2 Enerji Sönümlenmesi

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. 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 2007).

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 sönümlemesi basma testi ile hesaplanabilir.

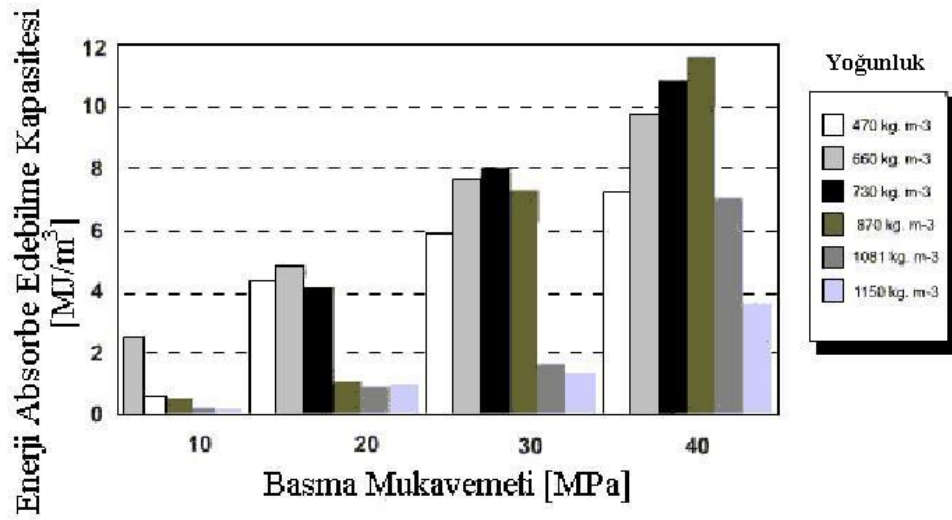
Absorbe edilmiş enerji miktarı, basma mesafesine bağlı olarak basma kuvvetinin entegralidir. Şekil 2.18’de kuvvet-basma mesafesi grafiği görülmektedir.



Şekil 2.18. Enerji sönümleme özelliği (Fraunhofer, 2007)

Metalik köpük malzemeler, darbe enerjisini sönümleyen diğer yapılara kıyasla fazla miktarda darbe enerjisini nispeten düşük gerilme değerlerinde absorbe ederler. Bu özellik, insanları ve kırılgen 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 (Oka ve ark. 2004).

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).

Alüminyum köpük metalinin darbeyi yönden bağımsız bir şekilde sönümlemesi diğer birçok 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 sönümleme miktarının %40 arttığını elde etmişlerdir.

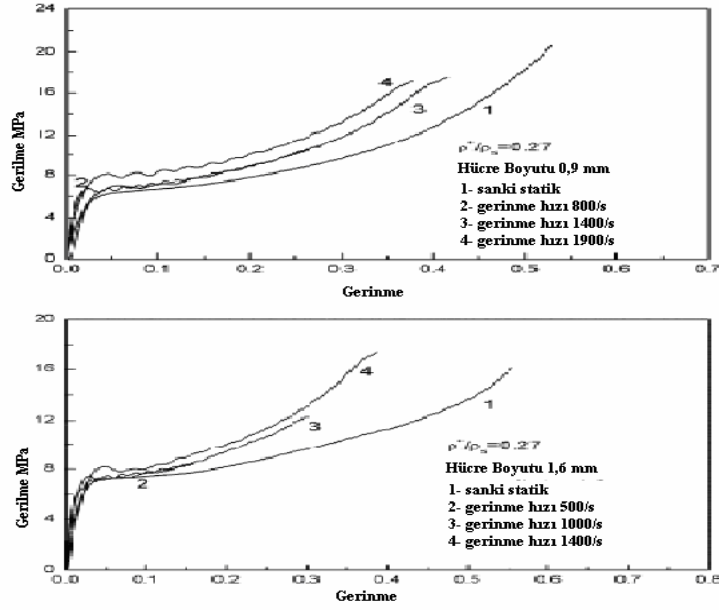
Alporas (Japonya bulunan Shinko adlı bir tel firmasının ürettiği kapalı hücre köpük malzemenin ticari ismi) üzerinde çalışma yapan Kumar ve ark. (2002), düz ve küresel tabanlı ıstampalar kullanarak köpük malzemenin enerji sönümlemesini incelemişlerdir. 30 mm kalınlığındaki ıstampalar parça yüzeyinden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

Bir malzeme grubunun darbe enerjisini verimli bir şekilde sönümleyebilmesi için; malzemenin nispeten düşük bir gerilme dalgalanması ile deforme olması gerekmektedir. Bilhassa deformasyonun hemen başında gözlemlenen ve darbeye sistemle beraber maruz kalmış insanın dokuları ve beyinde ciddi yaralanmalara neden olabilecek düzeyde ani ivmelenmelerin önüne geçilebilmesi için köpük metallerde maksimum plato gerilmesi noktasının minimize edilmesi gerekmektedir (Oka ve ark. 2004).

Son yıllarda otomotiv, raylı sistemler ve havacılık endüstrisinde hafif metallere olan ilgi, konfor isteği ve hafiflik nedenlerinden dolayı oldukça artmıştır. Köpük metallere aracın bir yayaya veya diğer bir taşıta çarpması sırasında sönümledikleri enerji sayesinde önem kazanmaktadır. Etkin şekilde enerji sönümlemesi için malzemelerde uzun bir düzlem gerilme bölgesine ihtiyaç vardır. Burada gerine artarken gerilme değerlerinin neredeyse aynı kalması enerji sönümleme mekanizmalarını harekete geçirmektedir (Miyoshi ve Itoh 1999). Düzlem gerilme bölgesi karakteristiği matris yapısı ile oynanarak veya yoğunluk değişimi ile elde edilebilir. Thornton ve Magee (1995) kapalı hücre alüminyumun kompozisyonu ve ısıl işlem özelliklerini değiştirerek düzlem gerilme bölgesinin değişimini saptamışlardır.

Dinamik ve statik basma testlerinde elde edilen gerilme-gerinme eğrilerindeki en temel ve yegâne farklılık; dinamik koşullardaki eğrilerin dalgalanmalar içermesidir. Bu durumun en önemli nedeni olarak hücre duvarlarının plastik deformasyonlarının kararlı olmaması olarak gösterilebilir (Zhihua 2005).

Köpük metallere pekleşme davranışı üzerine yapılan araştırmalar sonucunda yazılan makalelerde, bu metallere plato gerilmesi pekleşmesine yönelik iki farklı görüş mevcuttur. Bazı araştırmacılar; bazı köpük metal türlerinin belirgin bir şekilde pekleşme davranışı gösterdiğini ispatlamıştır. Fakat birçok köpük metal türünde ise plato gerilmesi değerinin gerinme hızından bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.20. Farklı gerinme hızlarında açık hücreli alüminyum alaşımlı köpük metallerin gerilme-gerinme eğrileri (Zhihua 2005).

Şekil 2.20'den de belirgin bir şekilde görüleceği gibi lineer elastik bir bölge ancak çok düşük gerinme değerlerinde (0,05'ten daha küçük) mevcuttur ve gerinme hızından bağımsızdır. Bu grafiğin bir sonucu olarak açık hücreli köpük metallerde dinamik gerinme hızlarında dahi hücre boyutu değişiminin, hücre kenarlarının plastik deformasyonuna etkisinin ihmal edilebilecek düzeylerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum; köpük metallerinde sanki statik gerinme hızlarında hücre boyutu etkisi hakkında vardığı sonuçlarla uyumluluk sergilemiştir.

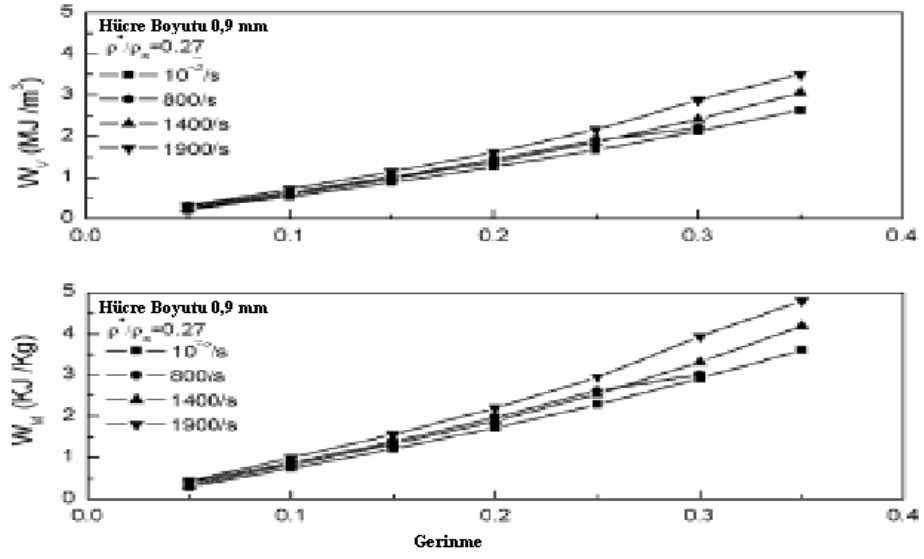
Şekil 2.21'de farklı izafi yoğunluklardaki açık hücreli alüminyum alaşımlı köpük metalin muhtelif gerinme hızlarında elde edilen gerilme-gerinme eğrileri görülmektedir (Zhihua 2005).

Zettl ve ark. (2000) Köpük metalin üretildiği ana malzemenin pekleşme özelliğinde gerinme bağımlılığının belirlenmesinde alüminyum alaşımlı köpük metaller üzerinde dinamik testler gerçekleştirmiştir. Gerinme hızları 10^{-4} ile 10^3 arasında değiştirildiğinde, mevcut numunelerin plato gerilmelerinde ancak %15'lik bir artış olduğu belirtilmiştir.

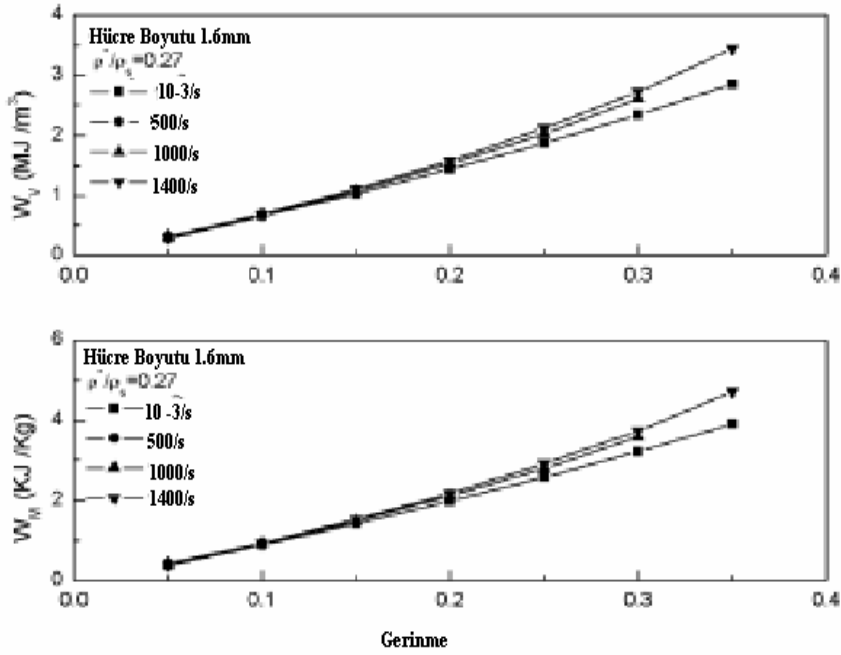
Alporas grubu hariç diğer tüm alüminyum alaşımlı köpük metallerde pekleşme davranışı gözlemlenmemesinin temel nedeninin hücre sel yapıyla ilintili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kapalı hücreli köpük metallerde artışın nispeten daha fazla oluşu, deformasyon sırasında hücreler içinde sıkışan havanın dayanımı bir miktar arttırması olarak açıklanmaktadır. Dinamik basma koşulları altında hücre yapısının harici (fiziksel özellikler) özellikleri mikro düzeydeki yapısal özelliklere oranla daha baskındır.

Daha önce de belirtildiği gibi sönümlenen enerji miktarı artan izafi yoğunluk değeri ile artmaktadır. Bu durum; izafi yoğunlukla akma gerilmesinin artması ve böylelikle gerilme-gerinme eğrisi altındaki alanın da artmasından kaynaklanmaktadır. Farklı hücre boyutlarına sahip metalik köpüklerin enerji sönümlenme kabiliyetlerine gerinme hızının etkisinin belirlenebilmesi için aynı yoğunluk değeri temeline dayalı bir karşılaştırmanın yapılması gerekmektedir. Şekil 2.21 ve 2.22; farklı gerinme hızlarında %5, %10, %15, %20, %25, %30 ve %35 'lik bası gerinmelerinde muhtelif hücre çaplarına sahip alüminyum alaşımlı köpük metallerin enerji sönümlenme kapasitelerini göstermektedir. 10^{-3} ile 1400 s^{-1} arasında değişen gerinme hızlarında, %35 gerinme değerinde daha büyük hücre boyutuna sahip köpüğün enerji sönümlenme kapasitesi 2.85 ile 3.44 MJ/ m^3 ve birim kütle başına %20 artışla 3,91 ile 4,72 kJ/kg arasında değişmektedir. Aynı yüzde gerinme değerinde daha küçük hücreli köpüğün sönümleyebildiği enerji; birim hacim başına 2,73 ile $3,25 \text{ MJ/ m}^3$ arasında değişirken, birim kütle başına bu değer 3,76 ile 4,46 kJ/kg olarak belirtilmektedir.

Bu durum; köpük metallerin enerji sönümlenme konusunda kendilerine en yakın malzeme grubu olan yüksek dayanımlı polimer köpüklerden çok daha fazla darbe enerjisi soğurabildiğinin bir kanıtıdır. İlgili alaşımlı alüminyum köpüklerin hem akma dayanımında hem de enerji sönümlenmesinde ihmal edilebilecek düzeyde gerinme hızı bağımlılığı (pekleşme) gösterdiğinin belirtilmesi gerekmektedir. Darbe enerjisinin sönümlenmesi için belirli uygulamalara yönelik yapılacak malzeme seçimi öncesinde; uygulanabilir köpük türlerinin kesin bir pekleşme davranışı analizinin yapılması büyük önem taşımaktadır



Şekil 2.21. Muhtelif gerinme hızlarında 0,9 mm hücre boyutuna sahip alüminyum alaşım köpüğünün enerji sönümleme grafiği (Zhihua 2005)



Şekil 2.22. Muhtelif gerinme hızlarında 1,6 mm hücre boyutuna sahip alüminyum alaşım köpüğünün enerji sönümleme grafiği (Zhihua 2005)

Ashby ve ark. (2000) köpük metallerin üretim teknikleri, karakterizasyon yöntemleri, mekanik özellikleri ve tasarımda malzeme seçimleri konularında temel bilgileri bir araya getirmişlerdir.

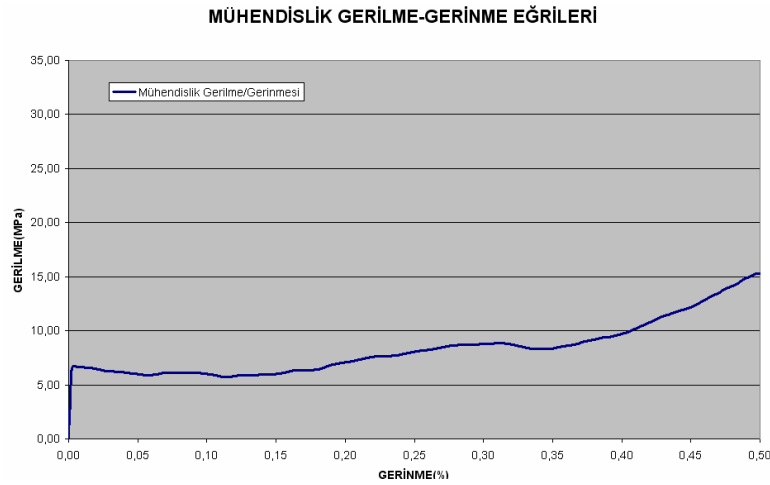
Bu çalışmaya göre köpük metallerin potansiyel kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- **Hafif yapılar** : eğilme davranışı olarak ağırlık oranlarına göre mükemmel katılığa sahiptirler.
- **Sandviç birimler** : Köpük metallere oldukça iyi kesme ve kırılma mukavemeti özelliklerine sahip ve düşük yoğunluklulardır.
- **Mekanik sönümlenme**: Köpük metallerin sönümlenme kapasiteleri katı metallere karşılaştırıldığında 10 kata kadar daha yüksektirler.
- **Titreşim kontrolü** : Köpük metallere, katı saclarla karşılaştırıldığında aynı yüzey alanında sahipken doğal frekansları daha yüksektir.
- **Akustik sönümlenme** : Akustik sönümlenme performansları ağırlık oranlarına göre oldukça yüksektir.
- **Enerji yönetimi** : Köpük metallere neredeyse sabit basınç altında enerji sönümlenme özelliğine sahiptirler.
- **Termal özellikler** : Yüksek termal geçirgenliğe sahip hücre köşeleri ısı alan dolgu malzemesi olarak kullanılırlar.

Ashby ve ark. (2000) ayrıca köpük metallerin yapısal, mekanik karakteristiklerinin tayin edilmesine yönelik de çalışmalar yapmıştır.

Yapısal karakteristik belirlemek amacıyla yapılan testlerde numune hazırlama önemli bir aşama oluşturmaktadır. İç yapının tayin edilmesine yönelik X ışınları tomografi cihazları, taramalı elektron mikroskopları kullanılmaktadır. Genel olarak köpük metallere topolojilerine göre (açık ve kapalı hücre) , rölatif yoğunluklarına göre, hücre boyutu ve şekillerine göre sınıflandırılırlar (ASHBY ve ark. 2000).

Oka ve Uguz (2008) yaptıkları çalışmada farklı hızlardaki çarpma testleri ile alüminyum köpük malzemenin enerji sönümlenme kapasitesi incelemiş, sayısal yöntemler ve deneysel çalışma arasında korelasyonlar kurulmuştur. Şekil 2.23'de çarpma testinden elde edilen yük deplasman eğrilerinin 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak gerilme/gerinme eğrilerine çevrilmiş hali görülmektedir.



Şekil 2.23. Çarpma testi neticesinde elde edilen Gerilme-Gerinme eğrileri (Oka ve Uguz 2008)

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:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.3)$$

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 ya da yumuşak çelik için özellikle kopma noktasına yakın olan bu etki “boyun verme” diye adlandırılır.

Kırılgan 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 (Shigley ve Mischke 2001)

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

$$\bar{\varepsilon} = \int_{L_0}^L dL/L = \ln(L/L_0) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.4)$$

L : anlık uzunluk

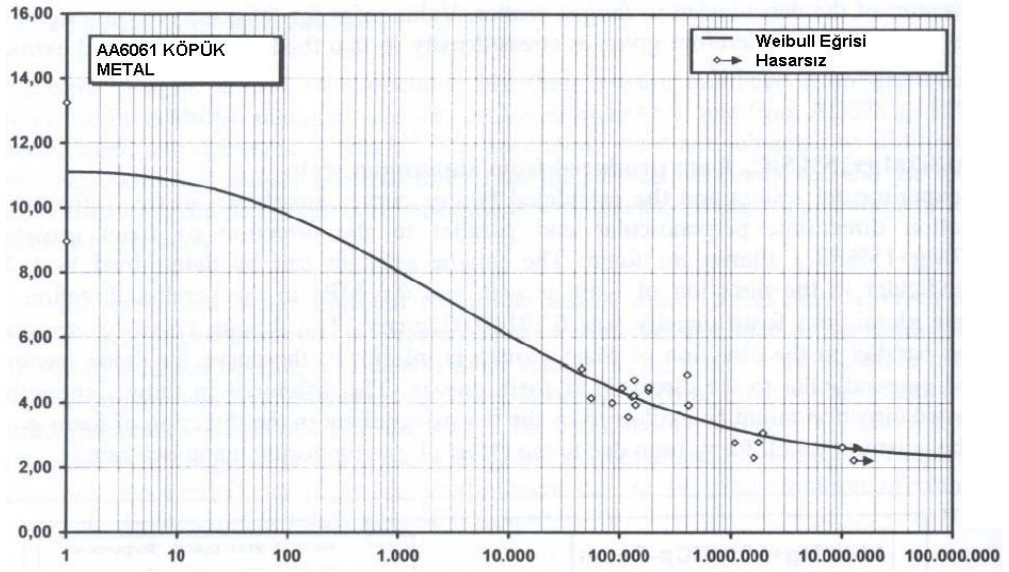
L₀ : başlangıç uzunluğu

ε : mühendislik şekil değiştirmesi

2.2.3. Yorulma

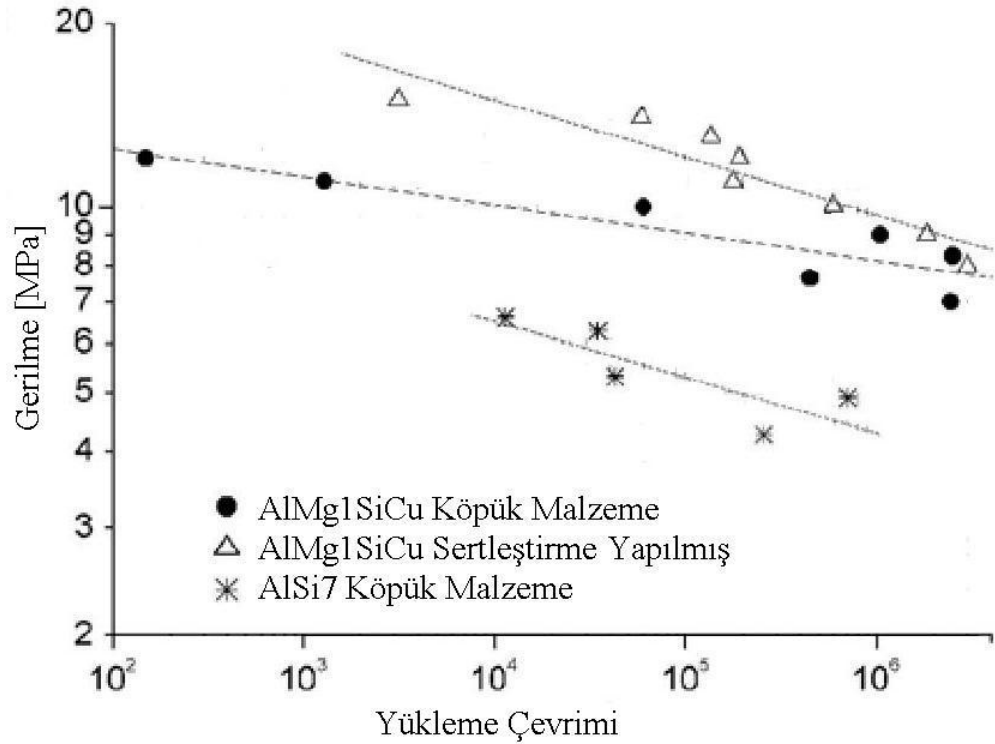
Yorulma, en genel anlamıyla malzemelerin tekrarlı yüklemeler etkisiyle hasara uğraması ve kullanılamaz duruma gelmesidir (Suresh 1991). S-N eğrisinin elde edilmesine yönelik kullanılan Gerilme-Ömür (Stres-Life) yöntemi genelde düşük yüklemeye çevrimlerinde hasara uğrayan parçalar için kullanılmaktadır (Tauscher 1983).

AlMg1SiCu (6061) köpük alaşımı için yapılan basma-çekme yorulma testinden elde edilen S-N eğrisi Şekil 2.24'de görülmektedir. Burada yüklemeye karşılık gerilmenin yoğunluğa oranı şeklinde grafik çizilmiştir (Schultz ve ark. 1999).



Şekil 2.24. 6061 Al alaşımı için S-N Eğrisi (Schultz ve ark. 1999).

Silindirik köpük metal numuneler üzerinde ölçümler sonucunda elde edilen S-N eğrileri şekil 2.25’de görülmektedir (Lehmus ve ark. 2002).



Şekil 2.25. 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).

2.2.4 Isıl zellikleri

Alüminyum köpük malzemelerde sadece kk 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 izelge 2.4' de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Alüminyum köpük metallerin ısı özellikleri

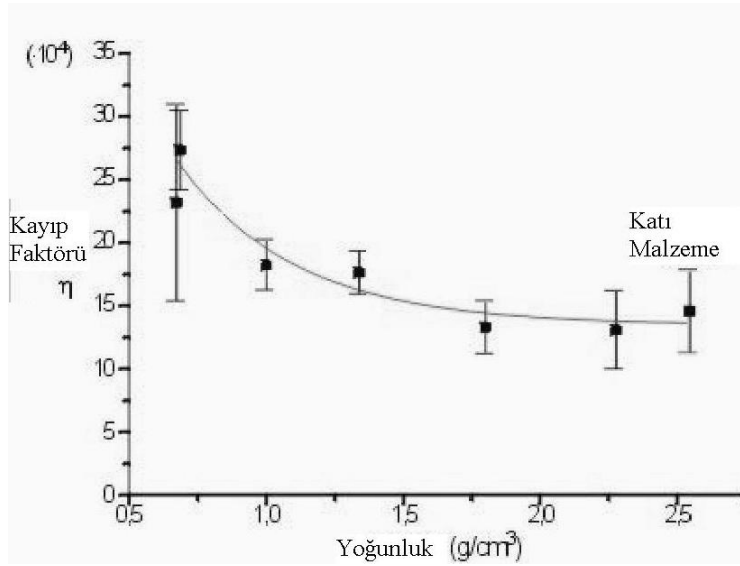
zellikler	AlSi7	AlSi7	AlSi12
Yoğunluk [g/cm ³]	0,55	0,63	0,6
Isıl İletim Katsayısı [W/mK]	6,1 (50°C)	7,8 (50°C)	16,7
	6,9 (100°C)	8,8 (100°C)	-
	7,7 (200°C)	9,8 (200°C)	-
Özgül Isı [kJ/kg.K]	0,9	0,9	0,88
Isıl Genleşme Katsayısı ($10^{-6}/K$)	-	-	19,9-20,6

KAYNAK: Fraunhofer 2006

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 termo akustik 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 araştırmada sıvı haldeki metal esaslı köpük malzemenin katılaşmasını ve ortaya çıkan ısı transferi problemlerini incelemişlerdir.

2.2.5 Akustik Özellikler

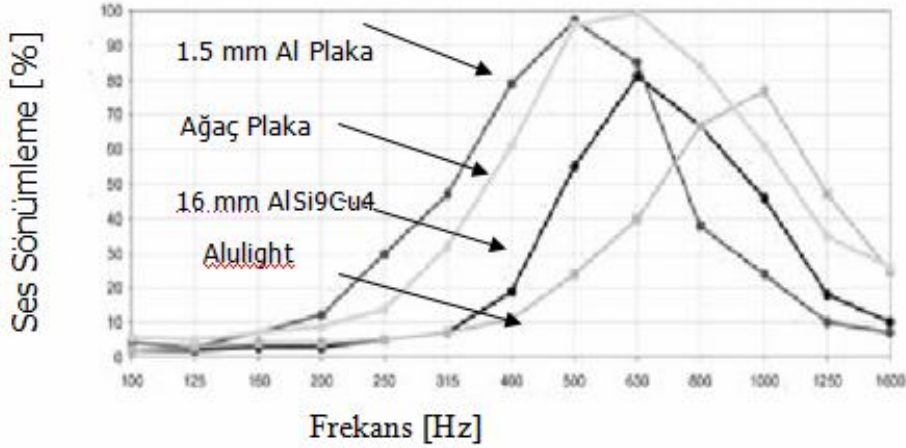
Katı metallere karşılaştırıldığında köpük yapılar mekanik titreşim sönümlemede olduğu gibi ses enerjisini sönümlemede de iyi özellikler göstermektedirler (Fraunhofer). Mekanik titreşimler neticesinde oluşan mekanik enerjiden açığa çıkan ses için kayıp faktörü η , alüminyum köpük metalinin yoğunluğuna bağlı olarak şekil 2.26'de görülmektedir.



Şekil 2.26. 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 2.27’ de görülen diğer malzemelerle karşılaştırıldığında birbirine çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Alulight).



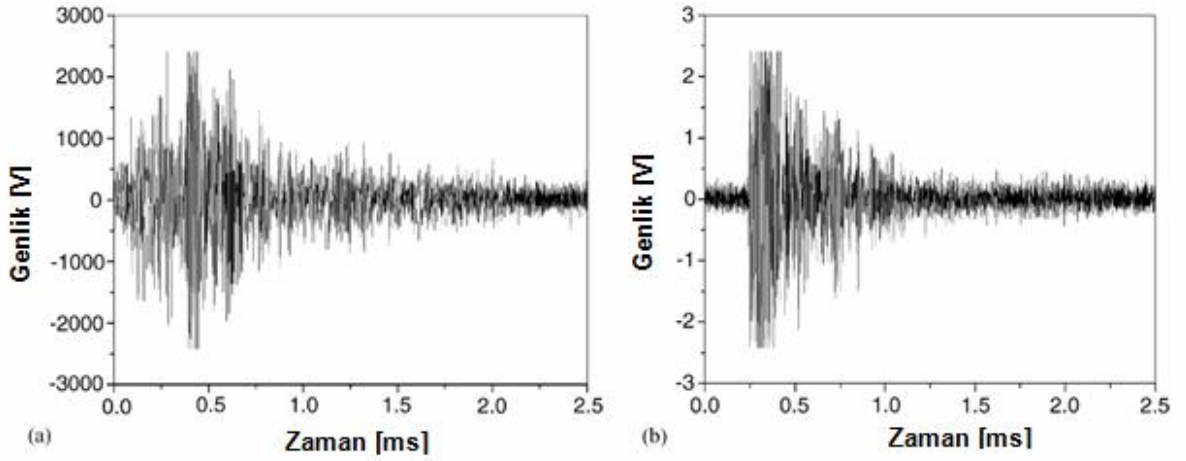
Şekil 2.27. Farklı malzemeler için ses sönümleme yüzdeleri (Alulight).

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.

Kadar ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada Al-Silisyum köpük malzeme (AlSi10) ve Alporas köpüğünün (AlCa5Ti10) basma yükü altındaki akustik emisyon özelliklerini çeşitli seviyedeki deformasyonlar ile incelemişlerdir. İki eşik değeri seviyesindeki çevrim oranı, uygulama oranı ve seçili akustik emisyon dalgaları olası muhtemel plastik deformasyon mekanizmalarını belirlemek için test sırasında kayıt edilmiştir.

Temel anlamda iki çeşit dalda formu elde edilmiştir. Şekil 2.28.a’da genlik devamlı bir şekilde şekil 2.28.b’de kine kıyasla dalga formuna ters orantılı olarak artmaktadır. Bu durum bizlere kırılma ve plastik akma olmak üzere iki farklı deformasyon şeklini göstermektedir:

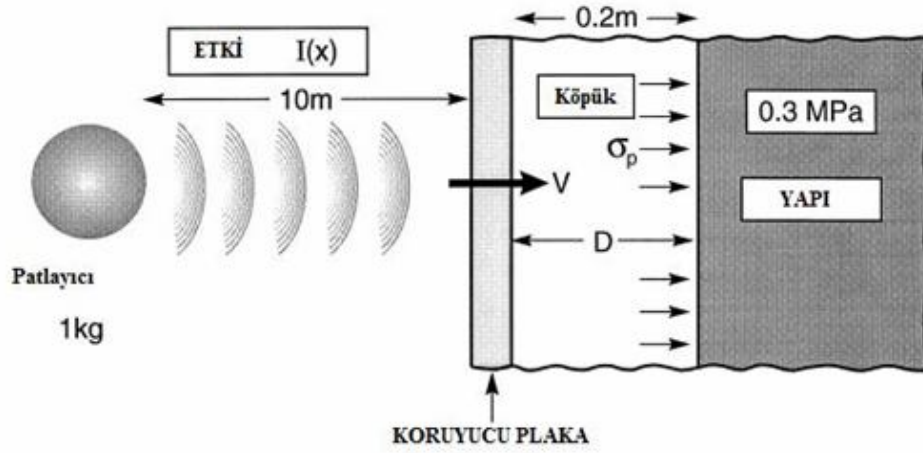


Şekil 2.28. Devam eden zaman içerisinde elde edilen iki farklı dalga formu görülmektedir. Soldaki grafik (a) genliğin devamlı bir şekilde artmasıyla elde edilen; (b) ilerleme zamanı dikkate alınmadan elde edilen dalga formu grafiği (Kadar ve ark. 2003)

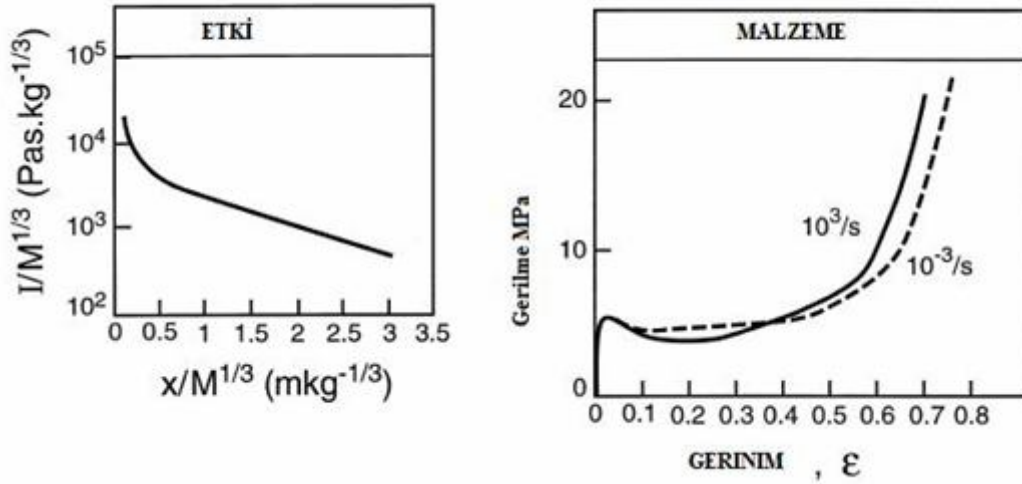
Bu çalışmanın ışığında akustik emisyon ölçümlerinin plastik deformasyonların bulunmasında da kullanılabileceği anlaşılmıştır. Ayrıca ölçümler sonucunda artan basma hızı ile birlikte deformasyon mekanizmasında herhangi bir değişikliğin olmadığı gözlemlenmiştir.

2.2.6. Patlama ve basınç dalgalarına duyarlılık

Şekil 2.29'da görüldüğü gibi bir basınç dalgası alüminyum köpük ile kaplanmış bir yüzey üzerine farklı hızlardaki etkirse basınç dalgaları altında gerilme gerinme eğrileri karakteristik açıdan farklılaşmaktadırlar (Şekil 2.30).

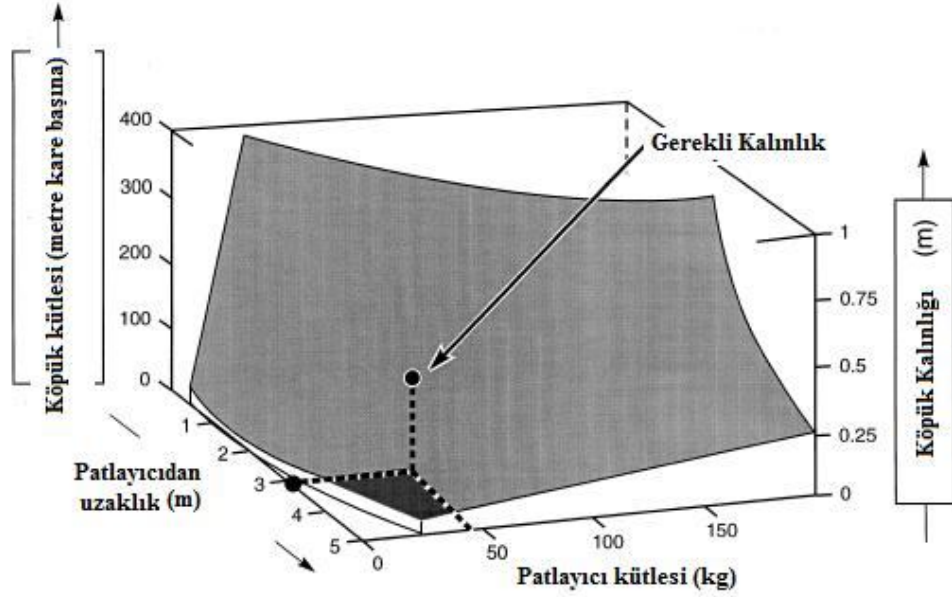


Şekil 2.29. Alüminyum köpük malzeme üzerine patlama sonrası etkiyen basınç dalgası (Evans ve ark. 1999)



Şekil 2.30. Alüminyum köpük malzemelerin patlamaya karşı direnç karakteristikleri (Evans ve ark. 1999)

Basınç dalgalarının frekansı arttıkça malzemenin gerinme düzlemi uzamaktadır. Burada darbe etkisinden farklı olarak basınç dalgaları için çok ani pekleşme meydana gelmektedir.



Şekil 2.31. Alüminyum köpük malzemelerin patlamaya karşı sönümlenme yüzey matrisi (Örnek; 50kg patlayıcının, 3 metre uzaklıktan 10 atm basınç erişmesi durumundaki gerekli olan minimum kalınlık değeridir) (Evans ve ark. 1999)

Darbe veya basınç dalgası yüklemeler sırasında yayılan enerji plastik olarak işe çevrilmelidir. Bu darbe sırasındaki enerjinin tümü ancak düzlem gerilme bölgesi aşılmamış ise sönümlenebilir.

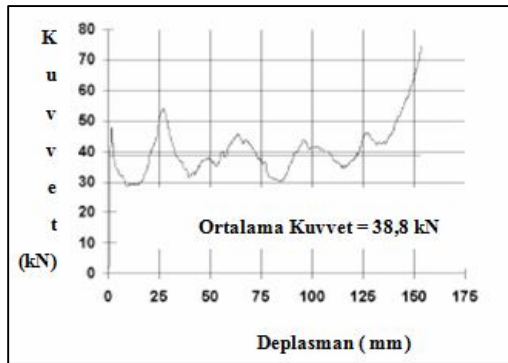
Bu tarz uygulamalarda köpük yapıların diğer tipik yapılarak göre deformasyon hızına aşırı duyarlı akma gerilme değerleri vardır (Evans ve ark. 1999). Şekil 2.31’de Alüminyum köpük malzemelerin patlamaya karşı sönümlenme yüzey matrisi görülmektedir.

Örnek; 50kg patlayıcının, 3 metre uzaklıktan 10 atm basınç erişmesi durumundaki gerekli olan minimum kalınlık değeri şekil 2.31’de elde edilmiştir. Bu tarz hesaplamalarda Omurga şok faktörü (KSF) ilgili mesafe, patlayıcı uzaklığı ve patlayıcı kütlesine bağlı olarak hesaplanır (BV 1040, Alman Deniz Kuvvetleri analiz şartnamesi, 2007) özellikle askeri yapıların şartnamedeki omurga şok faktörüne uyumları deneysel ve benzetim yöntemleri ile kanıtlanmalıdır (Anonim, dynamic response, volume 1 2006)

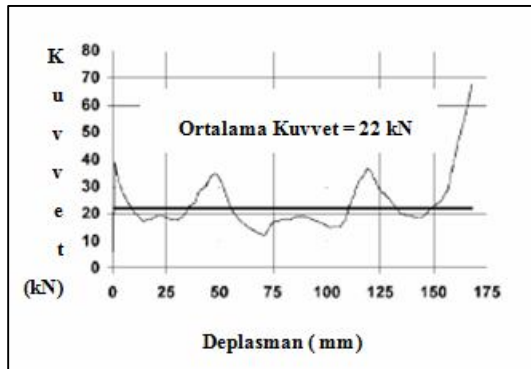
2.2.7. Deneysel gerilme-gerinme eğrileri

Fuganti ve ark. (2000) dolgu malzemesi olarak kullanılan alüminyum köpüklü çarpışma kutularının enerji sönümleme performanslarını araştırmışlardır. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada çarpışma kutularının görevleri ve ortalama kuvvet değerleri ile deformasyon karakteristikleri incelenmiştir. Yapılan statik basma testleri ve çarpma testlerinde elde edilen sonuçları ürettikleri bazı formülasyon değerleri ile karşılaştırmışlardır.

Şekil 2.32’de görüldüğü üzere köpük malzeme ile doldurulmuş numune için statik basma testi neticesinde elde edilen yük deplasman eğrisinde ortalama kuvvet değeri 38,8 kN olup, bu değer içi boş profile göre yaklaşık olarak iki kat daha fazladır (Şekil 2.33). Buna ek olarak elde edilen maksimum değer ise yaklaşık olarak %30 daha fazladır (Fuganti ve ark. 2000).



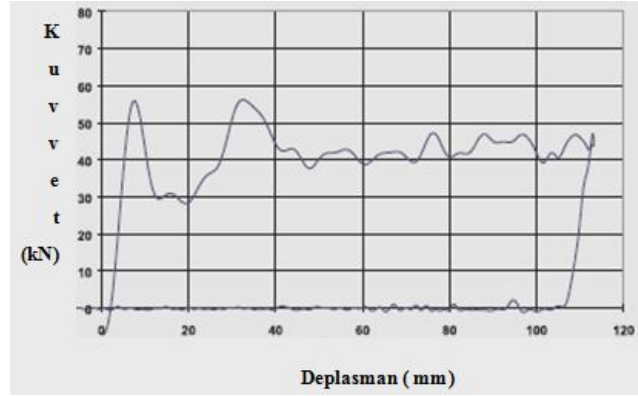
Şekil 2.32. Alüminyum köpük dolgululu numune için basma testi yük-deplasman eğrisi (Fuganti ve ark. 2000)



Şekil 2.33. İçi boş numune için basma testi yük-deplasman eğrisi (Fuganti ve ark. 2000)

Bununla birlikte sadece köpüğün ve sadece metal numunenin tek başlarına sönmledikleri enerji değerleri için köpikle doldurulmuş numuneden daha azdır. Bu değerler alüminyum köpük dolgulu metal çarpışma kutularının enerji sönmleme değerlerinin çok daha fazla olduğunu göstermektedir.

Statik basma testinde içi boş numune için elde edilen sönmülenmiş enerji değeri yaklaşık 3,500 Joule olup (maksimum kuvvet 38,938 N), bu değeri köpük dolgulu numune için 5,409 Joule'dür (maksimum kuvvet 51,891 N).



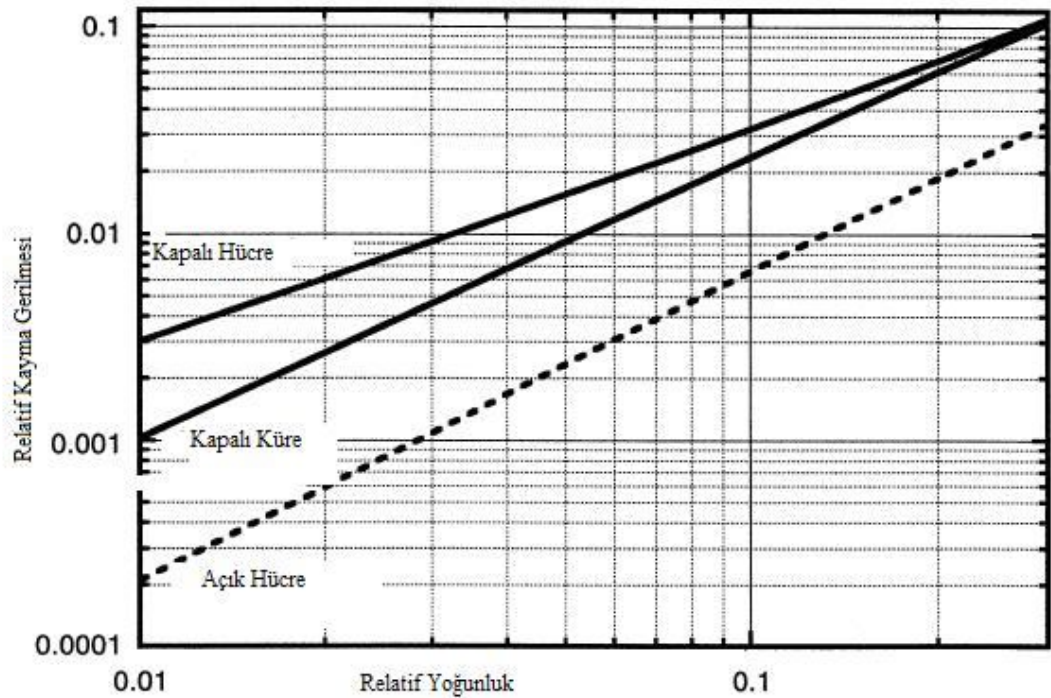
Şekil 2.34. Alüminyum köpük dolgulu numune için çarpma testi yük-deplasman eğrisi (Fuganti ve ark. 2000)

Çarpışma testleri sonucunda elde edilen değerler statik basma testleri ile karşılaştırıldığında malzemelerin etkin şekilde gerinime bağlı hassasiyete (Strain rate sensitivity) sahip olmadığı görülmüştür. Ayrıca herhangi bir dinamik etkinin ve ataletlerin de etkili olmadığı görülmektedir (Fuganti ve ark. 2000).

Şekil 2.34' de görülen yük deplasman eğrileri statik basma testlerindeki ortalama karakteristiğe çok benzerdir. Sönmülen enerji değerinin ise 4,744 Joule olması bu düşüneyi haklı çıkartmaktadır. Ancak elde edilen maksimum kuvvet değeri çarpışma hızına bağlı olarak artmaktadır (Maksimum kuvvet 57,356 N).

Sanders ve Gibson (2003) alüminyum bazlı köpük malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti için kapalı hücre tipini önermektedirler. Çalışmalarında küresel kapalı tüp hücre yapılı alüminyum köpük malzemeler için Elastisite modülü ve akma mukavemetlerini analiz etmişlerdir. Çalışma kapsamında göreceli olarak, kapalı hücre, açık hücre ve kapalı küresel hücreli yapılar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Kapalı hücre alüminyum köpük malzemeler daha yüksek Elastisite modüllerinin yanı sıra daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptirler. Ancak pratikte sonuç olarak aynı göreceli yoğunluk için ilgili değerler birbirine oldukça yakındır (Sanders ve Gibson 2003).

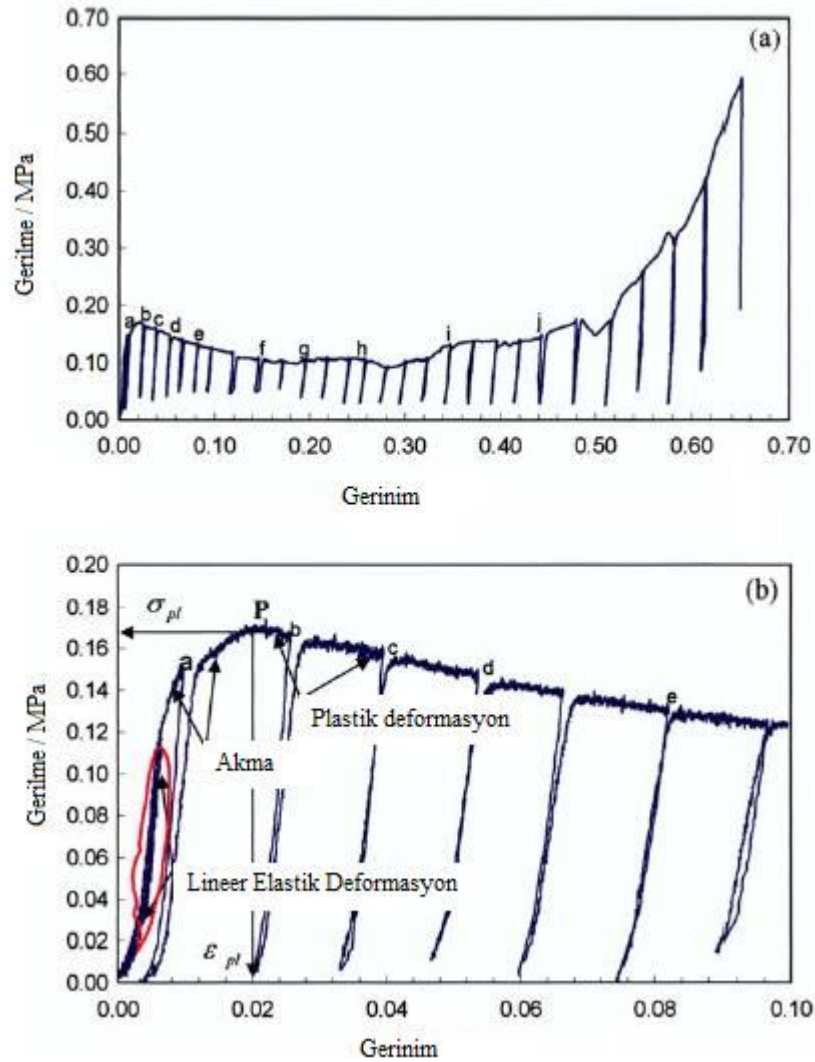


Şekil 2.35. Farklı hücre yapıları için Relatif Kayma gerilmelerinin Relatif yoğunluğa göre değişimi (Sanders ve Gibson 2003)

Şekil 2.35'de rölatif yoğunluğa bağlı olarak farklı hücre yapıları için kayma gerilmesinin değişimi görülmektedir. Aynı şekilde Elastisite modülleri ve akma gerilmeleri de benzer şekilde farklı hücre yapıları için değişmektedir (Sanders ve Gibson 2003).

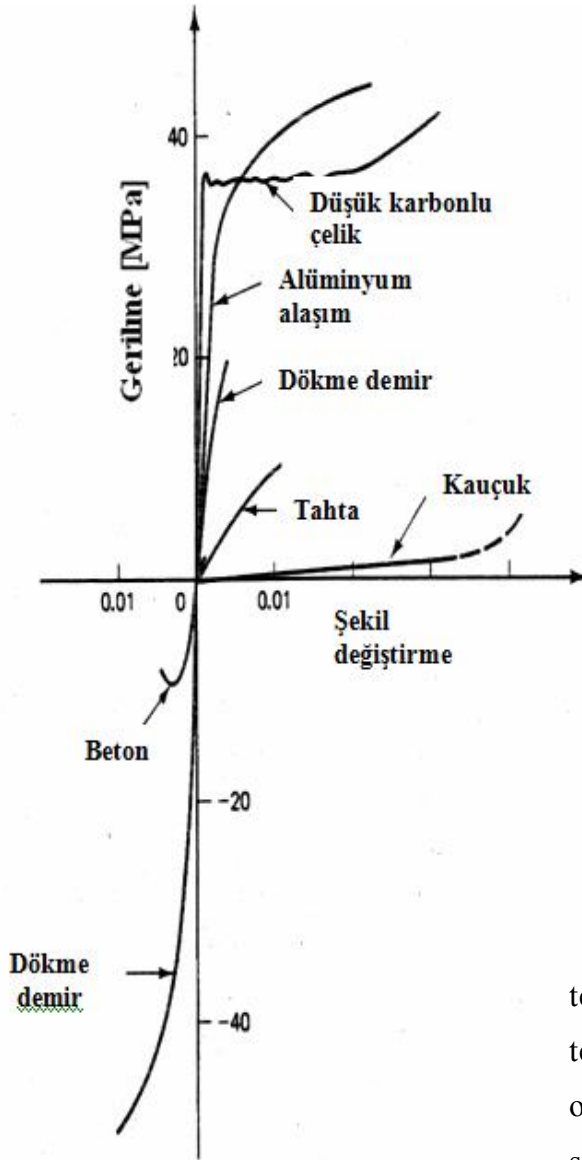
Çevrimse yüklemeye sonucunda köpük malzemeler üzerinde meydana gelen plastik deformasyon mekanizmaları üzerinde Zhou ve ark. (2004) bazı çalışmalar yapmışlardır. Buna göre;

31 adet yapılan Çevrimsel yüklemeye neticesindeki gerilme gerinme eğrilerinde (Şekil 2.36) ilk üç yüklemeye çevrimi için eğriler neredeyse birbirinin aynısıdır. Aynı zamanda herhangi bir plastik deformasyon söz konusu olmadığı için bantlar arasında herhangi bir dislokasyon gözlenmemiştir (Zhou ve ark. 2004). Şekil 2.36.b'de ise bu çevrimlerin ilk kısmının detayı görülmektedir.



Şekil 2.36. a.31 adet çevrimsel yüklemeye için Gerilme-Gerinme eğrileri, b. Elastik bölgenin Gerilme eğrisi detayı (Zhou ve ark. 2004)

Akma noktasından önce olmasına rağmen Gerilme – Gerinme eğrisi doğrusallığını kaybetmiştir. Bu eğrissellik malzeme içindeki süreksizliklerden kaynaklanmaktadır ve bu problemler akma noktasının tam olarak tespit edilmesini zorlaştırmaktadır (Zhou ve ark. 2004).

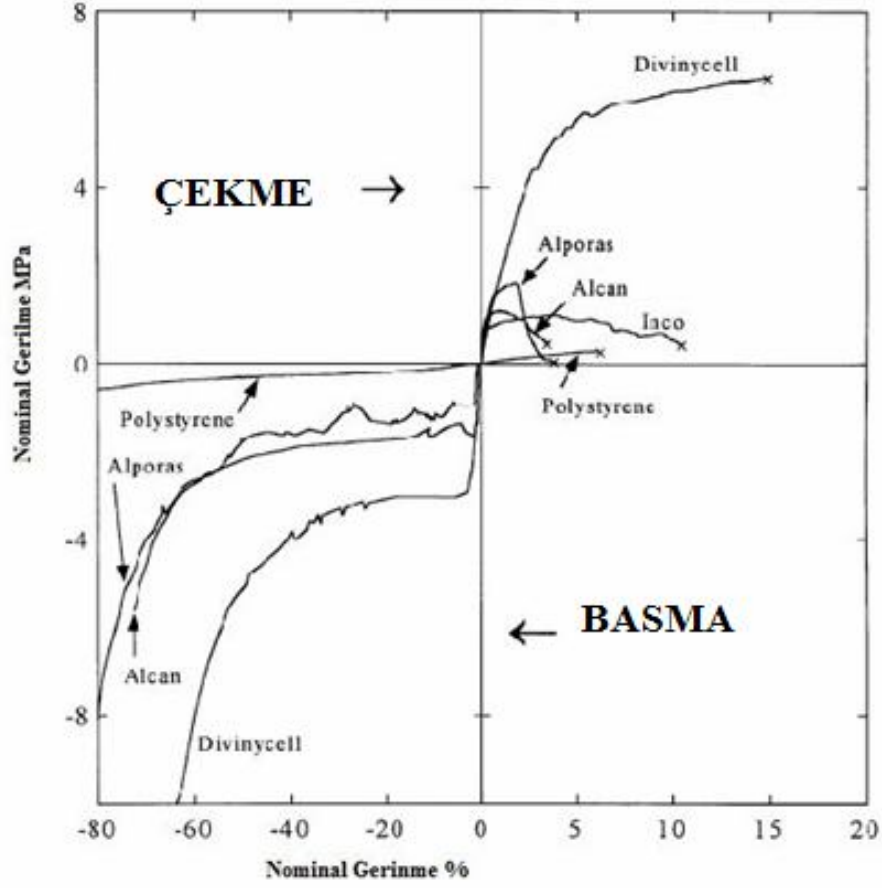


Şekil 2.37 Farklı malzeme tipleri için gerilme- Gerinme eğrileri (Popov 1990).

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. Farklı tipteki malzemeler için yine farklı tipte gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilebilir.

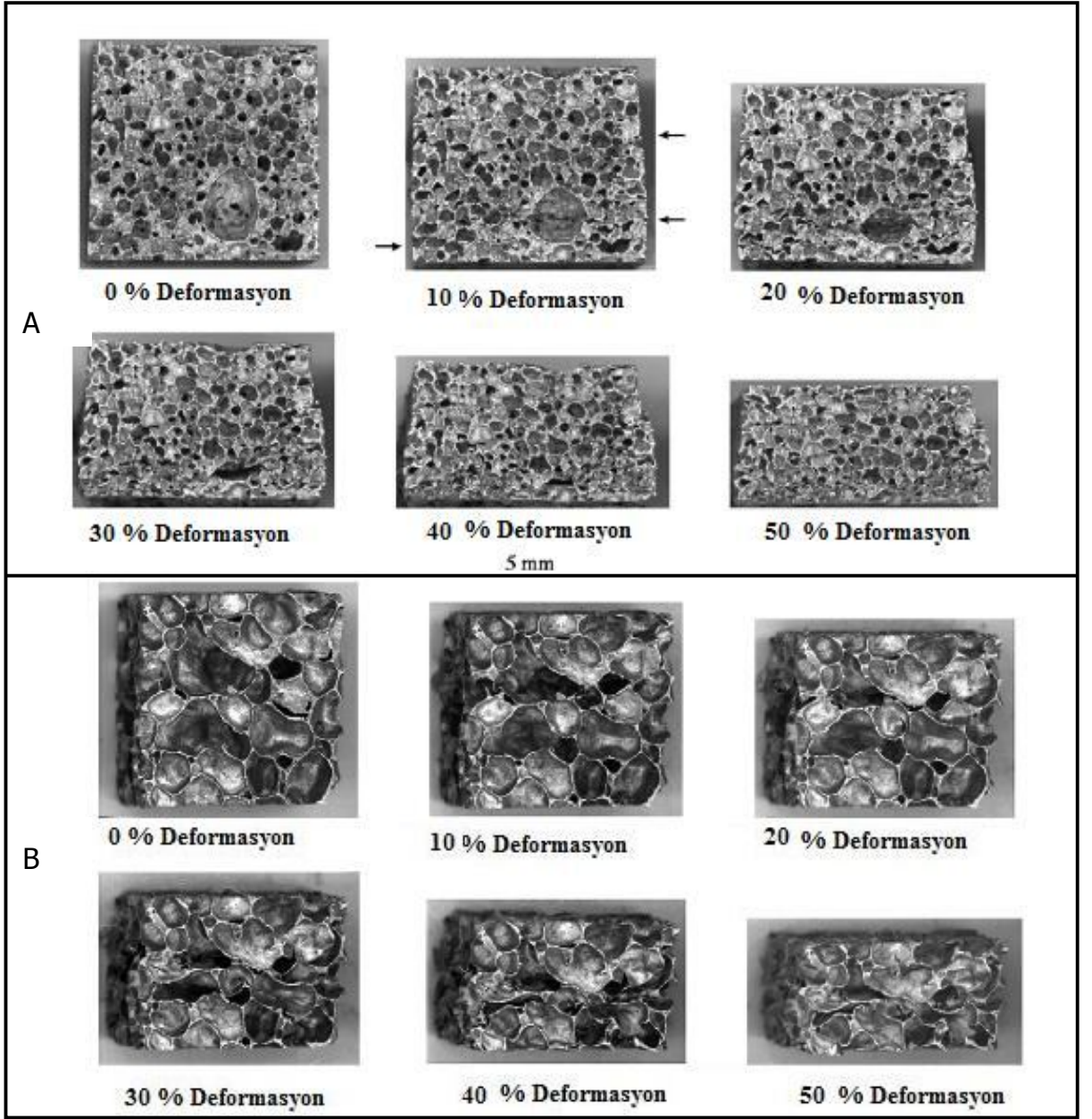
Aynı malzeme için yapılan testlerde bile, test koşullarındaki sıcaklığa, test hızına ve başka değişkenlere bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilebilir. Bu sebeple ortalama değerlerle çalışmak avantajlıdır ve hata payını çok azaltır (Popov 1990). Farklı malzemelerden elde edilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrileri şekil 2.37’de görülmektedir

Bu tarz bir Gerilme - Gerinme eğrisi değişik tipteki köpüklerin bası ve çeki durumları için Fleck ve ark. (2001) tarafından da elde edilmiştir (şekil 2.38).



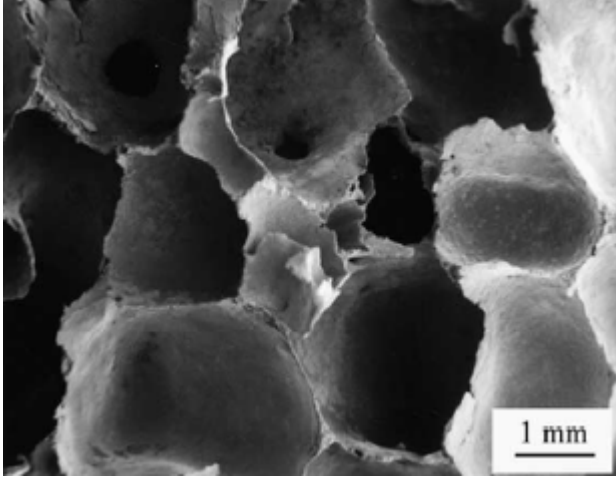
Şekil 2.38. Basma ve çekme durumları için farklı tipteki köpük malzemelerin tipik Gerilme-Gerinme eğrileri (Pppov 1990).

Markari ve Cylne (2001), farklı alaşım elementler içeren 2 farklı köpük malzemenin basma yüklemesi altındaki davranışlarını incelemiştir (Şekil 2.39). Malzemelerin benzer rölatif yoğunlukları ve yapıları olmasına rağmen, hücre duvarlarının mikro yapısında farklılıklar mevcuttur.



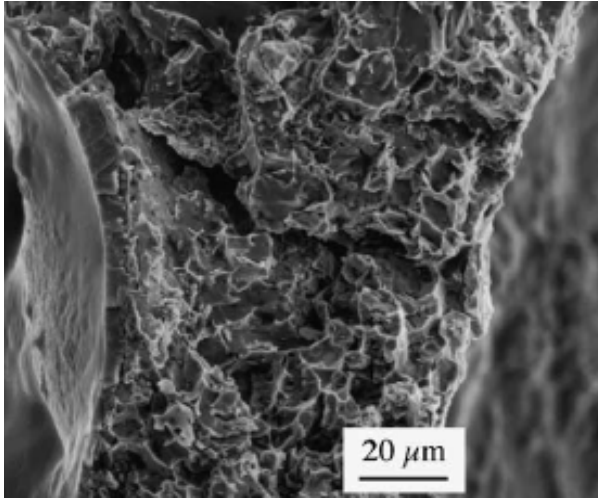
Şekil 2.39. Farklı Alüminyum köpük malzemelerin bası yüklemesi altındaki deformasyonları (Markari ve Cylne 2001)

Markari ve Cylne (2001) deformasyon karakteristiklerine göre içyapı deformasyonunu aynı zamanda elektron mikroskobu çalışması ile desteklemiştir (şekil 2.40 ve şekil 41).



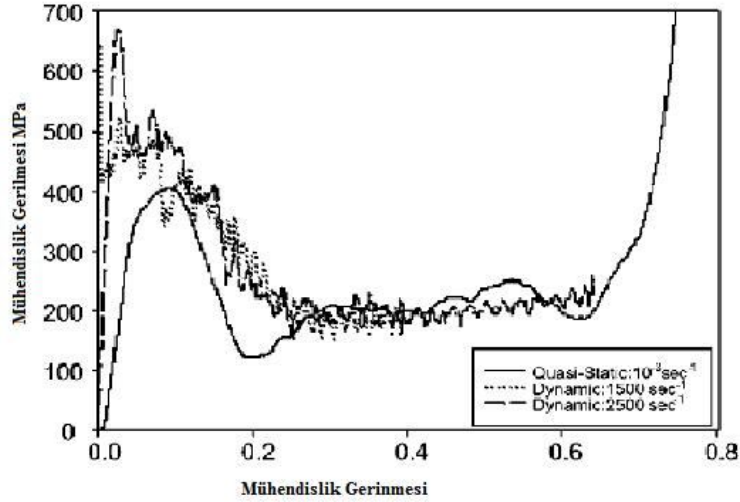
Şekil 2.40. TiH₂ köpük malzemesi mikro yapısı (Markari ve Cylne 2001)

Numunelerin bası testi sırasındaki karakteristiği düzlemsel gerilme bölgesinde hücre boyutlarından dolayı farklılıklar göstermektedirler. Ancak genel olarak eğilim aynıdır. Basma işlemi sırasında sönmülenen enerji için yoğunlaşma bölgesine kadar elde edilen eğrinin altında kalan alan yaklaşık olarak kullanılmıştır ve birbirleriyle karşılaştırma amaçlı olarak refere edilmişlerdir.



Şekil 2.41. Al-12Si-0.6Mg köpük malzemesi mikro yapısı (Markari ve Cylne 2001)

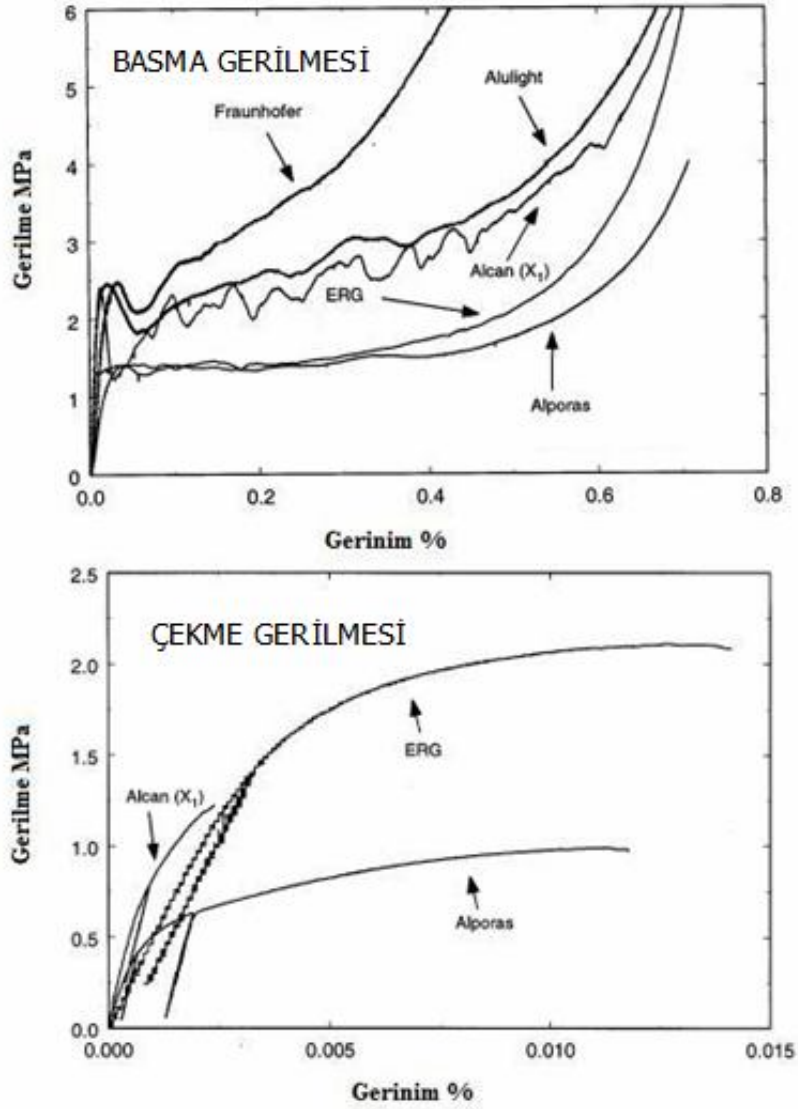
Hayes ve ark.'nın (2004) petek yapılı maragin çelikleri üzerinde yapmış oldukları düzlemsel basma testi sonuçlarından elde ettikleri eğrilerde, statik ve farklı hızlarda yaptıkları dinamik basma işlemlerindeki sonuçların köpük alüminyumda biraz farklı olduğu görülmektedir.



Şekil 2.42. Kare petek yapılı köpük maragin çeliği için farklı hızlardaki Gerilme- Mühendislik gerinmesi eğrileri (Hayes ve ark. 2004).

Şekil 2.42'de görüldüğü üzere dinamik etkiler, ani pekleşme ve ataletlerden dolayı statik duruma göre eşik gerilme değerleri statik duruma göre yaklaşık iki kat daha fazladır.

Andrews ve ark. (1999) 5 farklı temel üreticiden temin ettikleri alüminyum köpük numuneler üzerinde basma ve çekme testleri yapmışlar ve ticari olarak bu ürünlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Bu firmaların (Fraunhofer, Alulight, Alcan, ERG, Alporas) ürünlerinin rölatif yoğunlukları ve bazı mekanik özellikleri kullanım alanları farklı olduğu için birbirinden farklılıklar göstermektedir (Şekil 2.43).

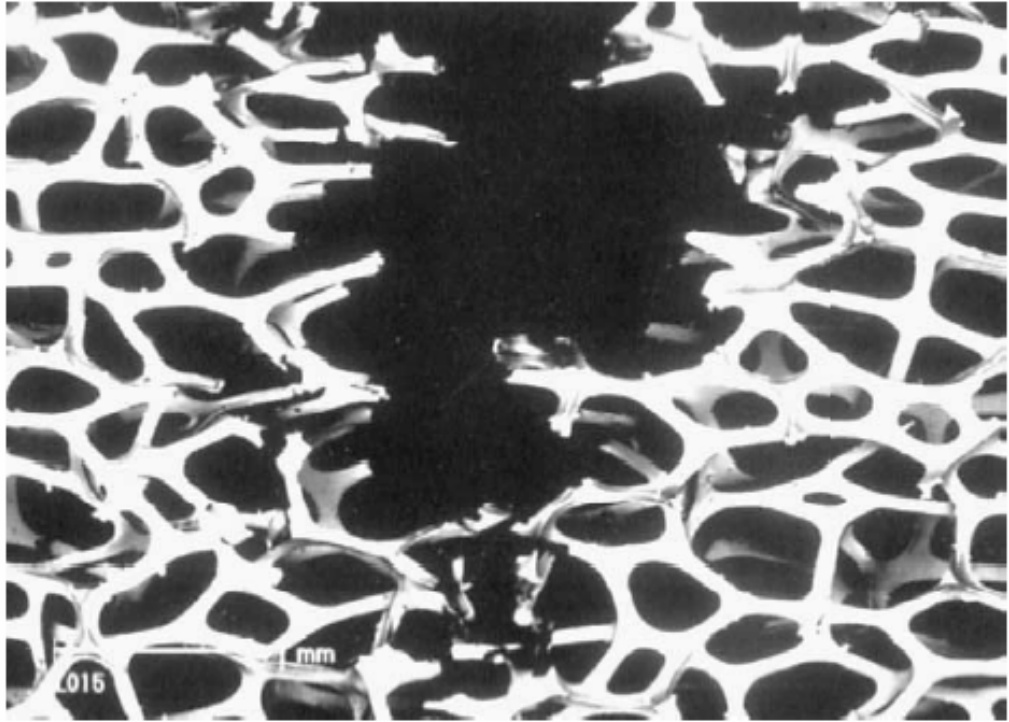


Şekil 2.43. Farklı üreticilerin Alüminyum köpük malzemeleri için basma ve çekme gerilmesi altındaki gerilme- gerinme eğrileri (Andrews ve ark. 1999)

Köpük malzemelerin gerilme gerinme davranışı hücrelerin çekil değiştirilmesi ve hasar görmesi şeklinde iki bölümde incelenebilir (Andrews ve ark. 1999). Tek eksenli gerilme etkisi altında, açık hücreli yapılarda eğilme ve akabinde elastik ve plastik deformasyon meydana gelmektedir. Mekanik davranışı tanımlayan Poisson oranları için farklı firmaların sahip oldukları değerler 0,25 ile 0,65 aralığındadır. Literatürde bu değer genelde 0,4 olarak alınmaktadır (Andrews ve ark. 1999).

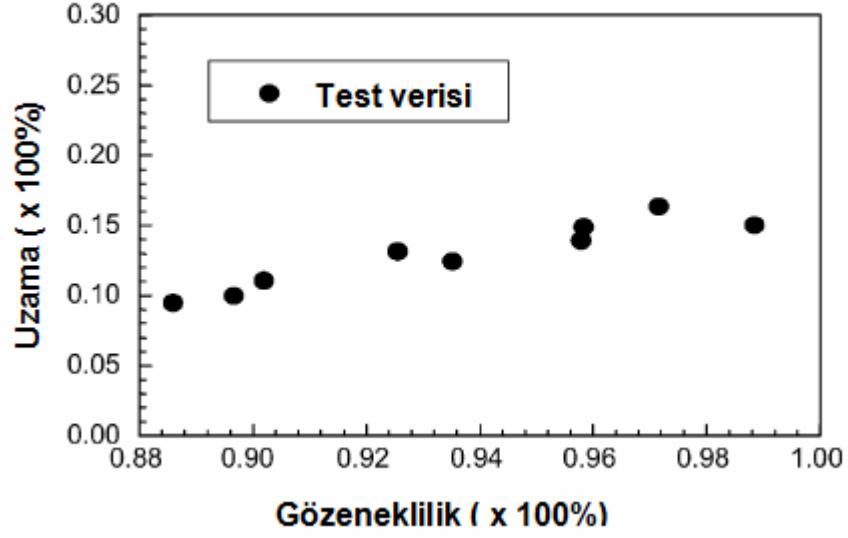
LIU (2004) çalışmasında açık hücreli bir Al köpük malzeme üzerinde çekme testi yapılmış ve daha sonrasında gözenek yoğunluğu dikkate alınarak incelemiştir. Çalışma numunesi 2-3 mm kalınlığında Ni-köpük malzeme olup elektro kaplama yöntemi ile üretilmiştir.

Dikey uzunluğu 20 mm olan numuneye koparılan kadar çekme yükü uygulanmış ve gözeneklerdeki uzama kontrol edilmiştir. Deney sonrası numunedeki yırtık şekil 2.44'de görülmektedir.



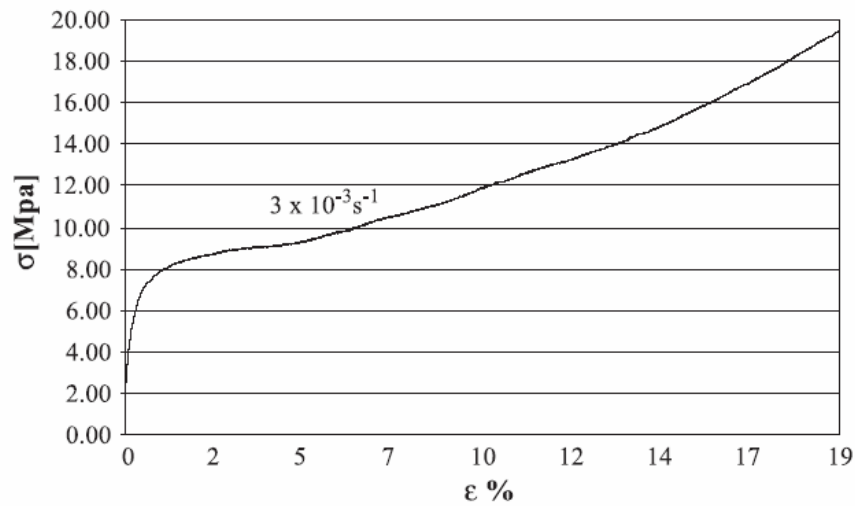
Şekil 2.44. Çekme sonucundaki yırtığın detaylı görüntüsü (Liu 2004)

Ni köpük yapı için çekme kırılması sonrasındaki %-uzama ile gözeneklilik arasındaki ilişki şekil 2.45'de görülmektedir. Numunenin toplam eğilimi düşünüldüğünde %88 gözeneklilik ve üstündeki yapılarda uzamanın hafif bir artış gösterdiği saptanmıştır.



Şekil 2.45. Elektro kaplama yöntemiyle üretilen Ni köpük malzemenin % uzama-gözeneklilik grafiği (Papadopoulos ve ark. 2004)

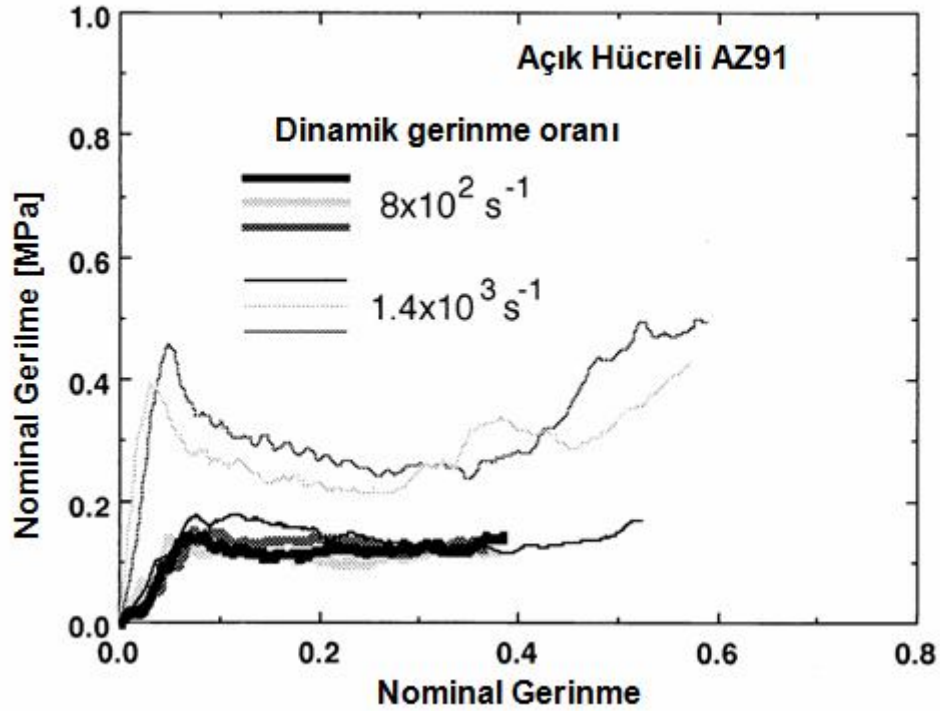
Papadopoulos ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada eriyik köpükleme yöntemi ile üretilmiş Al köpük malzemenin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen gerilme-gerinme grafiği aşağıda şekil 2.46’da görülmektedir



Şekil 2.46. 0.003 1/s deformasyon hızı ile elde edilen gerilme-gerinme grafiği (Papadopoulos ve ark. 2004)

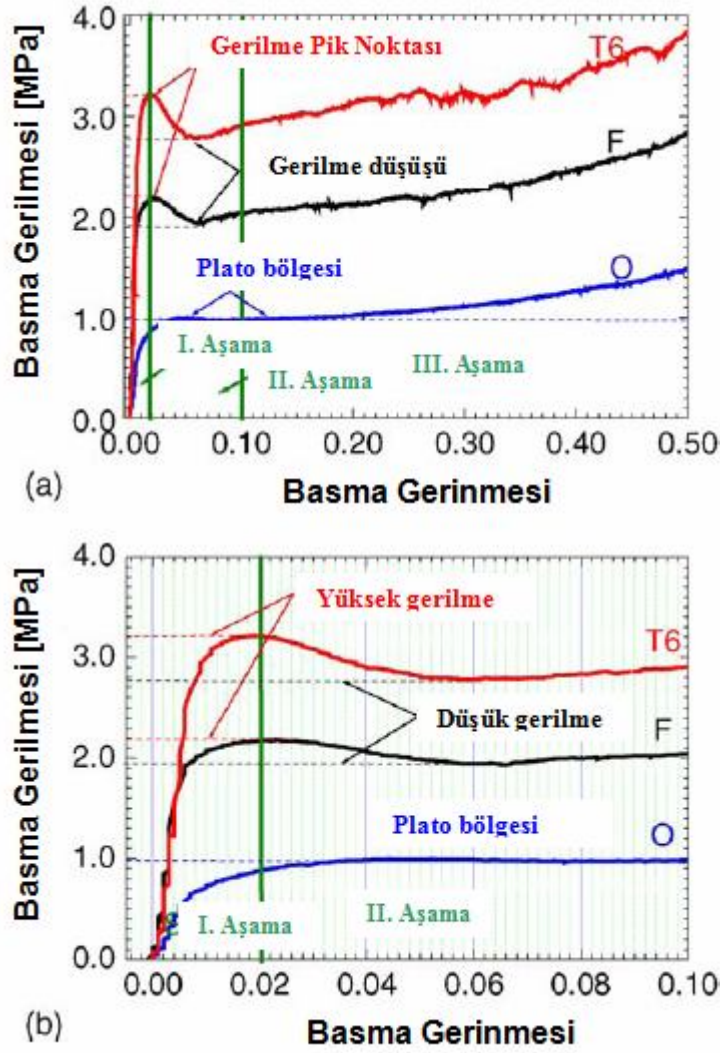
Mukai ve ark. (1999) yaptıkları çalışmada çok düşük yoğunluklu (0.05 g/cm^3) açık hücreli AZ91 (Mg-9wt.%Al-1wt.%Zn-0.2wt.%Mn) magnezyum metalik köpüğünün basma dayanımını incelemiştirler. $16 \times 16 \times 11 \text{ mm}^3$ boyutlara sahip olan test numunesinden elde ettikleri sonuçlarda magnezyum köpüğünün gerilme gerinme davranışı (plato gerilme dikkate değer bir gerinme oranı ile elde edilmiştir) Al köpüğüne benzer bir şekilde bulunmuştur.

0.5 gerinme değerine kadar başlangıç akma değeri bir plato özelliği göstermiştir. Bu davranış açık hücreli konvansiyonel metalik köpük malzemenin genel özelliğidir. Elde edilen gerilme-gerinme eğrisi şekil 2.47'de görülmektedir.



Şekil 2.47. Dinamik gerinme oranı 8×10^2 ve $1.4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ (Mukai ve ark. 1999)

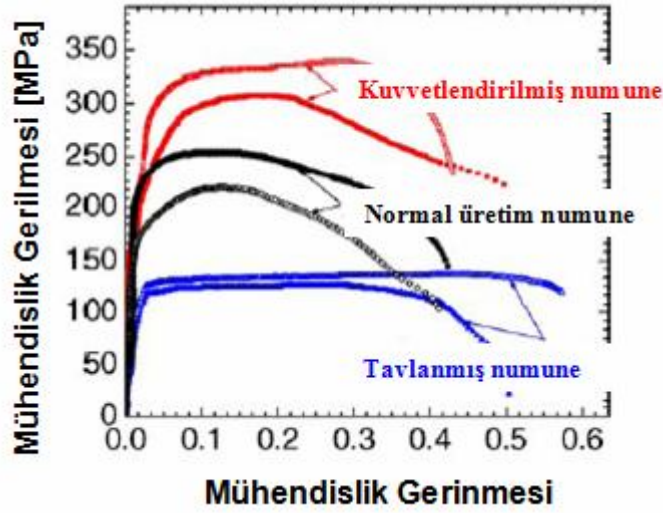
Zhoua ve ark. (2000) yaptıkları çalışmada çeşitli ısı işlemlere (tavlama, kuvvetlendirme gibi) maruz bırakılmış açık hücreli bir Duocell alüminyum köpük malzemenin basma yükü deformasyonunu incelemiştirler. Çalışma sırasında Duocel 6101 alüminyum köpük malzeme kullanılmıştır. Bu tip Al köpük malzemeler döküm malzeme üretimi yöntemiyle elde edilmektedir. (Ashby ve ark. 2000).



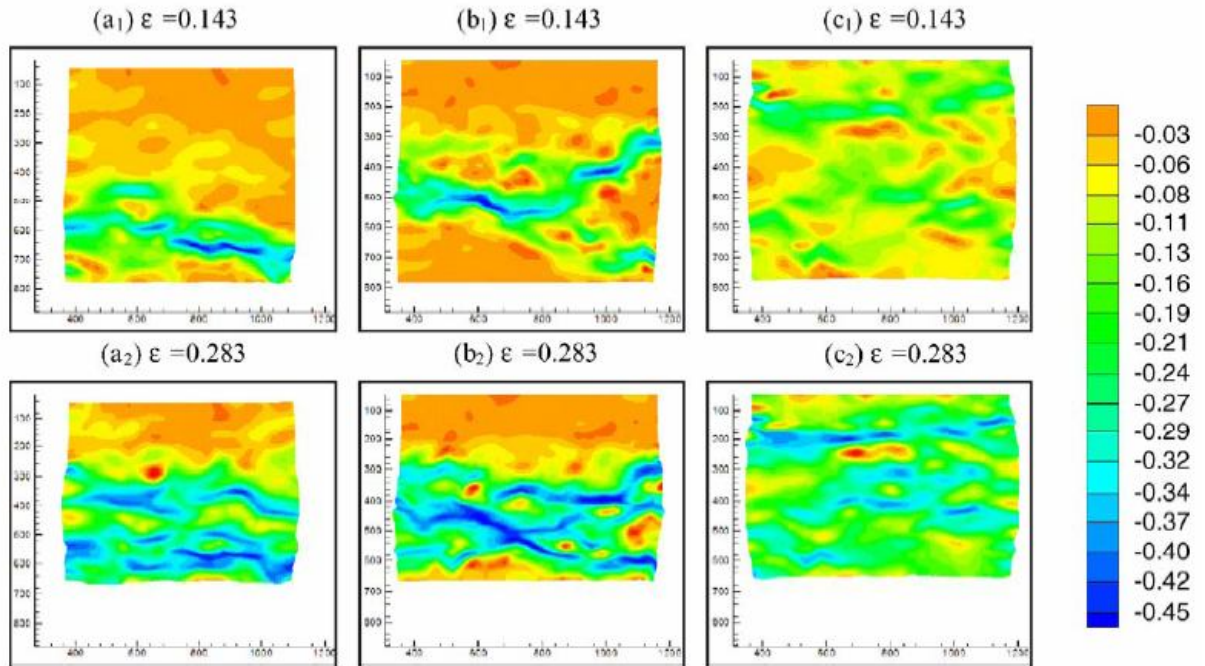
Şekil 2.48. Köpük malzemenin gerilme-gerinme davranışını ısı işlemlerin etkisi: (a) Gerinme değeri 0.5'e kadar olan gerilme-gerinme grafikleri. (b) üst dayanım, alt dayanım ve plato bölgesi tanımları (Zhoua ve ark. 2000)

Ortalama aynı yoğunluğa sahip olan ($\sim 0.083 \text{ g/cm}^3$) numuneler ile yapılan çalışma sonucunda elde edilen gerilme-gerinme grafikleri şekil 2.48.a'da, daha önceki aşamalar detaylı bir şekilde şekil 2.48.b'de görülmektedir. Tavlama ve yapı kuvvetlendirme işlemleri Al köpük malzemenin gerilme-gerinme davranışı, basma mukavemeti davranışı ve deformasyonunu önemli ölçüde etkilemiştir. Normal üretim numune ile kuvvetlendirilmiş numune benzer gerilme-gerinme davranışını göstermiştir. Aynı orandaki gerilme yükselmeleri ve düzlemsel davranışları bu benzerliği kanıtlamasına

rağmen aksine tavllanmış yapı davranışında herhangi bir ani gerilme yükselmesi görülmektedir (Şekil 2.49).

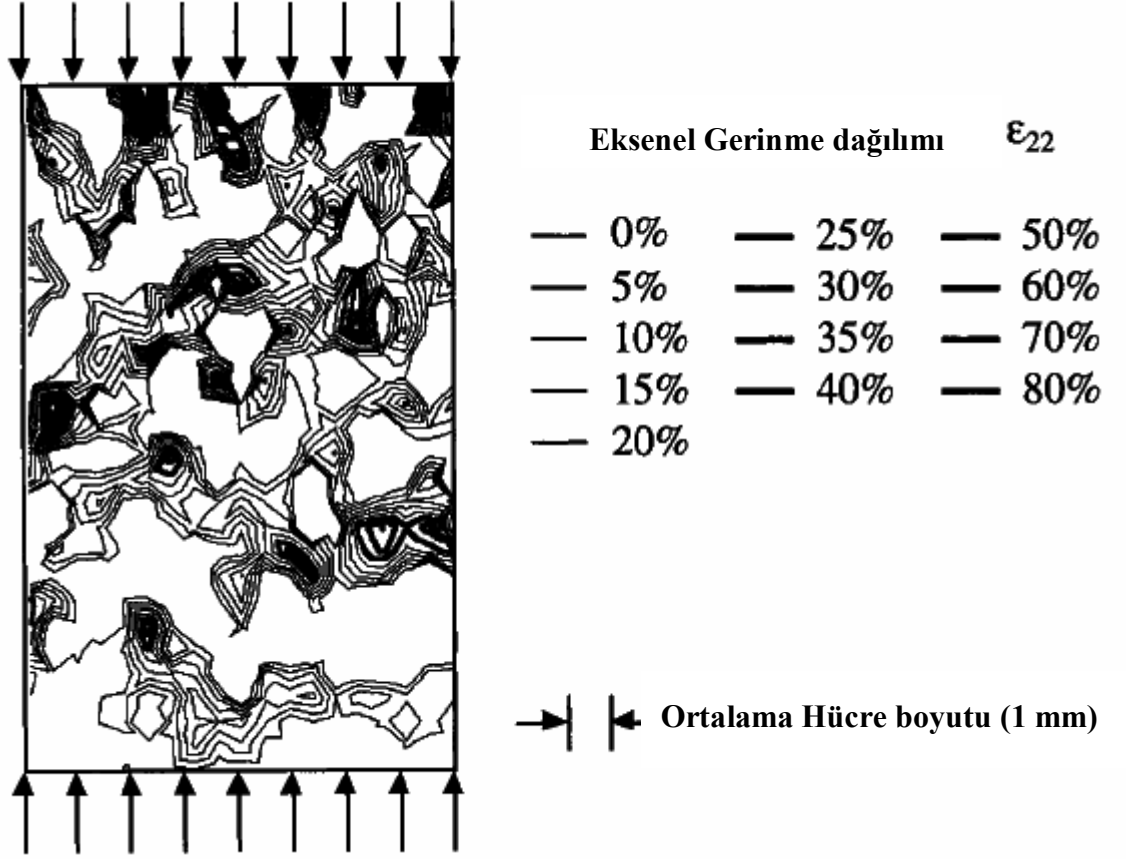


Şekil 2.49. Üç durum için (normal üretim, kuvvetlendirilmiş yapı, tavllanmış yapı) gerilme-gerinme grafikleri. Gerilme-gerinme grafikleri mikro-çekme testi ile elde edilmiştir. Her bir ısıl işlem için iki numune test edilmiştir (Zhoua ve ark. 2000)



Şekil 2.50. Normal üretim (a kolonu), Kuvvetlendirilmiş yapı (b kolonu) ve tavllanmış yapı (c kolonu) için yüklemenin son aşamasındaki deformasyonlar (Zhoua ve ark. 2000)

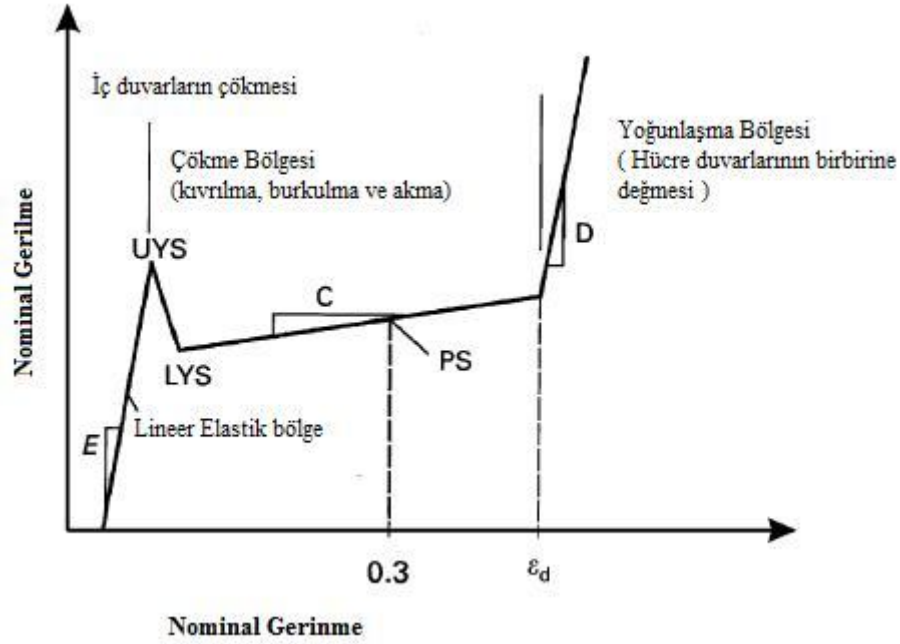
Ayrıca kullanılan numunelerin basma yükü altındaki deformasyonları şekil 2.50’de görülmektedir. b kolonundaki kuvvetlendirilmiş yapı tavllanmış numuneye kıyasla daha az deforme olmuştur.



Şekil 2.51. Numune geometri üzerinde bası gerilmesi altındaki Eksenel gerinme dağılımı (McCullough ve ark. 1999)

McCullough ve ark. (1999) tarafından yapılan çalışmada Şekil 2.51’de görüldüğü üzere basma yüklemesi altında deforme olan numune üzerinde yüzey değişimleri ölçülmüş ve bu değerler gerinme konturlarına dönüştürülmüşlerdir.

%20’lik nominal deformasyon anındaki şekilde rastgele gerinme dağılımının yüksek bölgesel gerinmelerden kaynaklandığı görülmektedir. Bu yapılarda zayıf olan hücrelerden ötürü diğer hücrelerin yük taşımaya çalışırlar. Ancak yine diğer lokal zayıflıklardan dolayı ezilme bandı dağılmaya başlamaktadır (McCullough ve ark. 1999).



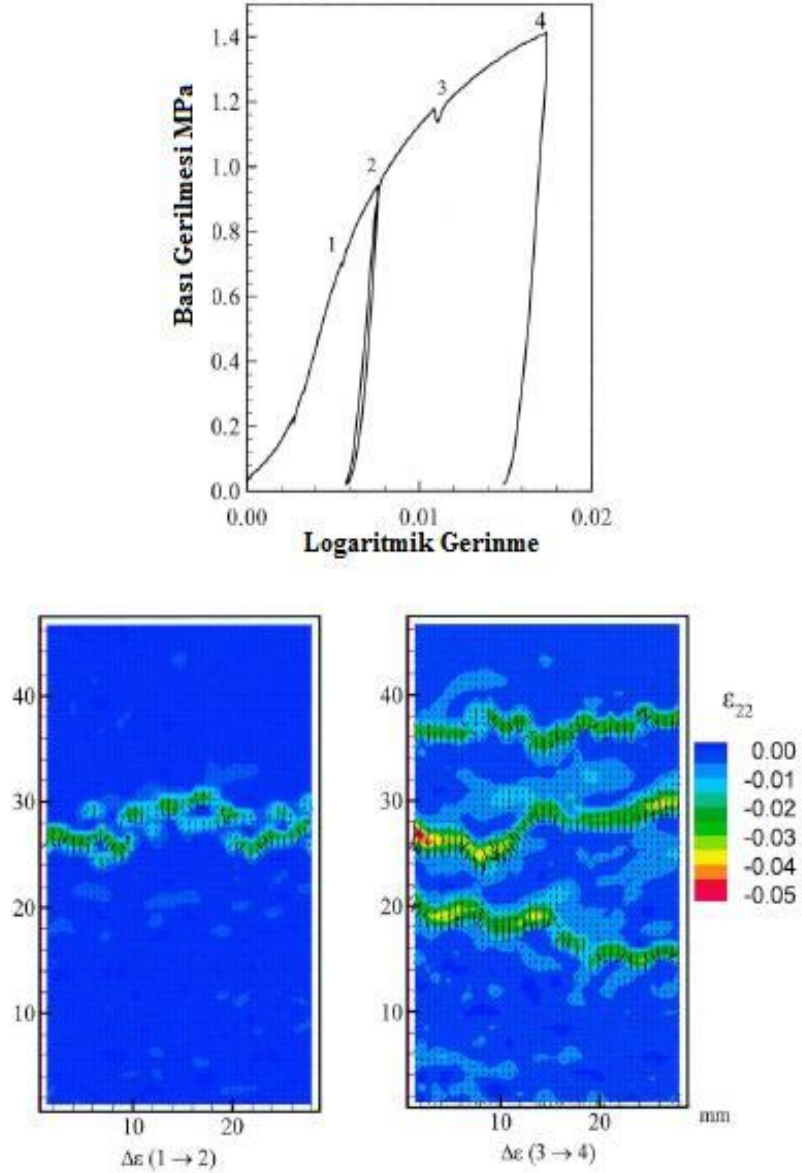
Şekil 2.52. Bası davranışının şematik gösterimi (Beals ve Thompson 1997)

Beals ve Thompson (1997) bası davranışı altında bulunan köpük malzeme için basma ektisi altındaki davranışı 3 ana bölüme ayırmışlardır. Şekil 2.52’de görüldüğü üzere birinci bölge akma noktasına kadar olan lineer elastik E eğrisi ile ifade edilir. Üst akma bölgesine ulaşıldığı anda (UYS) yükte bir düşme meydana gelir. Bu yükün düşüşü şematik gösterim üzerinde alt akma noktası(LYS) olarak belirtilmiştir. Ancak bu iki noktasın gerçek olarak tespit edilmesi ayrı bir çalışma kapsamındadır (Beals ve Thompson 1997).

İkinci bölge ise çökme bölgesi olarak tanımlanan düzlemsel gerilme bölgesidir (PS) ve C eğim ile ifade edilebilir. Son rejim bölgesi kritik gerinme değeri ile başlar ve hücre duvarları artık birbirine değmektedir. Bu bölge için de D eğimi ifadesi kullanılabilir. C ve D eğimleri bu eğirler üzerine oturtulmuş en iyi eğrilerin o noktadaki türevlerdir ki, bu değeri doğru tespit etmek oldukça güçtür (Beals ve Thompson 1997).

Yoğunlaşma noktasındaki kritik gerinme değeri direk olarak malzemenin yoğunluğuna bağlı olup, yoğunluğun artması ile kritik gerinme değeri düşmektedir. Kritik gerinme değeri için kullanılan bazı eşitlikler neticesinde bu değer genel olarak pek çok Alüminyum köpük için 0,81 ile 0,95 Aralığında olduğu tespit edilmekte olup,

bu değer çok hassas şekilde tespit edilmemektedir. Bu çalışmadaki kritik gerinme değerlerinin de 0,46 ve 0,68 Aralığında olması ilgili tespitin zorluğunu ortaya koymaktadır.



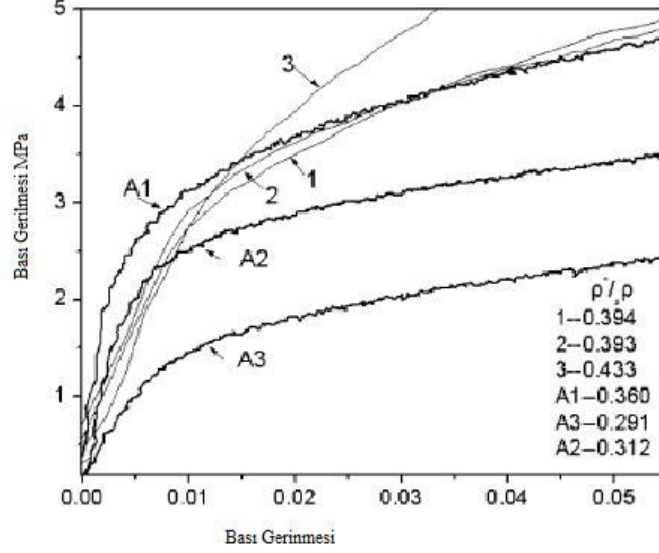
Şekil 2.53. Farklı gerinme kademelerine göre gerime haritası (Evans ve ark. 1999)

Evans ve ark. (1999) tarafından oluşturulan gerinme haritasında farklı gerinme kademeleri (1-2 ve 3-4 Aralıkları için) ve mekanizmalar incelenmiştir (Şekil 2.53).

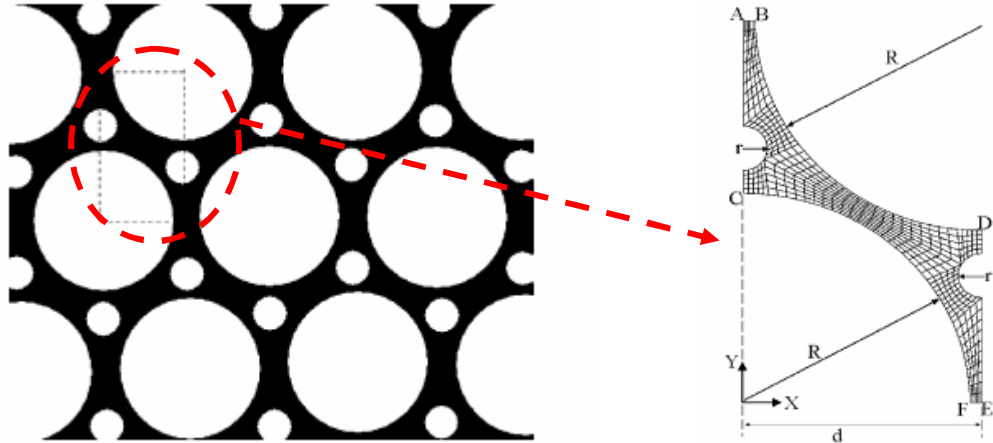
2.2.8. Mekanik zelliklerin tayininde sonlu elemanlar yöntemi

Han ve ark. (2004) ikincil boşlukların alüminyum köpük metallerin mekanik özelliklerine etkilerini deneysel ve hesaplamalı olarak incelemişlerdir. Araştırmalarının

sonucunda daha ufak boşlukların Elastisite modülünü ve mukavemeti artırdığı sonucunu çıkartmışlardır. Deneysel çalışma kısmında sonuçlardan kesin emin olmak için numune tipi başına 3 adet test yapılmıştır (şekil 2.54).



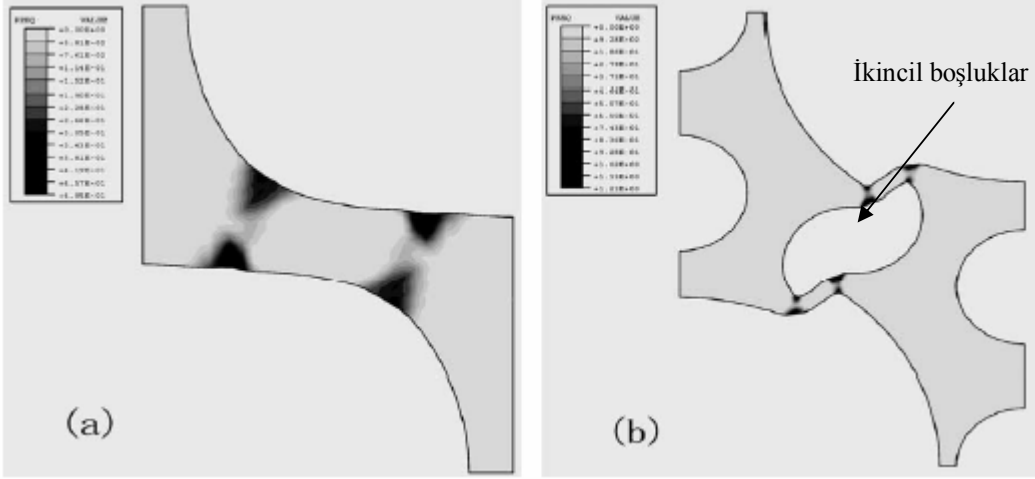
Şekil 2.54. Değişken boşluk boyutlarına bağlı olarak bası durumundaki gerilme-gerinme davranışı (Sanders ve Gibson 2003)



Şekil 2.55 (Solda) Hücre duvarları arasında dağılmış küçük boşlukların olduğu Alüminyum köpük modeli ve (sağda) bir kesitinden türetilmiş birim sonlu elemanlar modeli (Sanders ve Gibson 2003)

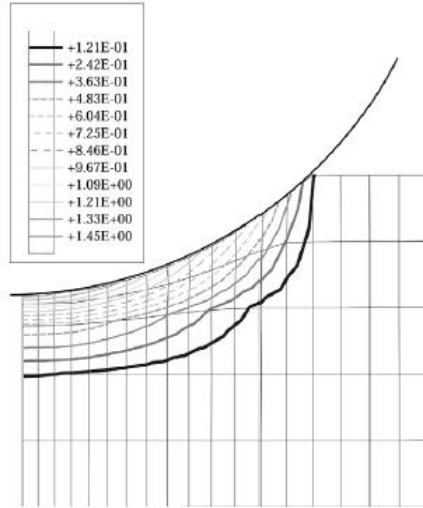
Kurulan sonlu elemanlar modeli (Şekil 2.55) ile bası gerilmesi için ince kesit yapılarının gerilme yığılmalarının olduğu bölgeler sebebi ile yapının akma gerilmesin

daha düşük olduğu sonucu çıkartılmıştır (HAN ve ark. 2004). Sonuçlardaki farklılıklar Şekil f.1.a ve Şekil f.1.b’de görülmektedir.



Şekil 2.56.a Tekil ana boşluklu numune için deformasyon dağılımı, b. İlave boşlukların olduğu model üzerinde deformasyon dağılımı (Han ve ark. 2004)

Şekil 2.57’de görüldüğü gibi Markari ve Cylne kurdukları Eksenel simetrik sonlu elemanlar modeli ile numunelerin statik basma neticesindeki deformasyonları ve plastik gerinme değerlerini elde etmeye çalışmışlardır.

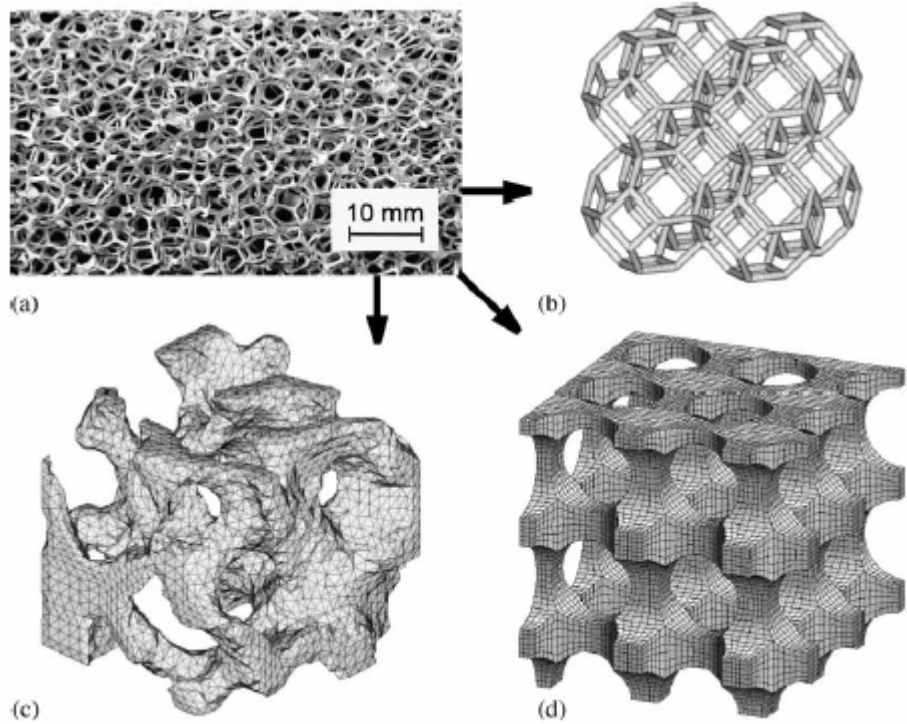


Şekil 2.57. Tahmin edilen plastik gerinimleri gösteren Deforme olmuş mesh modeli (Markari ve Cylne 2001)

Basma işlemi sırasında Şekil 2.57’de görülen deformasyon bölgesinde çentik, lokal gerilimler gözlenirken çevresindeki malzeme aslında bozulmamıştır. Sonuç olarak

hücre duvarlarının içinde mikro yapının doğası, metalik köpüklerin mekanik davranışında önemli bir etkiye sahiptir (Markari ve Cylne 2001).

Değişik yapıları hücreli metallerin matematiksel modellemesi (benzetimi), onların karmaşık yapısı yüzünden hala birçok çözülmemiş probleme bağlıdır. Bu yüzden, mekanik davranışın belirlenmesine yönelik çalışmalarda tek eksenli basma testleri ve hücreli bir metalin periyodik bir modelleri kullanılmaktadır (Öchsner ve Lamprecht 2003)

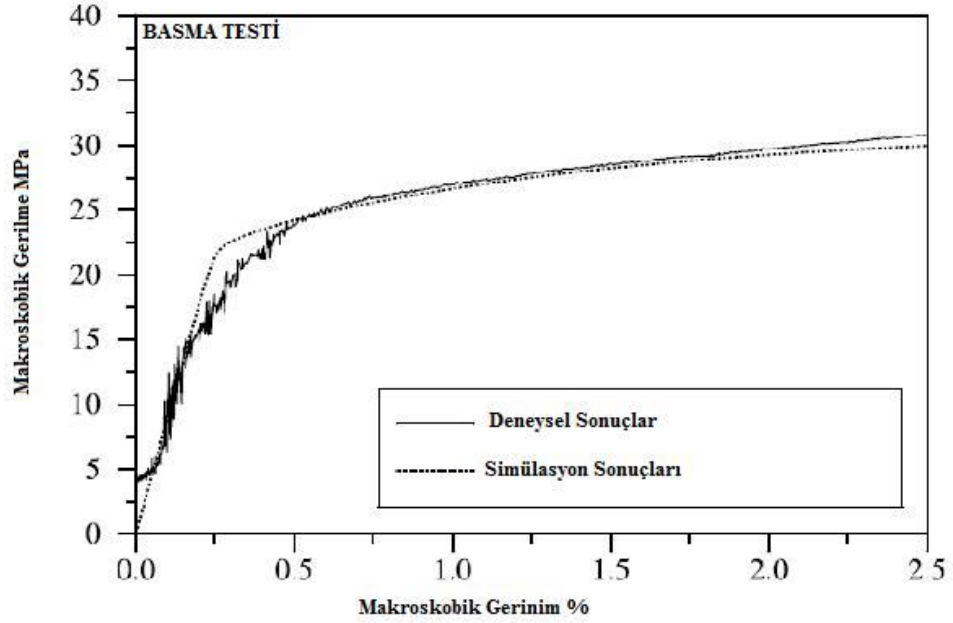


Şekil 2.58. Rastgele hücre yapıları için farklı modelleme yöntemleri (Öchsner ve Lamprecht 2003).

Şekil 2.58.b/c/d’de görüldüğü gibi rastgele dağılmış durumdaki hücre yapıları için çeşitli modelleme yöntemleri mevcuttur. Şekil 2.58.1a’da görülen açık hücreli petek yapı, esnek kriş elemanlarla, tarama sonucu elde edilen yapının kullanılması ile veya düzgün dağılmış boşluklu tüp şeklindeki modellemelerle analiz edilmektedir (Öchsner ve Lamprecht 2003).

Bu yöntemler genel olarak mikro yapı davranışını modellemede başarılıdır. Boşluklu tüp modelleme tekniğinde farklı parametreler kullanılarak elde edilen 1/8

sonlu elemanlar modelleri, katı malzeme için kullanılan mekanik özellikler ile analiz edilirler. Bu şekilde hesaplama süreleri ve diğer analiz zorlukları elimine edilmiş olur. Anca bu sonuçlar hassas sonuçlar elde edilmesinde pek kullanılmazlar. Bunun yerine geliştirilmiş köpük modellerini kullanmak, plastik düzlemsel gerilme bölgesindeki yoğunlaşma mekanizmalarını doğru tespit etmek açısından önem taşımaktadır (Öchsner ve Lamprecht 2003).

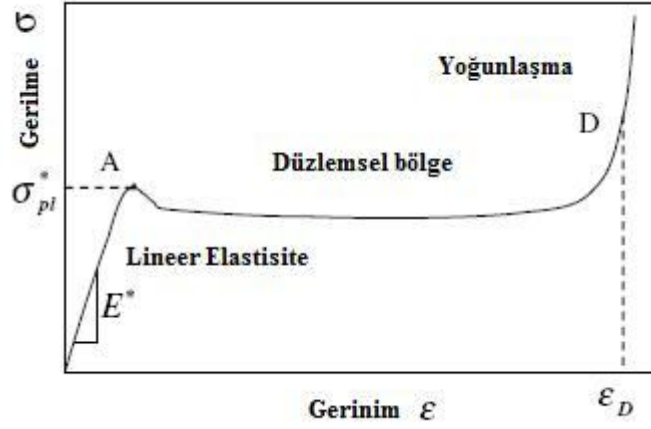


Şekil 2.59. Deneysel çalışma ile Simülasyon çalışması sonuçlarının karşılaştırılması (Öchsner ve Lamprecht).

Öchsner ve Lamprecht (2003)' in çalışmasında da şekil 2.59'de görüldüğü gibi, malzeme modelindeki eksiklik ve modelleme yönteminden dolayı, gelen olarak eğilim deneysel çalışma ile oturmuş, ancak ilgili detaylı noktaları için hassasiyet oldukça azdı ve bu değerler akma noktasının ve düzlem gerilme bölgelerinin tespit edilmesi için eksik kalmaktadır.

Şekil 2.60'de görülen temsili olarak görülen Mühendislik gerilme- gerinme eğrisinde, kritik bir gerinme değerinden sonra elastik burkulma mekanizmaları ile (çok düşük rölatif yoğunluklar için) veya plastik akma ve burkulma mekanizmaları sebebi ile gerilme değerlerine bir azalma meydana gelir (Hayes ve ark. 2004).

A noktasını plastik çöküşün başladığı nokta olarak tanımlayabiliriz. Bu noktadan sonra hücre duvarları geometrik boşluklardan dolayı çökerse, yapıda bir yumuşama meydana gelir. Bu yumuşama neticesinde düzlemsel gerilme bölgesi meydana gelir ki, bu bölgenin gerinme açısından karakteristiği hücre duvarlarının esnekliğine ve boşluk geometrilerine bağlıdır.



Şekil 2.60. Düzlemsel bası etkisi altındaki petek yapılı metaller için temsili Mühendislik Gerilme- Gerinme eğrisi (Hayes ve ark. 2004).

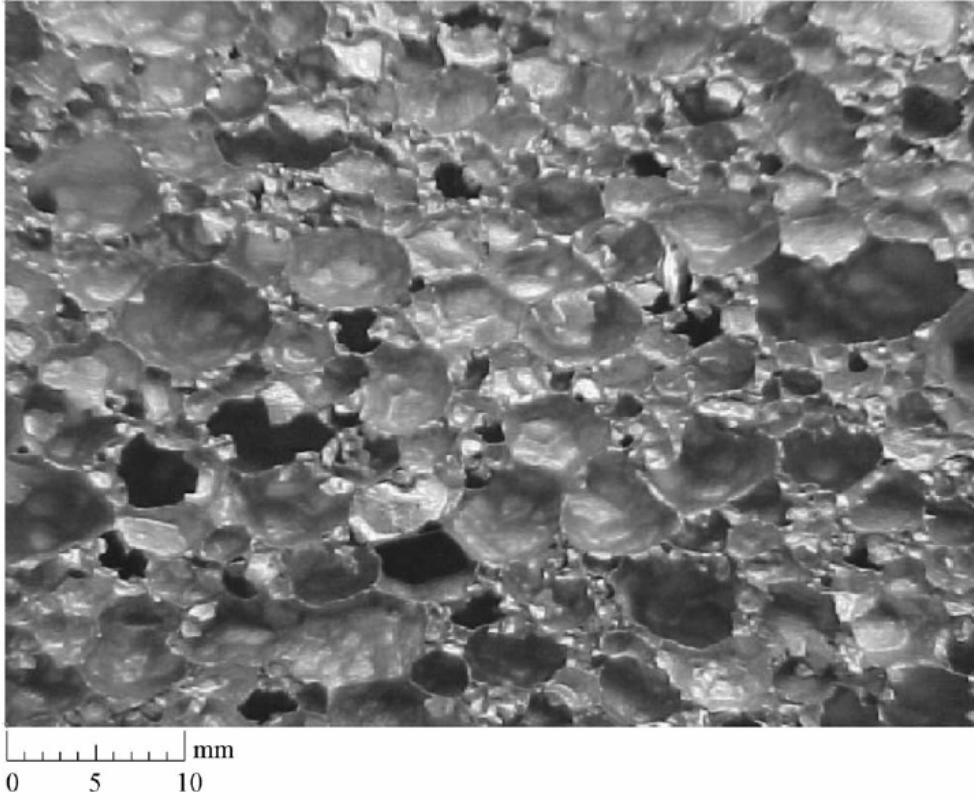
A ve D noktaları arasındaki bu çökme hücre duvarlarının birbirine değmeye başlamasına kadar devam eder ve bu noktadan sonra yapının sertliği ve katılığı artmaya başlar. Bu nokta teorik olarak yoğunlaşma noktası olarak tanımlanır.

Metal köpüklerde deformasyonun bir bölgeye yoğunlaşması konusunda Meguid ve ark. (2002) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çalışmalar yapmışlardır.

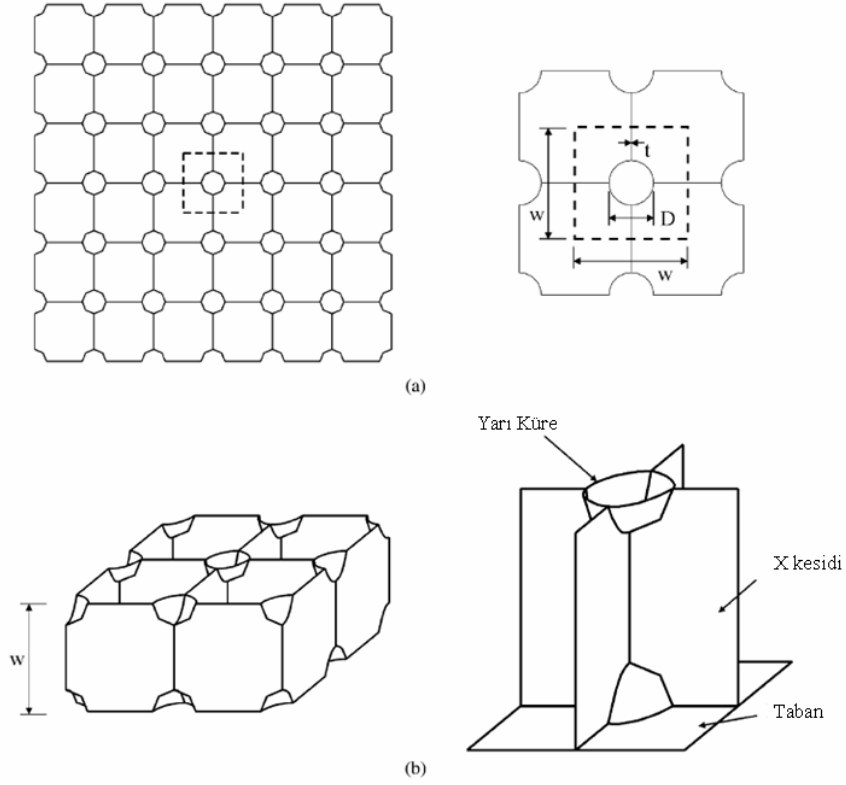
Meguid ve ark.nın (2002) çalışmasında, değişken uzaysal yoğunluk dağılıma sahip kapalı hücreli metal köpüklerin ezilme davranışının incelenmesi için geliştirilmiş ve temsili birim hücre modeli uygulanmıştır. Geliştirilmiş birim hücresi kullanılarak oluşturulan çok hücreli sonlu elemanlar modeli yaratılmıştır. Köpüğün quasi - statik

ezilmesinden elde edilen nominal σ - ϵ eğrisi deneysel bulgularla karşılaştırılmış ve eğer uygun yoğunluk dağılımı ele alınırsa sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

Şekil 2.61, Norsk Hydro Company Limited tarafından üretilmiş olan kapalı-hücreli alüminyum köpüğün topolojisini göstermektedir. Yapılan gözlemlere ve bu köpüğün geometrik karakteristiklerinin dikkatli incelenmesine dayanarak geliştirilmiş birim hücre modeli oluşturulmuştur. Şekil 2.62'deki geliştirilmiş birim hücre köpüğü oluşturan temel birim olarak kullanılmıştır.



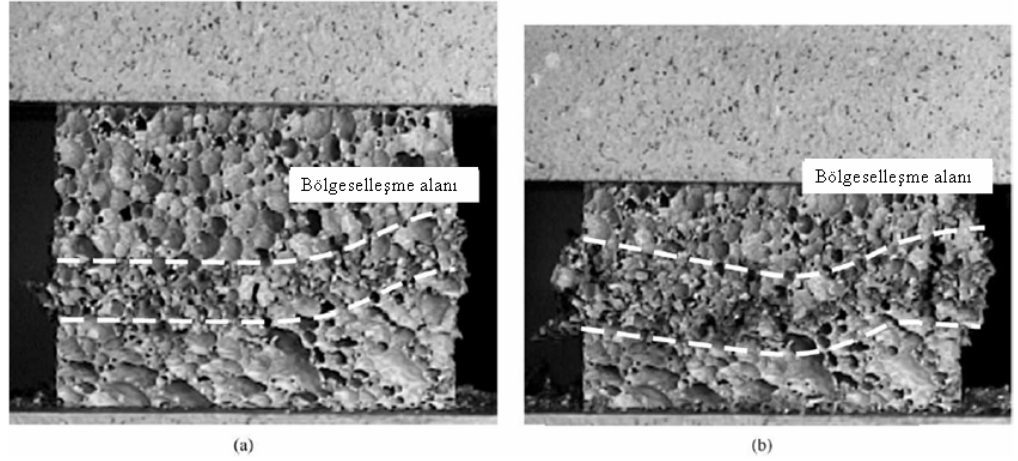
Şekil 2.61. Hidro alüminyum köpüğün tipik hücre yapısı (Zeguid ve ark. 2002)



Şekil 2.62. Geliştirilmiş birim hücre modeli a) üst görünüm b) isometrik görünüm
(Zeguid ve ark. 2002)

Katılaşma işlemi sırasında mevcut olan yüksek yüzey gerilimi nedeniyle köpük hücrelerinin doğada çoğunlukla küresel olduğuna inanılır. Geliştirilmiş birim hücrenin farklı bileşenleri enerjiyi membran ve/veya eğme şekil değiştirmesiyle sönmürler.

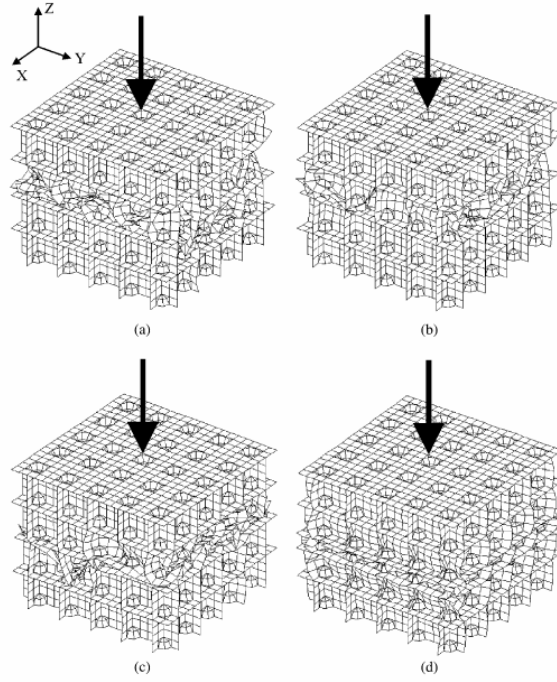
Norsk Hydro Company Limited'ten sağlanan 60 mm kalınlığında %10 bağıl yoğunluğa sahip alüminyum köpük plakasından elde edilen kübik numuneler üzerinde gerçekleştirilen sanki statik (quasi statik) basma testleri neticesinde yerel bir deformasyon davranışı olduğu bilinmektedir. Köpük bir test makinesinde iki paralel çelik plaka arasında 1mm/dak yer değişim kontrolü ile sıkıştırılmıştır. Bu basma testleri düzlem içinde olduğu gibi transvers yönde de gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.63'de boyuna basma testinde ezilmiş alüminyum köpük numune görülmektedir. Numunelerin orta bölümlerine yakın yerlerde meydana gelen bölgesel katlanmalar açıkça görülebilmektedir.



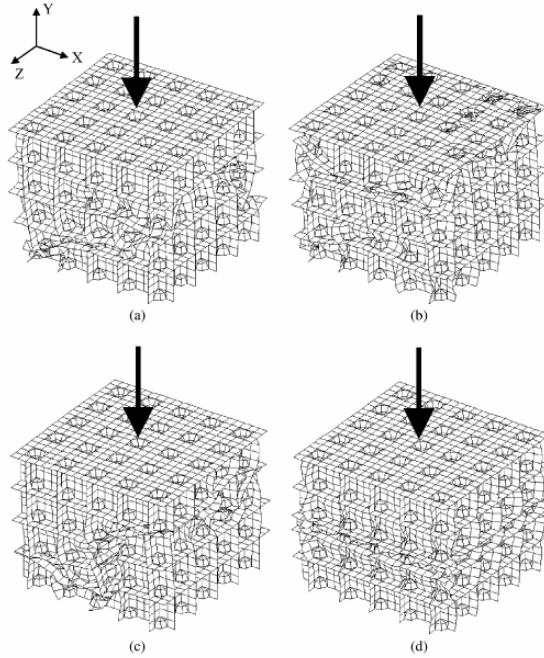
Şekil 2.63. boyuna basma altında hidro alüminyumda oluşan bölgesel deformasyon a) %20 deformasyon b) %40 deformasyon (Zeguid ve ark. 2002)

Yapılan çalışmada Eksplisit LS-DYNA kodunda 11500 kabuk elemanından oluşan 125 birim hücre oluşturulmuştur. Köpük hücrelere uygulanan tek sınır koşulu kinematik kontak tanımlamasıdır. Genel olarak, hem hücre büyüklüğü hem de duvar kalınlığı köpük yoğunluğunu etkiler, ancak bu çalışmada sabit hücre boyutu ve değişken duvar kalınlığı ele alınarak farklı yoğunluklar elde etmeye çalışılmıştır. Üç farklı gelişigüzel yoğunluk dağılımı ve bir sabit yoğunluklu olmak üzere dört farklı sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve yoğunluk değişiminin şekil değiştirmenin bölgeselleşmesindeki etkilerinin görülmesi amaçlanmıştır.

Oluşturulan bu modeller kullanılarak %10 bağıl yoğunluğa sahip alüminyum köpük ile yüksek çözünürlüklü sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.64 ve 2.65'te %18.4 nominal gerinim için boyuna (Transvers) ve düzlem içi şekil değiştirmeler görülmektedir.



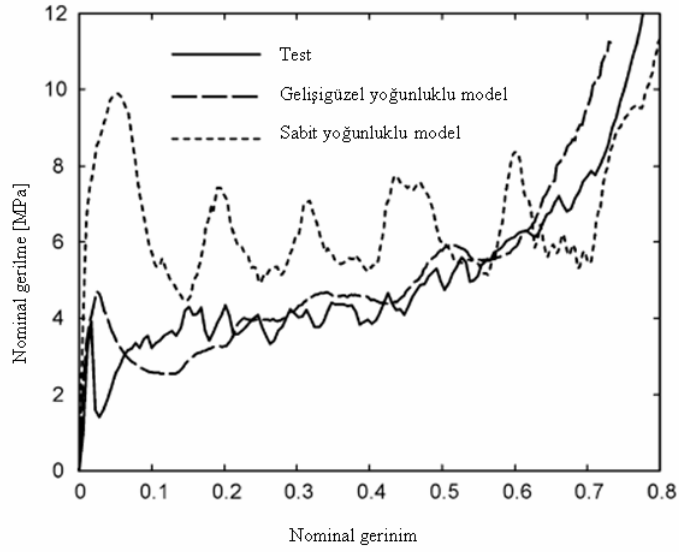
Şekil 2.64. %18.4 ortalama gerinimde çoklu hücre modellerinin boyuna sıkışması. (a), (b) ve (c) farklı gelişi güzel yoğunluk dağılımlı modeller, (d) ise sabit yoğunluklu modeldir (Zeguid ve ark. 2002)



Şekil 2.65. %18.4 ortalama gerinimde çoklu hücre modellerinin düzlem içi sıkışması. (a), (b) ve (c) farklı gelişi güzel yoğunluk dağılımlı modeller, (d) ise sabit yoğunluklu modeldir (Zeguid ve ark. 2002)

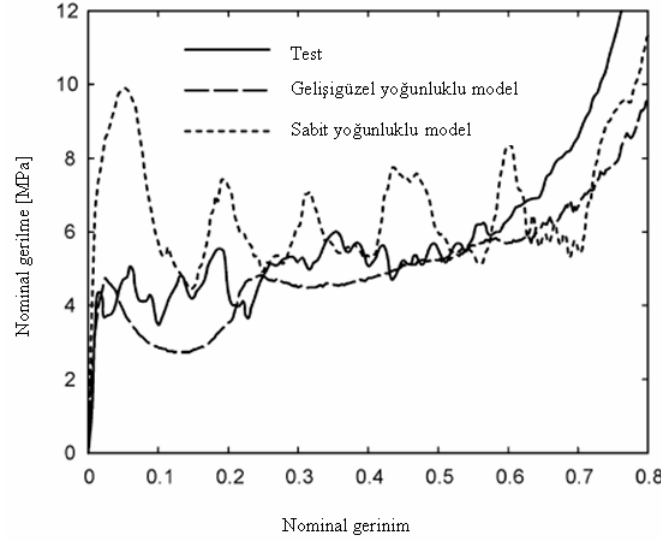
Bu şekil değişimlerinde görülmektedir ki, sabit yoğunluklu modelde şekil değiştirme bir katmana yoğunlaşmakta, diğer katmanlar ancak ilk katman ezildikten sonra şekil değiştirmeye başlamaktadırlar. Gelişigüzel yoğunluk dağılımlı modellerde ise kırımın farklı katmanlara yayıldığı farklı bir bölgeselleşme seyri izlediği görülmektedir.

Şekil 2.66 ve 2.67’de transvers ve düzlem içi basma testinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri ile, sabit yoğunluklu modelden ve gelişigüzel yoğunluk dağılımlı modellerden ortalama alınarak elde edilen gerilme-gerinim eğrileri görülmektedir. Bu eğrilerden, gelişigüzel yoğunluk dağılımına sahip modellerden elde edilen sonuçların test sonuçları ile çok iyi uyduğu görülmektedir.



Şekil 2.66. Boyuna basma için nominal gerilme-gerinim eğrileri (Zeguid ve ark. 2002)

Şekil z-9’da görüldüğü üzere bölgesel yoğunluk değişimlerinin istatistiki doğası şekil değiştirmenin bölgeselleşmesini önemli ölçüde etkilemekteyken, köpüğün nominal gerilme-gerinim davranışında sınırlı etkiye sahiptir.



Şekil 2.67. Düzlem içi basma için nominal gerilme-gerinim eğrileri (Zeguid ve ark. 2002)

2.3. Metalik malzeme test yöntemleri

2.3.1. Darbe Testleri

Tokluk; en genel ifade ile bir malzemenin çatlak ilerlemesine karşı gösterdiği direnç olarak bilinmektedir. Yükleme koşullarında malzemede çatlak oluşumu ve artan yüklerle beraber bu çatlakın büyümesi, nihayetinde de malzemenin kırılmasına kadar geçen süre içinde yapı içinde enerji absorbe edilmektedir.

Malzemenin tokluğu ne kadar fazla ise absorbe edilen enerji miktarı o kadar fazla olacaktır (http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html, 2006). Çekme veya basma durumunda elde edilen basit bir gerilme-gerinim eğrisi altında kalan alan, malzemenin çok yavaş artan yükleme koşullarında (sanki statik) tokluğunun bir ölçütüdür. Fakat darbe testleri bahsinde daha çok numune üstüne oluşturulan çentik sayesinde malzemenin daha çabuk veya gevrek kırılmaya karşı direnci olarak ifade edilen çentik tokluğu veya göz ardı edilemeyecek hızlardaki yükleme koşulları göz önüne alınacaktır (http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html, 2006).

Bir metal oldukça sert olabilir. Bu nedenle bu metalden yapılan bir parça hizmet süresi boyunca ani yüklemelere maruz kaldığı uygulamalar için uygun olmayabilir. Sanki statik yükleme koşulları altında güvenli kabul edilebilecek gerilme değerleri, ani yüklemeler şeklinde uygulandığında malzemeler oldukça farklı davranış sergilemektedir. Bu yüzden, bilhassa metalik malzemeler için darbe testleri en temel mekanik testlerdendir (<http://www.mslab.boun.edu.tr/impactweb.pdf> 2006)

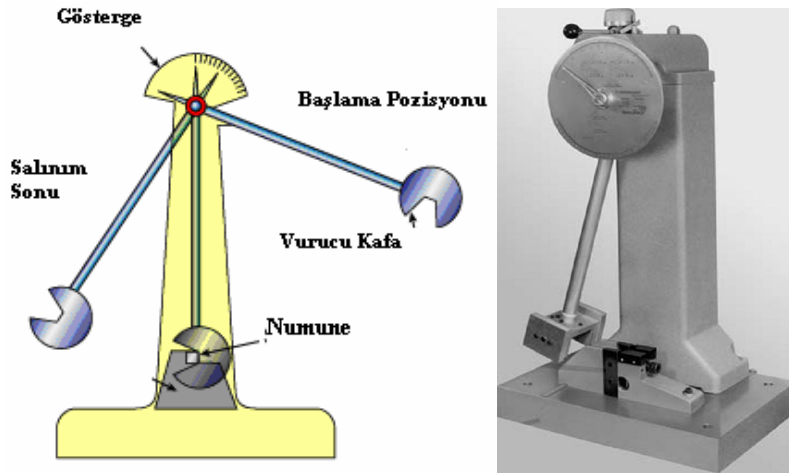
Temel olarak iki tip darbe testi vardır. Bunlar;

- a) Sarkaç
- b) Ağırlık düşürme' dir.

2.3.1.1 Sarkaç Tipi Darbe Testleri

Sarkaç tipi darbe testlerinde iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar;

- a) Izod Yöntemi
- b) Charpy Yöntemi' dir.



Şekil 2.68. Sarkaç tipi darbe test cihazının gösterimi

(http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html, 2006).

Sarkaç tipi darbe testleri temel olarak Şekil 2.68'de gösterildiği gibidir. Bu tip testler bir sarkacın ucuna yerleştirilmiş vurucu bir kafanın bir test numunesine belirli bir yükseklikten bırakılıp çarptırılması esasına dayanır. Kafa; numuneye salınma yörüngesinin en alt noktasında darbe uygulayacak şekilde bir konumlandırma yapılır. Dolayısıyla; temel fizik bağıntıları vasıtasıyla darbe noktasında vurucu kafanın sahip

olduğu kinetik enerji hesaplanabilmektedir. Kafa, test numunesine çarptığında, sahip olduğu enerjinin bir bölümü numune tarafından plastik deformasyon enerjisine çevrilmek üzere sönümlenir.

Malzeme daha fazla enerji snmleyemeyecek hale geldiğinde (atlak oluşumu ve çatlakların malzeme bünyesinde dağılması ve büyümesi) kırılma meydana gelir. Kafanın kalan kinetik enerjisine göre salınım hareketi devam eder ve kol karşı tarafta belirli bir ykseklige kadar çıkar (<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=2763>, 2007). Sarkacın bırakıldığı ykseklkte sahip olduğu potansiyel enerji ile karşı tarafta tırmandığı ykseklkteki potansiyel enerjisi arasındaki fark numune tarafından sönümlenen darbe enerjisi miktarını vermektedir Böyle bir düzenekte sarkaç kolunun yataklanması önem arz etmektedir. Malzeme tarafından sönümlenen darbe enerjisi miktarının tayininin daha kesin olarak belirlenebilmesi için salınım boyunca yataklarda sürtünmeden ve hava direncinden dolayı ısıya dönüşen enerji miktarı basit bir hesapla belirlenebilir (<http://www.mslab.boun.edu.tr/impactweb.pdf>, 2006).

Bunun için herhangi bir test numunesi olmaksızın sarkaç kolu belirli bir ykseklkten bırakıldığında bir salınım sonunda karşı tarafta ne kadar ykseklige tırmandığının bulunması gerekir. Böylece test cihazında bir kalibrasyona gidilir. Cihaz üzerinde bulunan bir gösterge vasıtasıyla hesap yapılmaksızın sönümlenen enerji miktarı okunabilir (www.instron.com, 2007).

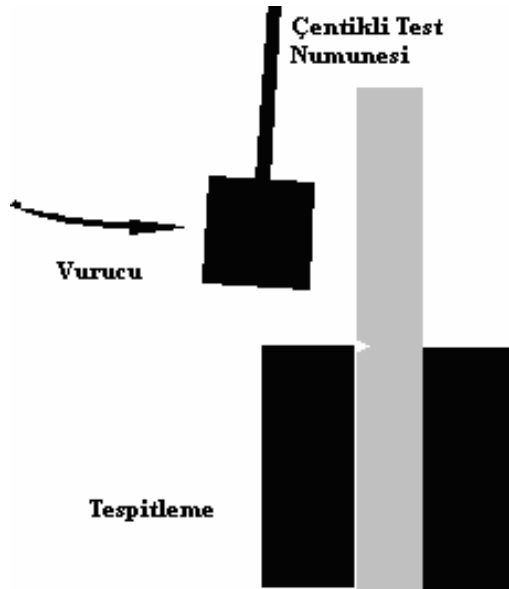
Temel olarak çalışma prensibi açıklanan tip darbe testlerinde uygulama alanında iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Izod ve Charpy olarak adlandırılan bu yöntemler hızlı ve ekonomik olduğundan malzemelerin darbe tokluğu veya izafi tokluklarının belirlenmesi amacıyla kullanılır.

Her ikisi de kesin sonuçlar veren testler olmaktan çok mukayese amacı ile kullanılan testlerdir. Tokluk değerleri daha iyi olan bir malzemeye göre numunenin özellikleri belirlenir (http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html, 2006).

Malzemelerin darbe dayanımları iki farklı standarda göre tarif edilebilir. ISO standardında darbe dayanımı; darbe enerjisinin çentiğin kesit oranına bölümüyle elde edilecek şekilde KJ/m^2 biriminde ifade edilir. ASTM standardında ise darbe enerjisinin çentik uzunluğuna bölümü şeklinde bulunan J/m cinsinden bir birim mevcuttur (<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=2763,2007>). Bu iki birbirine oldukça benzer test tipinin uygulama aşamasında bir takım farklılıklar mevcuttur.

2.3.1.1. Izod Testi

Izod testi; polimere malzemelerin darbe dirençlerinin mukayesesinde standart bir test prosedürü haline gelmiştir. Diğer malzemelere de uygulanabilmektedir. Izod testinde kullanılan numuneler; herhangi bir malzeme grubunun test edildiğine bağlı olarak değişmektedir. Metalik malzemeler için dairesel kesitli olanlar tercih edilirken, polimerik test numuneleri uzun kenarların paralel bir ekseninde çarpışma olacak şekilde dikdörtgen kesitlidir. Bu test tipinde kullanılan numuneler üzerinde genellikle V şeklinde çentikler mevcuttur. Numuneler, V şeklindeki çentiğin yüzü, vurucu kafaya bakacak şekilde cihaza sabitlenir. Şekil 2.69'da Izod darbe testinin şematik gösterimi mevcuttur (<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=2763,2007>).



Şekil 2.69. Izod darbe testinin şematik gösterimi

<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=2765,2006>

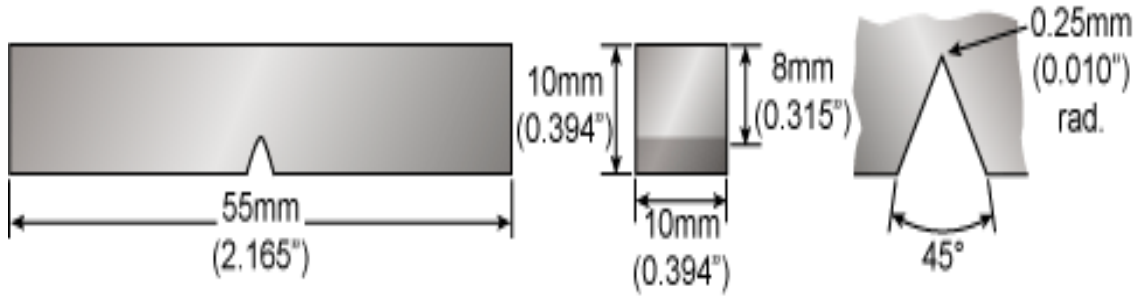
2.3.1.2. Charpy Testi

Bu test tipinin en genel kullanım alanı metallerdir. Bunun yanında polimer, seramik ve kompozit malzemelere de uygulanabilmektedir.

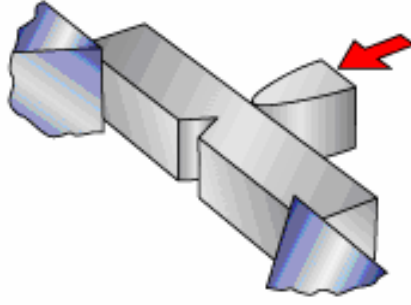
Charpy testi numuneleri genel olarak 55x10x10 mm boyutlarındadır ve numunelerin en büyük yüzlerinden birine oluşturulmuş bir çentikten meydana gelmektedir. Oluşturulmuş bu çentik;

- V şeklinde – 2 mm derinlikli, 45° tepe açısına ve 0,25 mm köşe radyüsüne
- U şeklinde – 5 mm derinlikli ve 1 mm uç radyüsüne sahip olabilmektedir.

Bu test tipinde numune her iki ucundan da sabitlenir. Vurucu kafa test numunesine çentiğin hemen arkasındaki yüzden çarptırılır. Şekil 2.70.a ve Şekil 2.70.b’de Charpy testinde kullanılan V çentikli numune boyutlarını ve numuneye vurucu kafanın çarpma biçimini göstermektedir (The A to Z of Materials, web sitesi).



Şekil 2.70.a Charpy testinde kullanılan V çentikli numune boyutları
(http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html, 2006).

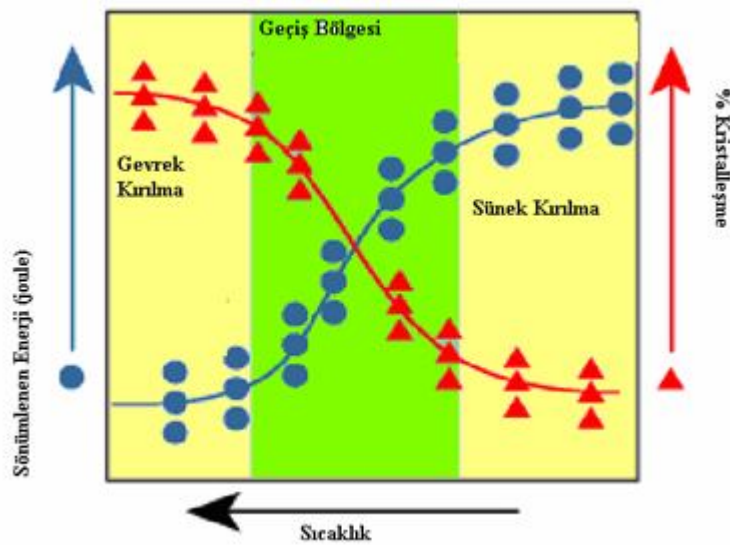


Şekil 2.70.b Vurucu kafanın numuneye çarpma biçimi

(http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html, 2006).

Darbe testleri farklı sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinde, numunenin sünek bir yapıda olsa bile gevrek bir kırılma davranışı gösterebildiği gözlemlenmiştir. Bazı malzeme gruplarında, düşen sıcaklıklarla birlikte darbe geçiş sıcaklığı adı verilen bir bölgenin altında bu durum meydana gelmektedir. Düşük alaşımlı çelikler ve karbon çelikleri bu tip performans sergileyen malzemelere örneklerdir (http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html, 2006).

Şekil 2.71 farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen darbe testlerinde, numune tarafından sönmülenen enerjinin sıcaklığa göre değişimini gösteren ve literatürde “S” eğrisi adını alan grafiğin gösterimidir



Şekil 2.71 “S” eğrisi (http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html, 2006).

Bu grafikte yukarıda sözü edilen çelik grubunda sıcaklığın düşmesiyle kırılma mekanizmasının sünek bir durumdan gevrek bir duruma geçişi görülmektedir. Darbe geçiş sıcaklığı adı verilen aralıkta kırılma her iki performansın bir karışımı şeklinde gerçekleşmektedir. Grafikten de görülebileceği gibi aynı malzeme kullanıldığında sünek kırılma durumunda daha yüksek miktarlarda enerji sönmelenmektedir. Bundan dolayı, tasarım aşamasında kullanılacak malzeme grubunun hangi sıcaklık aralığında çalışacağıının bilinmesi ve bu esasa göre seçim yapılması hayati bir önem taşımaktadır (http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html, 2006).

Bu grafik, farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen darbe testlerinde, numune tarafından sönmelenen enerjinin sıcaklığa göre gösteren eğriyi de içermektedir. Grafikteki “S” eğrisinin şekli, alt ve üst sıcaklık aralıklarının pozisyonu gibi parametreler, malzemenin kompozisyonu, ısıl işlemler ve malzemenin kaynak edilip edilmediği gibi birçok faktöre göre değişmektedir.

İyi bir çentik tokluğunun istendiği durumlarda tüm bu faktörler kontrol edilmelidir (http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html, 2006). Paslanmaz çelikler, nikel ve alüminyum alaşımları gibi malzemeler bu tip bir kırılma davranışı göstermezler. Paslanmaz çelik kompozisyonu içinde bulunan nikel veya krom alaşım elementleri düşük sıcaklıklarda bile martenzitik yapının oluşumunu engeller. Kompozisyon içinde ana faz daima ostenit fazıdır. Ostenitik faz, alüminyum ve nikel alaşımlarının ortak özelliği kristal yapılarının yüzey merkezli kübik (YMK) yapıda olmasıdır. YMK yapıya sahip malzemelerde darbe geçiş sıcaklığı gibi bir aralık ve düşen sıcaklıklarda beraber kırılma davranışının değişimi gibi bir olay gözlenmez.

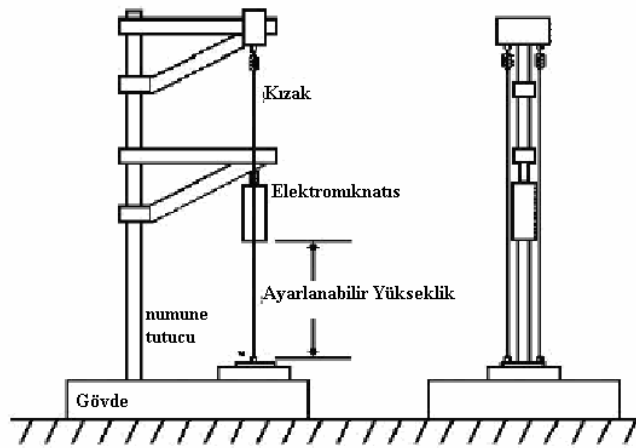
Testi gerçekleştirdikten sonra, numunenin kırılma kesitine bakılarak malzemenin nasıl bir kırılma davranışı gösterdiğini belirlemek mümkündür. Gevrek kırılma durumunda kesit parlak ve kristalleşmiş bir görüntüye sahiptir. Sünek durumda ise mat ve lifli bir kesit oluşumu gözlemlenir. Dolayısıyla kırılmış numune üstünde kristalleşmiş, parlak bölge yüzdesi gevrek kırılma oranı hakkında bilgi vermesi nedeniyle önemlidir (http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html, 2006).

2.3.1.2. Ağırlık Düşürme Darbe Testleri

Sarkaç tipi darbe testlerinde malzeme tarafından sönmülenen darbe enerjisinin belirlenebilmesi için numunenin kırılma zorunluluğu ve bu tip testlerin mukayese esasına dayanması dolayısıyla malzemenin tokluk özelliği hususunda genellemeden öteye geçmemesi nedeniyle köpük metaller gibi darbe özellikleri çok az bilinen bir malzeme grubuna ağırlık düşürme darbe testleri uygulanmaktadır. Ağırlık düşürme darbe testleri; Izod ve Charpy testlerine benzer bir şekilde malzemenin darbe dayanımının belirlenmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir.

Bundan önce anlatılan yöntemlerden farkı, uygulanacak darbe enerjisine göre seçilen kütlelerin farklı yüksekliklerden numune üzerine düşürülmesini esas alır (<http://composite.about.com/library/glossary/d/bldef-d1797.htm>, 2006)

Şekil 2.72 ağırlık düşürme darbe testlerinde kullanılan düzeneği göstermektedir. Numuneye çarptırılan ağırlık, bir mıknatıs veya sürücü devre yardımıyla istenilen bir yüksekliğe kadar çıkarılır. Bu yükseklikten serbest bırakılan ve bir kızak üzerinde serbest düşme hareketi yaparak numuneye çarpan bu kütle, numuneye bırakıldığı yükseklikte sahip olduğu potansiyel enerji büyüklüğünde bir darbe enerjisini uygulamış olmaktadır.



Şekil 2.72 Ağırlık düşürme darbe testi şematik gösterimi (Montaini 2005).

Bu test yönteminin daha önce anlatılan yöntemlere göre önemli avantajları vardır. Birçok malzeme için hammadde durumundan nihai ürün aşamasına kadar geçen işleme süreci; darbe performansı karakteristiğini direkt olarak etkilemektedir. Izod ve Charpy gibi standart test yöntemleri, hammadde araştırmaları ve kalite kontrol uygulamaları için oldukça önemli olmasına rağmen mühendislerin tasarlamış oldukları bileşenlerin nihai durumda gerçek hayatta karşılaşılan darbe koşullarına karşı nasıl bir davranış sergileyecekleri konusunda yeterli bilgiler sağlayamadıkları görülmektedir (www.instron.com, 2007).

Numuneye düşürülen kütleyle farklı şekil ve formlar kazandırılarak gerçekçi darbe koşullarının benzetim ile edilebilmesi bu yöntemin en önemli avantajlarından biridir (Munoz 2005).

Numune üzerinde meydana gelen hatanın tercihli bir yönlenme olmaksızın tek yönlü olması ve bu nedenle numunenin en zayıf noktasından başlayıp, buradan yayılan çatlakların ilerleme yönünün bilinebilmesi için malzemenin darbe davranışının daha kolay belirlenebilmesine olanak sağlanmaktadır. Ayrıca, numune üzerinde gereksinimlere göre darbe sonrası meydana gelen hataların deformasyon, çatlak başlangıcı veya tamamen kırılma gibi farklı biçimlerde belirlenebilmesi ve numunenin diğer yöntemlerde olduğu gibi kırılma zorunluluğunun olmaması yöntemin bir diğer avantajıdır (www.instron.com, 2007).

Günümüzde birçok üretici, ürünlerinin darbe performansının belirlenmesi hususunda daha modern cihazlara gereksinim duymaktadır. Darbe sonrası malzeme bünyesinde meydana gelen değişimlerin yanında, uygulama esnasında numunede süregelen değişimlerin gözlemlenmesi ve bu verilerin toplanabilmesi büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle optik hız sensörleri, dijital ivmelendirici ve buna benzer elektronik aygıtların test cihazları üzerinde kullanılması yoluna başvurulmaktadır. Bundan başka, numune üzerine yerçekimi etkisiyle düşürülen kütle esasına dayanan düzenekler yanında bilgisayar kontrollü tahrik mekanizmaları ile istenen darbe enerjisini ve gerekli

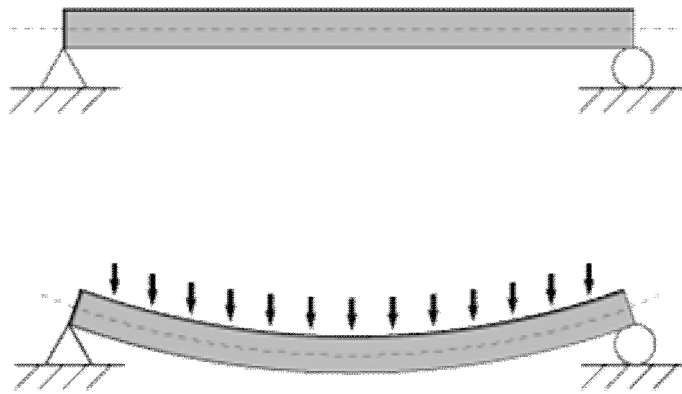
hız değerlerini daha kesin ve yüksek bir doğrulukla sağlayan dzeneklerin kurulması m¼mk¼nd¼r.

Bu tip bir dzeneg¼n, ağırlık d¼ř¼rme esasına g¼re en ¼nemli avantajı; darbeyi meydana getiren kafanın kayar yataklar vasıtasıyla daha iyi desteklenmesi nedeniyle ¼ok daha kolay ve efektif bir bi¼imde tahrik edilebilmesi ve y¼nlendirilebilmesidir. Test cihazı; numuneye iletilen kuvveti ¼l¼mek ¼zere vurucu kafanın arkasına yatay olarak yerleştirilmiş piezzo elektrik bir ivme ¼l¼erle donatılmıştır. Buna ek olarak, darbe başlangıcındaki hızı ¼l¼mek i¼in optik bir hız sens¼r¼ sisteme ilave edilmiştir (Montanini 2005).

2.3.2. 3 Ve 4 Nokta Eğme Testleri

M¼hendislik mekaniğinde; eğilme yanal y¼ke maruz yapısal bir bileşenin sergilediği davranışı karakterize etmektedir.

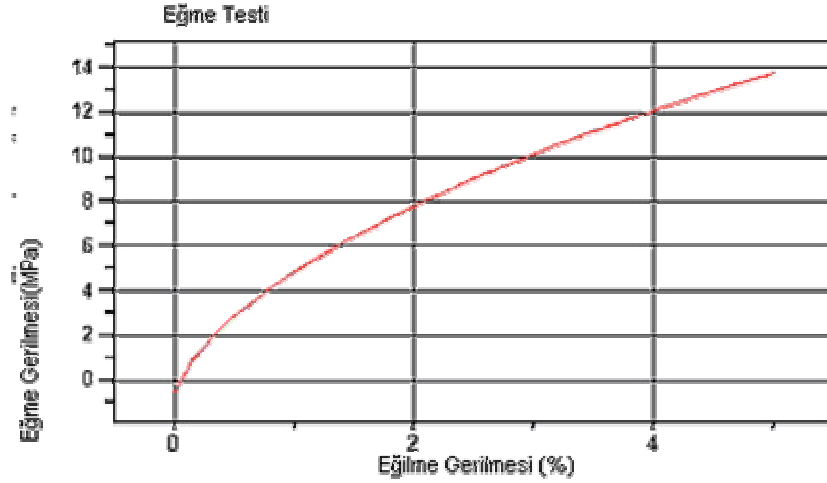
Eğmeye zorlanan bu yapısal bileşen kiriş olarak adlandırılır. Bir giysi dolabında; giysilerin asılması i¼in konulan bir kirişin eğilmesi bu duruma g¼zel bir ¼rnektir (http://en.wikipedia.org/wiki/Three_point_flexural_test, 2007)



şekil 2.73 Eğme test modu

(http://en.wikipedia.org/wiki/Three_point_flexural_test, 2007)

Eğme test metodu; basit bir kiriş yüklemesine maruz malzemenin davranışını ölçmektedir (Şekil 2.73). Yükün belirli oranlarda arttırılması ile maksimum gerilme ve gerinme değerleri hesaplanmaktadır. Bu amaçla yapılmış olan bir testten elde edilen değerler Şekil 2.74'deki gerilme-gerinme diyagramında gösterilmiştir (http://en.wikipedia.org/wiki/Three_point_flexural_test, 2007)



Şekil 2.74 Gerilme-gerinme diyagramı (www.instron.com, 2007)

Eğme dayanımı; malzemenin en dış yüzeyinde oluşan maksimum gerilme olarak tanımlanmaktadır. Numunenin dış bükey veya gerilmenin maksimum olduğu kenarın yüzeyinden hesaplama yapılır. Eğme modülü ise gerilme-gerinme eğrisinin eğiminden elde edilmektedir. Böyle bir eğride linear bir bölge mevcut değilse, eğimi belirlemek üzere eğriye gerinme değerinin %0,2'lik bölümünden teğet bir doğru çizilmesi suretiyle modül belirlenebilmektedir (http://en.wikipedia.org/wiki/Three_point_flexural_test, 2007)

Bir eğme testi; numunenin dış bükey yüzeylerinde çekme gerilmesi, iç bükey yüzeylerde bası gerilmesi oluşturur. Bu durum, numunenin orta yüzeyinde kesme gerilmesi durumuna maruz bir alanın ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Malzeme bünyesinde meydana gelecek tahribatın bası veya çeki gerilmesi tarafından oluşumunu güvence altına alabilmek için, kesme gerilmesinin minimize edilmesi gerekmektedir.

Bunun için; numunenin uzunluğunun kalınlığına oranının belirli olması gerekmektedir. Birçok malzeme için bu oranın 16 civarında olması istenir.

Fakat bazı malzemelerde (bilhassa gevrek olanlar), kesme gerilmesinin düşürülmesi için bu oranlar 32 veya 64 olarak değiştirilebilmektedir (http://www.instron.com.tr/wa/applications/test_types/impact/test_types.aspx, 2006).

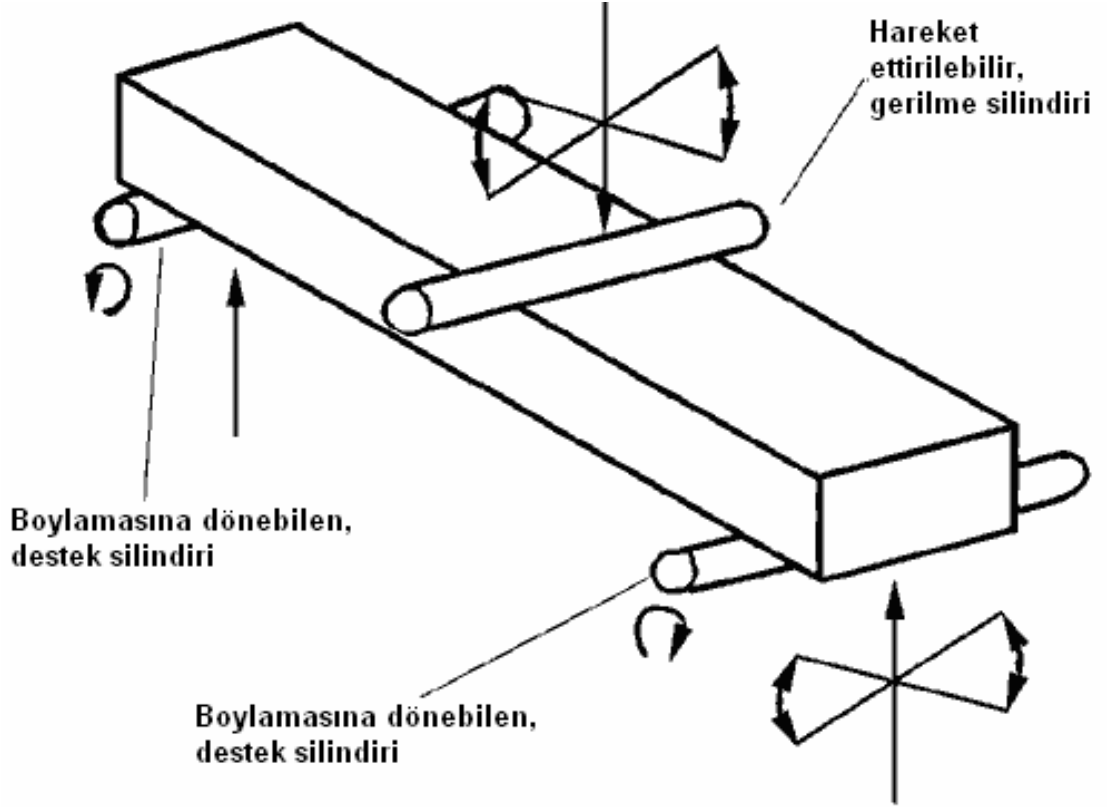
Eğme testinden elde edilen veriler kalite kontrol uygulamaları için büyük bir öneme sahiptir (<http://composite.about.com/library/glossary/d/bldef-d1797.html>, 2007).

Eğme testlerinde belli başlı iki tane yöntem mevcuttur. Bunlar;

- 3 Nokta eğme testi
- 4 Nokta eğme testi 'dir

3 nokta eğme testinde, uniform gerilmenin olduğu alan nispeten daha küçüktür ve yükleme noktasının merkezinin altında yoğunlaşmıştır. 4 nokta eğme testinde ise, uniform gerilme alanı yükleme noktalarının arasında oluşmaktadır (www.instron.com 2007). Şekil 2.75'de bu durum şematik olarak gösterilmektedir.

3 nokta eğme testi; eğilme durumunda Elastisite modülü, E_b , malzemenin eğilme gerilmesi – gerilmesi cevabına yönelik değerler sağlamaktadır. Bu testin en önemli avantajı numune hazırlanması ve test edilmenin kolay olmasıdır. Fakat elde edilen sonuçların yükleme ve numune geometrisi, gerilme hızına duyarlı olması gibi dezavantajlara da sahiptir (http://en.wikipedia.org/wiki/Three_point_flexural_test, 2007)



Şekil 2.75 3 nokta eğme testi

(http://www.keramverband.de/brevier_eng/10/5/1/10_5_1_1.html, 2005)

Bu test sonucunda elde edilen eğilme gerilmesi, gerinmesi ve elastisite modülü gibi değerler aşağıdaki formüller yardımıyla analitik olarak elde edilebilmektedir:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (2.6)$$

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (2.7)$$

Bu denklemlerde;

σ_f = Numunenin orta noktasının en dış yüzeyinde meydana gelen gerilme değeri, (MPa)

ϵ_f = En dış yüzeydeki gerilme değeri, (%)

E_B = Eğme Elastisite modülü, (MPa)

P = Yük – deplasman eğrisi üzerinde verilen bir noktadaki yük değeri (N)

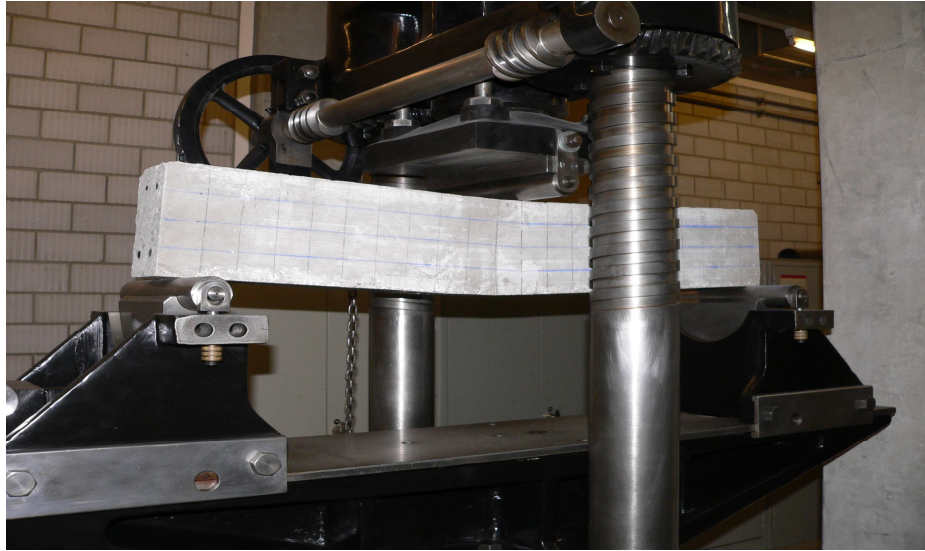
L = Desteklenen köşelerin uzunluğu, (mm)

b = Test edilen kirişin genişliği, (mm)

d = Test edilen kirişin kalınlığı, (mm)

D = Kirişin merkezinde meydana gelen maksimum deplasman , (mm)

m = Yük – deplasman eğrisinin lineer bölgesinin eğimi , (N/mm) (Wikipedia, The Free Encyclopedia, web sitesi)



Şekil 2.76 Eğme test düzeneği

(http://en.wikipedia.org/wiki/Three_point_flexural_test, 2007)

4 nokta eğme testi; benzer iki yükleme aparatından oluşmaktadır. Malzemenin destek noktaları arasındaki mesafenin yarısı kadar bir uzunlukta numune üzerine simetrik biçimde konumlandırılan iki pim dik konumda etkiyen kuvvetler oluşturmaktadır. Bu iki aparat, hem kendi eksenleri hem de numunenin en uzun eksenini etrafında bağımsız bir şekilde dönebilmelidir (şekil 2.76).

Bu yolla; yükleme ve destek noktaları arasında optimum bir ayarlanma sağlanmış olur (http://www.keramverband.de/brevier_engl/10/5/1/10_5_1_2.html, 2005) “3 nokta eğme testleri daha çok polimer malzemeler için uygundur. Kompozit malzemeler için 4 nokta eğme testleri tercih edilmelidir. 4 nokta testlerin yapılması esnasında deplasmanı hassas bir şekilde ölçen deplasman ölçer kullanımı oldukça önemlidir.

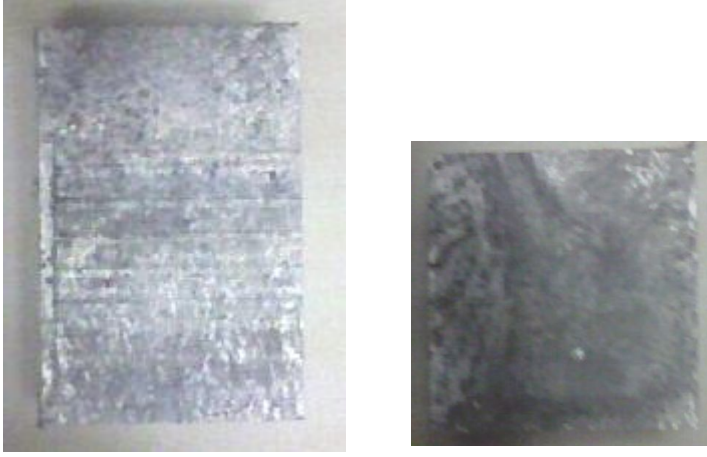
Gevrek malzemelerin ölçümünde, destek ve yükleme noktalarının ayarlanmasının kritik bir durum oluşu nedeniyle 3 nokta eğme testlerinin uygulanması tavsiye edilmektedir. Bu malzeme grubunun testinde sadece eğme dayanımı verisi elde edilebilmektedir

(http://www.instron.com.tr/wa/applications/test_types/impact/test_types.aspx, 2006)

3 MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Alüminyum köpük malzemesi

Deneysel çalışmalar için kullanılan malzeme Fraunhofer Enstitüsünden temin edilmiştir. İlgili alaşım AlSi7'dir. İç yapı oluşturulurken saf alüminyum tozları, %7 saf silisyum ve %0,5 titanyum hidrür ile karıştırılmıştır.



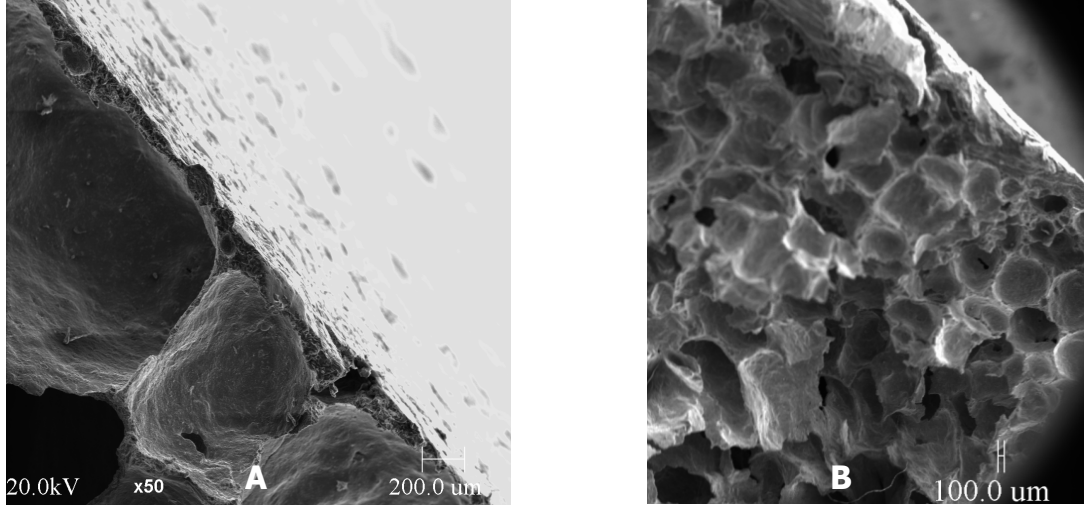
Şekil 3.1. Deney numunesi dış yüzeyi

Parçanın dış yüzeyi farklı bir malzeme ile kaplanmamıştır. “Köpüklenme yüzeyi” diye adlandırılan dış yüzey, numunenin üretimi sırasında kendi malzemesinden oluşur (Fraunhofer Institute 2007).

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.

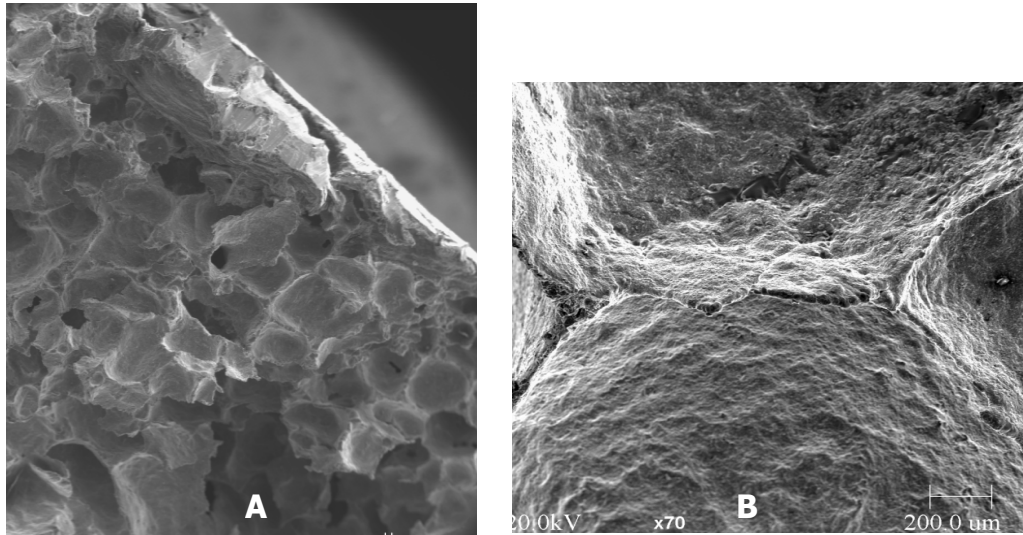
Bir köpük malzemenin içyapısı, gözenek boyutu, gözenek dağılımı ve benzeri parametrelerin tayininde elektron mikroskopisi önemli bir yer tutmaktadır. Deney numunesi olarak kullanılan Al esaslı köpük malzemenin mikroskop için hazırlanması, mikro yapının elde edilmesi için gereken ilk adımdır. İstenilen boyuta ulaşan malzeme çeşitli büyütme değerleri kullanarak incelenir (Oka ve ark. 2006).

Yapılan elektron mikroskobu çalışmasında farklı büyütme oranlarında malzeme içyapısı görüntülenmiştir. Şekil 3.2.a'da görülen 50 kat büyütülmüş elektron mikroskobu görüntüsünde ilgili köpüklenme yüzeyi açık şekilde tespit edilmiştir.

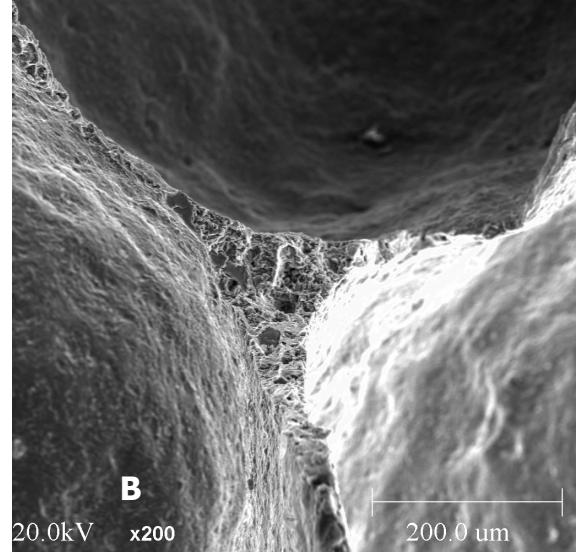
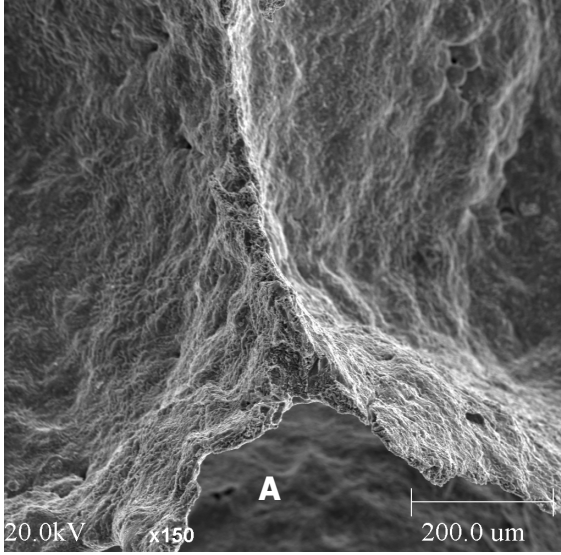


Şekil 3.2. Farklı boyutlardaki Numune yüzeyleri (Oka ve ark. 2006)

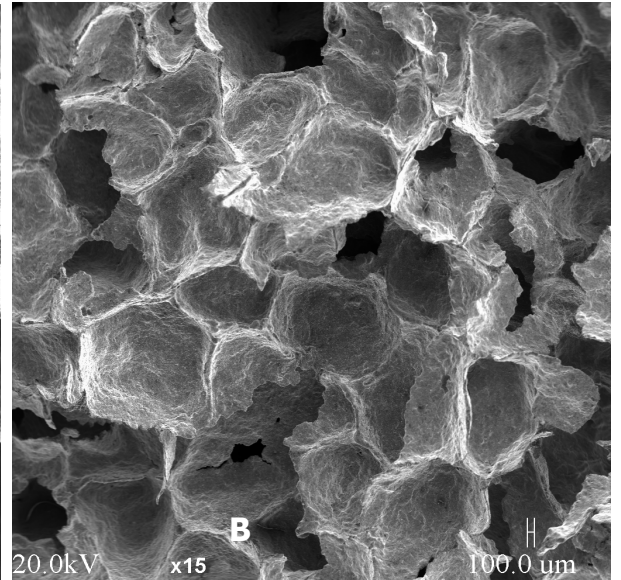
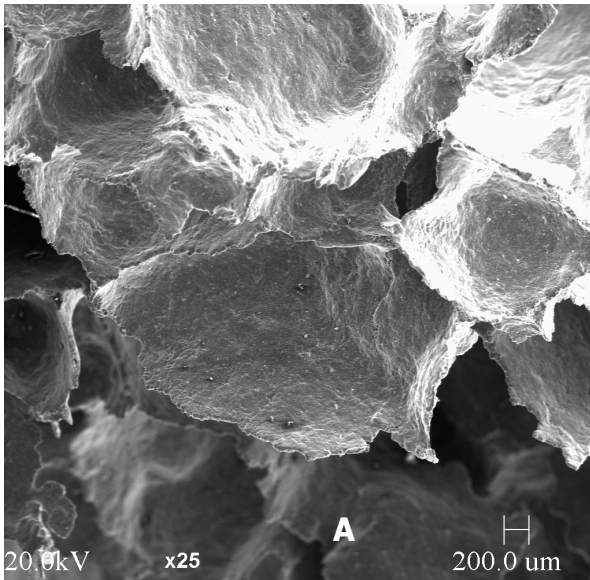
Şekil 3.3.b, şekil 3.3.a, şekil 3.4.a ve şekil 3.4.b'de hücre yüzeyinden daha içeriye gittikçe köpüklenme yüzeyindeki küçük hücre boyutlarının arttığı görülmektedir. Şekil 3.3.b'de ise kapalı hücre alüminyum köpük malzemenin hücre duvarları 70 kat büyütülmüş olarak görülmektedir.



Şekil 3.3. 70 kat büyütme için Hücre duvarları elektron mikroskobu görüntüsü (Oka ve ark. 2006)



Şekil 3.4. 200 kat büyütme için Hücre duvarları elektron mikroskobu görüntüsü (Oka ve ark. 2006)



Şekil 3.5. 15 kat büyütme için Hücre duvarları elektron mikroskobu görüntüsü (Oka ve ark. 2006)

3.2. Sonlu elemanlar Yöntemi

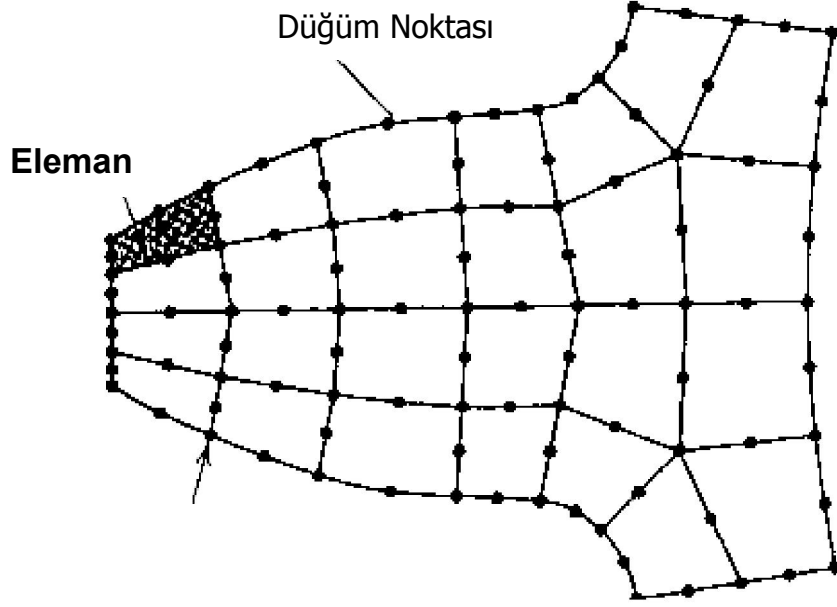
Sonlu elemanlar metodunun temeli mühendisler tarafından atılmış ve geliştirilmiştir. Metot ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda bir büyüklük alanının hesaplanması istenmektedir. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme alanı; ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akısı; akışkan problemlerinde ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur (Günay 1993).

Sonlu elemanlar metodunda tüm yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Şekil 3.6'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 enterpolasyon 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;

$$[K] \cdot [D] = [R] \quad (3.1)$$

Şeklinde dir. 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 3.6. Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanlar

3.2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanarak Modelleme

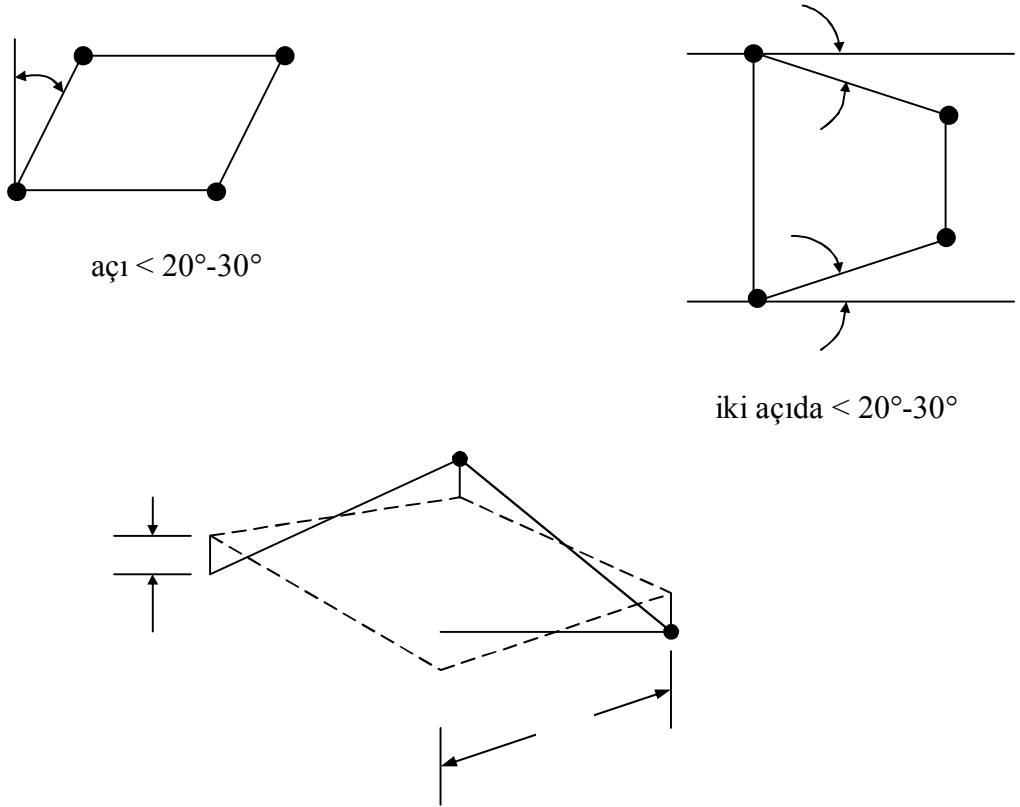
3.2.2.1. Genel Modelleme

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 3.7’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

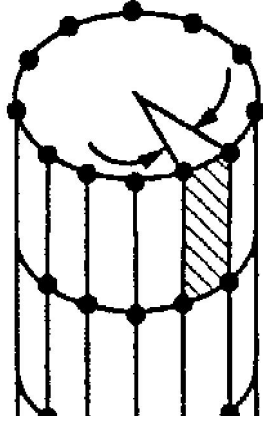
hesaplama alanı içindeki değişimini yeterli doğrulukta verecek kadar sıklıkta bir eleman dağılımına ihtiyaç vardır.

Örneğin Şekil 3.8’de silindirik yüzeylerin modellenmesi için 4 nodlu veya 8 nodlu dörtkenarlı elemanlar kullanılması durumunda tipik bir eleman dağılımı gösterilmiştir. Diğer yandan Şekil 3.9’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).



Genelde h/a oranı %5 den küçük olmalı

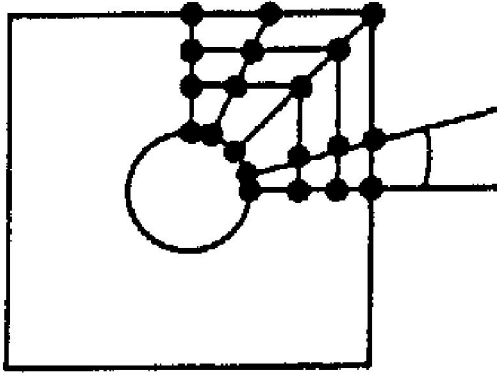
Şekil 3.7. Eleman geometrisinde müsaade edilebilir deformasyonlar



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

$\beta < 30^\circ$ 8 nodlu dörtgen elemanlar

Şekil 3.8. Bir silindirik yüzey etrafındaki tipik eleman dağılımı



$\alpha = 15^\circ$ veya daha küçük

Şekil 3.9. Bir delikli geometride delik etrafındaki tipik eleman dağılımı

3.2.2.2. 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 (Chandrupatla ve Belegundu 2002).

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 (Günay 1993).

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)

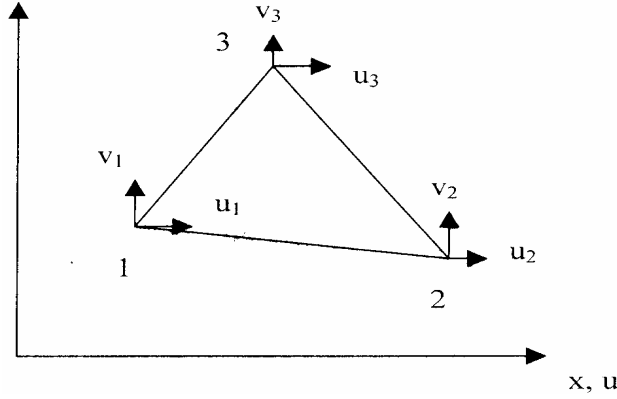
SGU elemanı sabit kalınlığı olan, üç nod noktasını birleştiren ve toplam altı serbestlik derecesi ile tarif edilen bir elemandır (Şekil 3.10). Eleman deplasman alanı aşağıdaki gibi tarif edilmektedir.

$$u = a_1 + a_2x + a_3y \quad (3.2)$$

$$v = a_4 + a_5 + a_7y \quad (3.3)$$

Yukarıdaki deplasman bağıntılarından görüldüğü gibi deplasman alanı eleman içinde ve kenarlar boyunca lineerdir. Eleman sınırları içinde ise gerilme değerleri sabittir (Günay 1993).

Birbirine bağılı elemanlar arasında deplasman uyumluluğu (compatibility), bağılı iki nod noktası arasındaki lineer kenar deformasyon karakteristiği dolayısıyla sağlanmaktadır. Yapının bütün olarak kuvvet dengesi ise nod noktalarında sağlanır (ANSYS Elements Manual 1999).



Şekil 3.10. Sabit Gerilmeli Üçgen Eleman

SGU elemanı sonlu eleman modellerinde küçük gerilme gradyanı 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.

$$u = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 x^2 + a_5 xy + a_6 y^2 \quad (3.4)$$

$$v = a_7 + a_8 x + a_9 y + a_{10} x^2 + a_{11} y + a_{12} y^2 \quad (3.5)$$

SGU elemanın 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 (Günay 1993). .

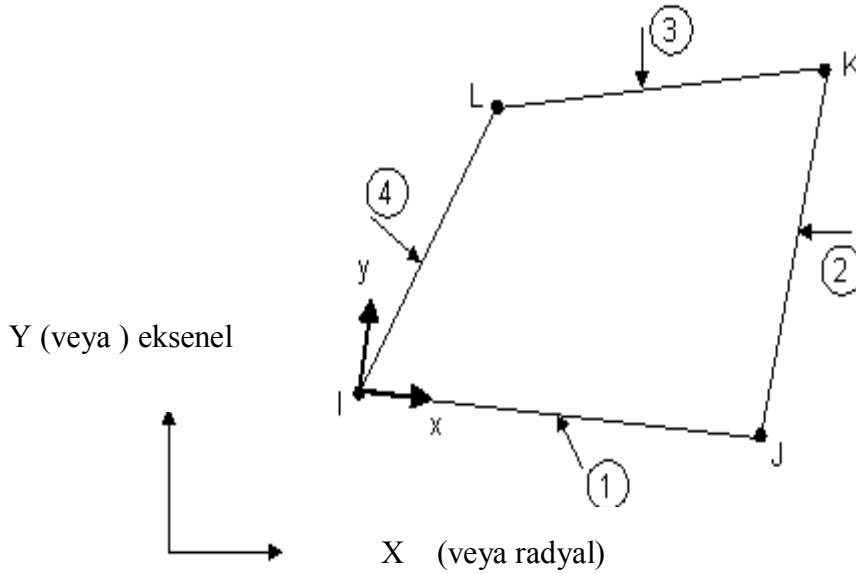
Çifte Lineer Dörtgen Eleman

2 Boyutlu problemler için diğer bir tip eleman, çifte lineer dörtgen elemanlardır. Şekil 3.11'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.

$$u = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 xy \quad (3.6)$$

$$v = a_5 + a_6 x + a_7 y + a_8 xy \quad (3.7)$$

Burada elemanın çifte lineer diye isimlendirilmesi u ve v deplasman bağıntılarının iki lineer polinomun çarpımından oluşmasından dolayıdır (Günay 1993).



Şekil 3.11. 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 (Günay 1993). 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.

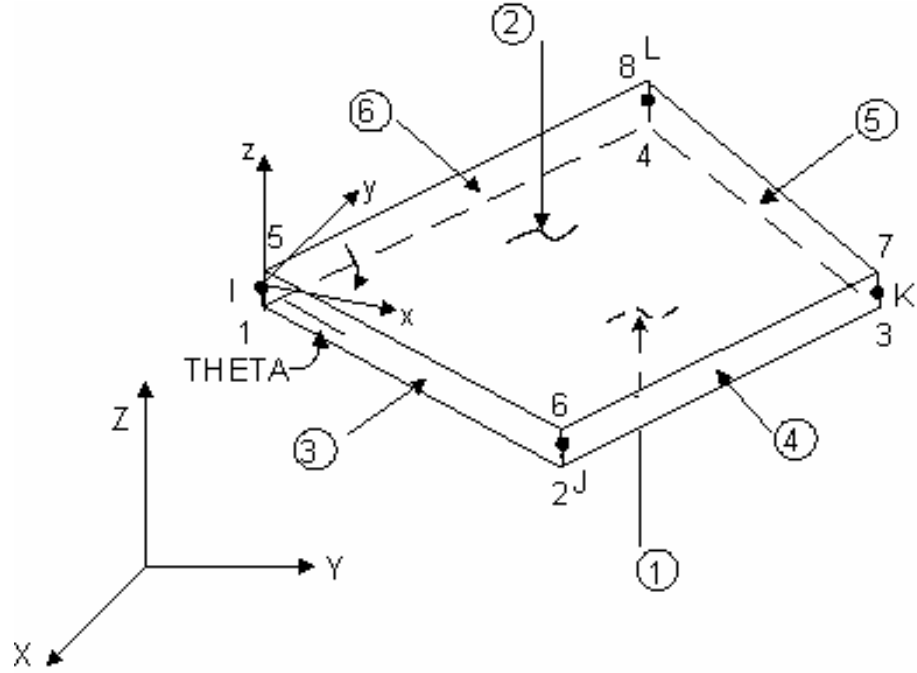
Dört kabuk elemanın en büyük dezavantajı düzgün eğrisel yüzeylerin düzlem elemanlarla veya az miktarda çarpılmış şekle sahip olan elemanla temsil edilmesidir. Kabuk teorisine dayanarak elde edilen eğrisel yüzeyli elemanlar düzlemsel elemanların yaratmış olduğu problemleri ortadan kaldırmaktadır. Fakat 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 membran 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 3.12).

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

3.2.2.3. Yüklemeler 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;

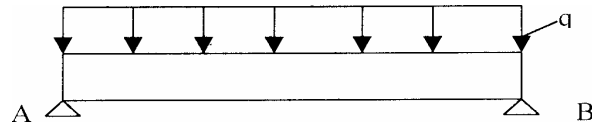
- Kiriş için sonlu bir deplasman ve gerilme değeri oluşur,
- Levha için sonlu deplasman, sonsuz gerilme değeri oluşur,

- 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) genellikle 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 3.13’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(Günay 1993).



Şekil 3.13. İki ucu basit mesnetli kiriş

Sonlu elemanlar modelinde aktif olmayan serbestlik dereceleri çözüm işleminden önce sınırlandırılmalıdır. Bu sınırlandırılması gereken serbestlik derecesi modelin sınırda veya başka bir bölgesinde olabilir. Örneğin düzlem elemanlar nodlarda 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. Rijitlik matrisinde teklikleri 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, Rijitlik matrisinde teklikler oluşacak, bu da denklemlerin çözümünü zorlaştıracak veya imkânsız hale getirecektir (Günay 1993). Doğru bir modelleme için düzlem elemanların her bir nodu için üç serbestlik derecesi atanır. Sınır koşulları için ise yine sınırda yer alan nodlar için bu serbestlik derecelerinden bazılarının kısıtlanması gerekebilir.

Bazı durumlarda gerçek problem için sınır koşulları net olarak anlaşılır olmayabilir. Böyle durumlar için 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 Stuctural Analysis Guide 1999)

3.2.2.4 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 (Günay 1993). Doğru

modelleme yapabilmek için ayrıklaştırma esnasında bir takım hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu hususlar aşağıda sıralanmaya çalışılmıştır.

- i. Sonlu elemanlar grid ağının mümkün olduğu kadar uniform olmasına dikkat edilmelidir. Fakat yüklemeye ve yapının davranışında hızlı değişimlerin görüldüğü bölgelerde daha sık bir ağ yapısı için üniformluğun bozulmasına izin verilebilir.
- ii. Dörtkenarlı elemanların üçgen elemana göre birçok avantajı olması nedeniyle, dörtkenarlı 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. Zamana bağlı dinamik analizlerde eleman boyu, zaman adımı, entegrasyon metodu ve etki 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 aşılmayıp aşılmadığı 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).

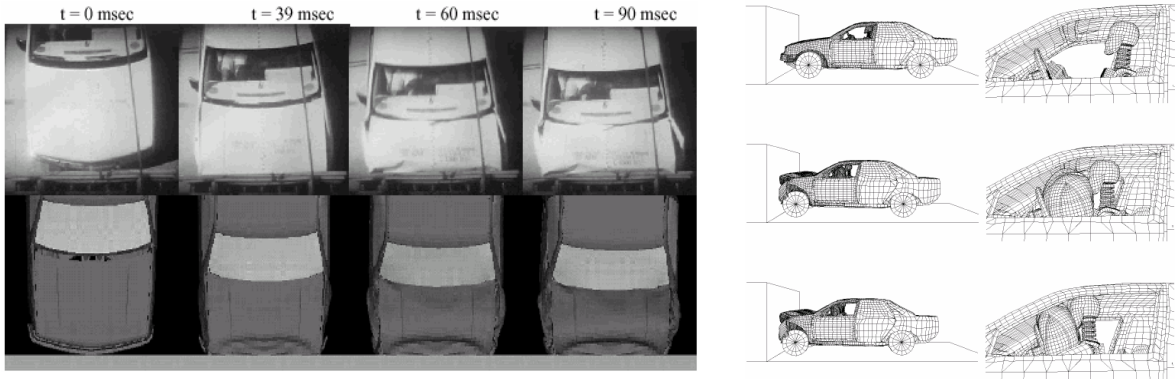
3.3. Eksplisit Yöntemi Kullanarak Modelleme

3.3.1 Eksplisit Dinamik Analiz Kullanım Alanları

Eksplisit dinamik analiz, gerçek yapıların yavaş (quasi/sanki-statik) veya hızlı yüklemeler altında davranışının tahmininde son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu metot sayesinde prototip geliştirme süreci bilgisayar ortamına taşınmakta, hızlanmakta ve maliyeti ise düşmektedir (ANSYS LS-DYNA Training Manual 2003).

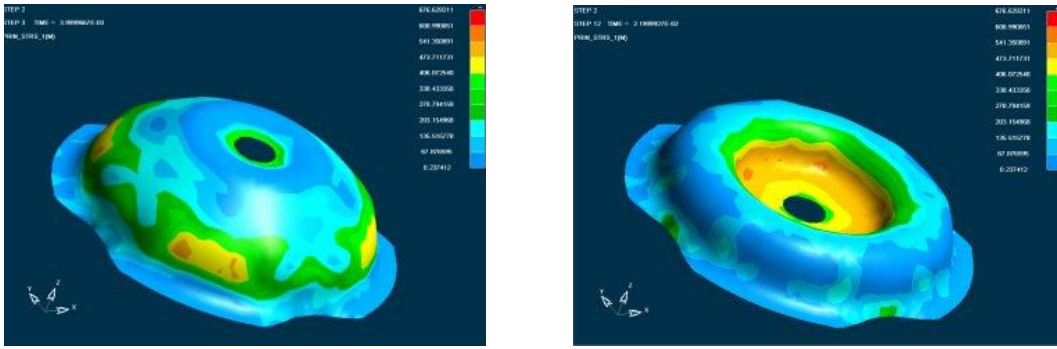
Günümüzde Eksplisit çözüm tekniğini farklı çeşitli paket programlar mevcuttur. 1985’li yıllarda başlayan Eksplisit dinamik mühendislik uygulamaları, 90’lı yıllardan sonra hız kazanmıştır. Bugün çok karmaşık mühendislik problemlerinin çözümü Eksplisit teknikle yapılabilmektedir. Şekil 3.14.a, şekil 3.14σ.b ve şekil 3.15’de farklı uygulama alanlarına göre benzetim örnekleri görülmektedir.

a) Çarpma ve darbe analizlerinde (Araba çarpma ve çarpışma simülasyonları)



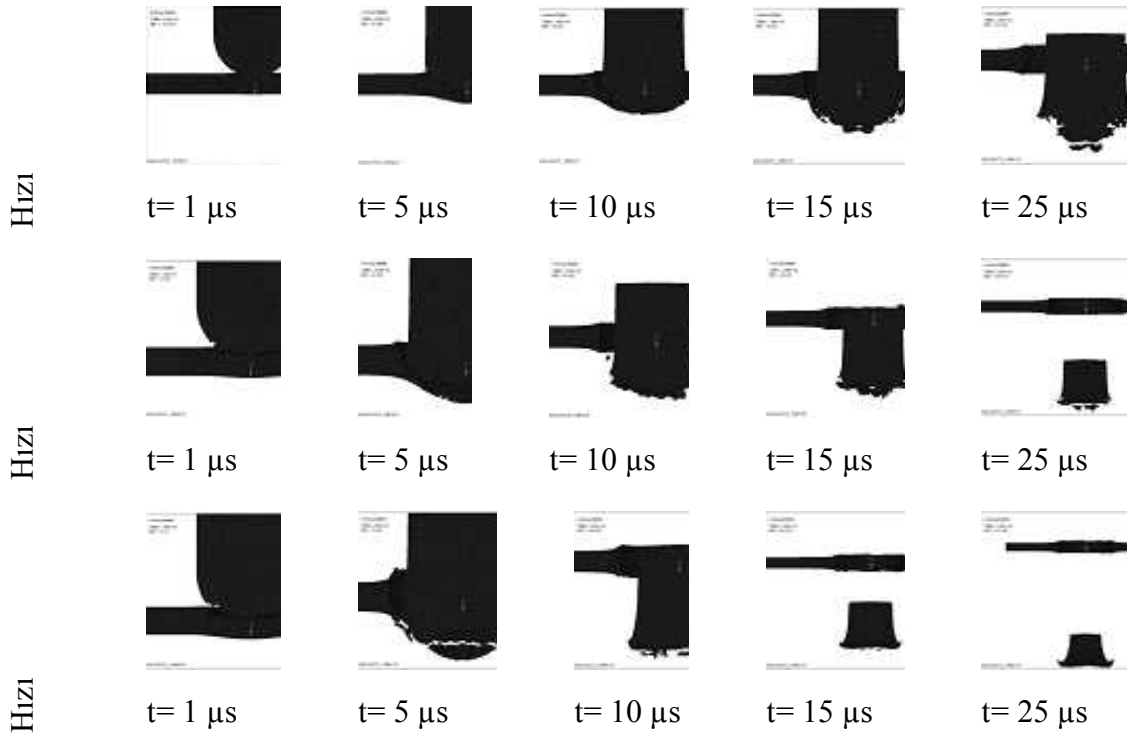
Şekil 3.14.a Eksplisit dinamik analiz ile araba çarpma/çarpışma benzetimleri (Anonim)

b) Metal şekillendirme uygulamalarında:



Şekil 3.14.b Eksplicit dinamik analiz ile levha ve kütle şekillendirme (Anonim)

c) Savunma sanayi uygulamaları (balistik benzetimler)



Şekil 3.15. Parçanın mermi tarafından delinmesinin benzetimi (Anonim)

3.3.2 Eksplisit Dinamik Teorisi

Şekil 3.16.a'da gösterilen esnek cisimlerin hareketi rijit cisimlerden farklı olarak cisim içinde noktadan noktaya değişebilmektedir. Bu tür cisimlerin her bir noktasındaki hareketi/davranışı diferansiyel denklemlerle tanımlanır. Cisim içindeki herhangi bir nokta, Şekil 3.16.b'deki gibi sonsuz küçüklükte bir küp olarak düşünülüp bu küpün yükleme altında dengesi kullanılarak noktanın diferansiyel hareket denklemleri çıkarılabilir (ANSYS LS-DYNA Training Manual 2003). Aşağıda elde edilen hareket denklemleri ve sınır şartları tensörel notasyonda gösterilmektedir:

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho \ddot{x}_i = 0 \quad : \text{ cismin } V \text{ hacmi üzerinde} \quad (3.8)$$

$$\sigma_{ij} n_j = T_i \quad : \text{ zorlama yüzeyi } S_T \text{ üzerinde} \quad (3.9)$$

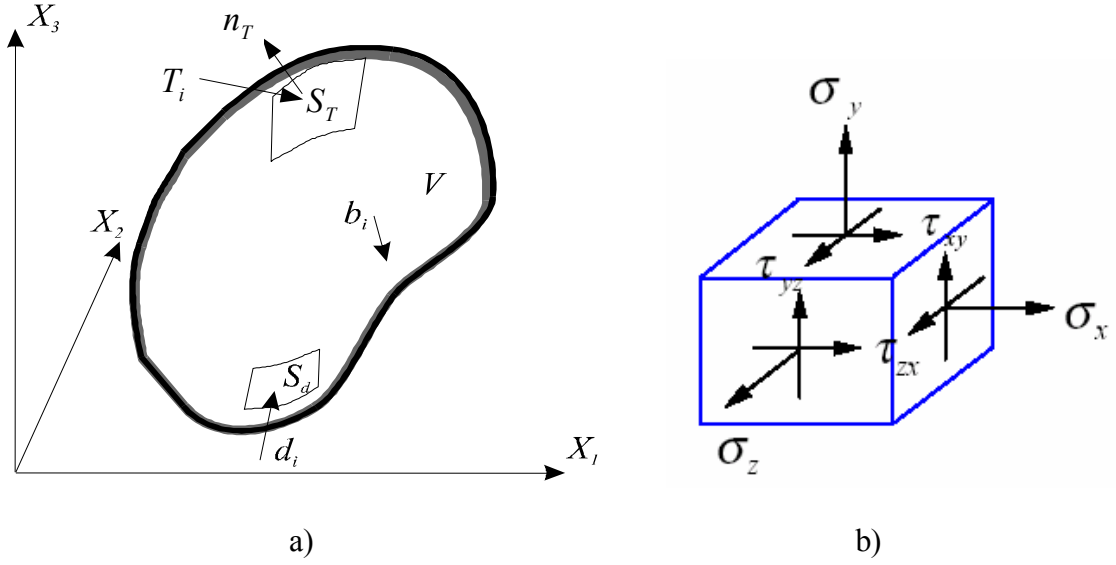
$$x_i = d_i \quad : \text{ yer değiştirme yüzeyi } S_d \text{ üzerinde} \quad (3.10)$$

σ_{ij} : Cauchy gerilme tensörünü,

ρ : malzemenin o anki yoğunluğunu

n_j S_T : zorlama yüzeyine normal doğrultuda olan birim dış vektörü ifade eder.

Denklem 3.8'e hareketin güçlü (strong) formu da denir. Bu denklem sınır şartlarıyla birlikte cisim üzerindeki ve yüzeylerdeki her noktada sağlanmalıdır.



Şekil 3.16.a Lagrange Uzayında Bulunan 3 Boyutlu Cisim, **b** Cisim içindeki bir noktada gerilme durumu.

3.3.2.1 Virtüel İş Prensibi

Diferansiyel hareket denklemi eğer çözülebilirse cisim içindeki her bir noktanın hareketini tüm zamanlar için verir. Yalnız karmaşık geometriye sahip ve/veya yüklemeye maruz cisimlerde bu denklemi çözmek çok zordur veya imkânsızdır. Bu gibi durumlar mühendisleri diferansiyel denklemin çözümüne özdeş, yeni ve daha kolay çözümlere yöneltmiştir. Bunlardan biri de virtüel iş ilkesidir (Chandrupatla ve Belegundu 2002).

Virtüel iş ilkesinde cismin davranışı diferansiyel hareket denklemi yerine, cismin üzerine etkiyen iç ve dış kuvvetlerin yaptığı işlerin dengesinden elde edilir. Bu tür çözüme hareketin zayıf (weak) formu da denir (Chandrupatla ve Belegundu 2002). Zayıf formda, şartlar cisim üzerindeki her noktada sağlanmak zorunda değildir, bunun yerine şartlar cismin toplamı üzerinde ve ortalama olarak sağlanır.

Hareket denkleminin zayıf formunu elde ederken, S_d bölgesi üzerinde yer değiştirme sınır şartını sağlayan herhangi bir virtüel (hayali) yer değiştirme δx_i düşünülür. 3.8 eşitliğini virtüel yer değiştirme ile çarpar ve cismin hacmi üzerinde entegre edersek:

$$\int_V (\sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho \ddot{x}_i) \delta x_i dV = 0 \quad (3.11)$$

elde edilir.

3.11 eşitliğinin sıfıra eşit olması için parantez içinde kalan ifadenin, geçerli herhangi bir virtüel yer değiştirme için, sıfıra eşit olması gerekir. Buradan da 3.11 eşitliğinin 3.8 eşitliğine eşdeğer olduğu görülmüş olur. Kısmi türev kullanılarak

$$(\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} = \sigma_{ij,j} \delta x_i + \sigma_{ij} \delta x_{i,j} \quad (3.12)$$

Elde edilir. 3.11 eşitliği, 3.12 eşitliğindeki ilk terimde yerine konarak:

$$\int_V ((\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} - \sigma_{ij} \delta x_{i,j} + \rho b_i \delta x_i - \rho \ddot{x}_i \delta x_i) dV = 0 \quad (3.13)$$

Elde edilir ve Gauss teoremindeki ilk bileşen şöyle ifade edilebilir:

$$\int_V (\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} dV = \int_{S_T} (\sigma_{ij} \delta x_i) n_j dS \quad (3.14)$$

Yükleme yüzeyinin sınırları kullanılarak 3.13 ve 3.14 şöyle yazılabilir:

$$\int_V (\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} dV = \int_{S_T} T_i \delta x_i dS \quad (3.15)$$

Gerilme tensörü simetrik olduğundan, 3.13 eşitliğindeki ikinci terim şöyle yazılır:

$$\begin{aligned}
\int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV &= \int_V \frac{1}{2} (\sigma_{ij} \delta x_{i,j} + \sigma_{ji} \delta x_{j,i}) dV \\
&= \int_V \sigma_{ij} \frac{1}{2} (\delta x_{i,j} + \delta x_{j,i}) dV \\
&= \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV
\end{aligned} \tag{3.16}$$

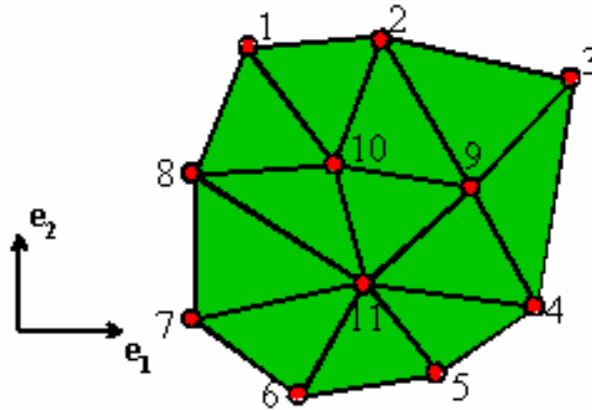
burada $\delta \varepsilon_{ij}$, virtüel yer değişimi δx_i 'yi veren virtüel gerilme tensörüdür. 3.16 eşitliğini ve 3.13 ve 3.16'da yerine koyarak

$$-\int_V \rho \ddot{x}_i \delta x_i dV - \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_V \rho b_i \delta x_i dV + \int_{S_T} T_i \delta x_i dS = 0 \tag{3.17}$$

Elde edilir. 3.17 eşitliği Şekil 3.11'de tanımlanan genel bir üç boyutlu problem için virtüel iş prensibi ifadesidir (Chandrupatla ve Belegundu 2002).

3.3.2.2 Geometrinin Bölünmesi (Diskritizasyonu)

Sonlu elemanlar denklemlerini çıkarmak için bir sonraki adım geometrik uzayın bölünmesidir. Cismin karmaşık Şekli, aşağıdaki Şekil 3.17'de gösterildiği gibi eleman adı verilen daha basit Őekillere bölünür. Elemanlar birbirine köşelerindeki düğüm noktalarından bağlıdırlar. Düğüm noktaları ve elemanlar sonlu eleman modelini (mesh) oluşturur (ANSYS LS-DYNA Training Manual 2003).



Şekil 3.17. Geometrik uzayın elemanlara bölünmesi

Yer değiştirme alanının sonlu eleman ağı boyunca sürekliliğini sağlamak amacıyla enterpolasyon fonksiyonları (şekil fonksiyonları olarak ta bilinirler) kullanılırlar (ANSYS LS-DYNA Training Manual 2003). şekil fonksiyonları eleman içerisindeki noktaların yer değiştirmesi ile düğüm noktalarının yer değiştirmesi arasında ilişki kurarlar:

$$\delta x_i = \sum_{\alpha=1}^n N_{\alpha} \delta x_{\alpha i} \quad (3.18)$$

3.18 eşitliğinde δx_i 'ler eleman içindeki bir noktanın yer değiştirmelerini, n elemanın düğüm noktası sayısını, N_{α} α düğüm noktasındaki şekil fonksiyonunu ve $\delta x_{\alpha i}$ α düğüm noktasındaki yer değiştirmeleri göstermektedir.

Benzer ifadeler aşağıdaki gibi eleman içindeki bir noktanın koordinatları, hızları ve ivmeleri için de yazılabilir:

$$\begin{aligned} x_i &= \sum_{\alpha=1}^n N_{\alpha} x_{\alpha i} \\ \dot{x}_i &= \sum_{\alpha=1}^n N_{\alpha} \dot{x}_{\alpha i} \\ \ddot{x}_i &= \sum_{\alpha=1}^n N_{\alpha} \ddot{x}_{\alpha i} \end{aligned} \quad (3.19)$$

3.19 eşitliğinde $x_{\alpha i}$, $\dot{x}_{\alpha i}$ ve $\ddot{x}_{\alpha i}$, α düğüm noktasının sırasıyla yer değiştirmelerini, hızlarını ve ivmelerini göstermektedir. şekil fonksiyonları ile bir fonksiyonun herhangi bir noktasındaki değeri, o fonksiyonun düğüm noktasındaki değerleri kullanılarak tahmin edilir. Tahminin doğruluğu şekil fonksiyonuna ve fonksiyonun derecesine bağlıdır. Diğer bölümlerde şekil fonksiyonları çeşitli elemanlar için ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Sonlu eleman bağıntıları 3.17 eşitliğinde verilen virtüel iş denklemini uzayda bölerek (diskritize ederek) bulunur. Cismin virtüel iş denklemi, sistemdeki her elemanın potansiyel enerjilerin toplanmasıyla elde edilir. 3.16 eşitliği dikkate alınarak 3.17 eşitliği şöyle yazılabilir:

$$\sum_{m=1}^M \left\{ \int_{V_m} \rho \ddot{x}_i \delta x_i dV_m + \int_{V_m} \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV_m - \int_{V_m} \rho b_i \delta x_i dV_m - \int_{S_T} T_i \delta x_i dS_m \right\} = 0 \quad (3.20)$$

Burada, M sistemdeki toplam eleman sayısıdır, V_m elemanın hacmidir. Düğüm noktalarındaki virtüel yer değiştirmeler ($\delta x_{\alpha i}$) sabit değerlerdir ve integral dışına alınabilirler.

Burada 3.20 eşitliği şöyle de yazılabilir:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M \left\{ \int_{V_m} \rho N_\alpha N_\beta dV_m \right\} \ddot{x}_{\beta i} &= \sum_{m=1}^M \int_{V_m} N_\alpha \rho b_i dV_m \\ &+ \sum_{m=1}^M \int_{S_T} N_\alpha T_i dS_m - \sum_{m=1}^M \int_{V_m} N_{\alpha,j} \sigma_{ij} dV_m \end{aligned} \quad (3.21)$$

3.21 eşitliği matris formunda sadeleştirilirse:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (3.22)$$

burada, $[\mathbf{M}]$ kütle matrisi, $\{\ddot{\mathbf{x}}\}$ ivme vektörü ve $\{\mathbf{F}\}$ tüm iç ve dış kuvvetlerin vektörel toplamıdır. $[\mathbf{M}]$ kütle matrisi şöyle ifade edilebilir (ANSYS LS-DYNA Training Manual 2003):

$$[\mathbf{M}] = \sum_{m=1}^M \int_{V_m} \rho N^t N dV_m \quad (3.23)$$

3.3.2.3 Zaman Diskritizasyonu

3.17 eşitliği hareketin sonlu eleman denklemidir ve zamana göre çözülmesi gerekmektedir. Dinamik doğrusal olmayan sonlu eleman problemlerinin çözümünde direk entegrasyon metotları kullanılabilir (ANSYS LS-DYNA Training Manual 2003). Direk entegrasyon metotlarında sonlu eleman denklemlerinin tüm zaman aralığı için çözümü yerine, bu aralık içinde bazı zaman noktaları için çözümleri aranır. Bu zaman noktaları için 3.17 eşitliği sonlu eleman denklemi şöyle yazılabilir:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}\}_n = \{\mathbf{F}\}_n \quad (3.24)$$

burada, $\{\ddot{\mathbf{x}}\}_n$, t_n anındaki bir noktanın ivme vektörüdür ve $\{\mathbf{F}\}_n$, t_n anındaki tüm iç ve dış kuvvet vektörlerinin toplamıdır. Zaman boyutu içinde iki ardışık zaman noktası (t_n ve t_{n+1}) arasındaki aralık zaman adımı, Δt_n , olarak adlandırılır ($\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$). Zaman adımının büyüklüğünün çözümün doğruluğu üzerinde büyük bir etkisi vardır.

Sonlu eleman denkleminin zaman içindeki diskritizasyonu için merkezi farklar açık (Eksplisit) metodu kullanır. Bu formülasyonda hız vektörü zaman adımlarının yarısında hesaplanır. Başka bir ifade ile yer değiştirme ve ivme vektörleri $t_1, \dots, t_n, t_{n+1}, \dots, t_f$ (burada t_f problemin bitiş zamanıdır) zamanlarında hesaplanırken, hız vektörü $t_{1/2}, \dots, t_{n-1/2}, t_{n+1/2}, \dots, t_{f-1/2}$ zamanlarında hesaplanır. Metot t_0 zamanındaki yer değiştirmelerin, t_0 ve $t_{-1/2}$ anındaki (t_0 anından yarım zaman adımı önceki) hızların başlangıç değerlerinin tahmin edilmesi ile başlar. Çözüm aşağıdaki merkezi farklar bağıntıları kullanılarak adım adım elde edilir.

$$\dot{\mathbf{x}}_{n+1/2} = \dot{\mathbf{x}}_{n-1/2} + \ddot{\mathbf{x}}_n \Delta t_n \quad (3.25)$$

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \dot{\mathbf{x}}_{n+1/2} \Delta t_{n+1/2} \quad (3.26)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_{n+1} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}_{n+1} \quad (3.27)$$

$$\Delta t_{n+1/2} = \frac{1}{2} (\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \quad (3.28)$$

Çözüm adımları:

Bir önceki çevrim olan $t_{n-1/2}$ anındaki hız vektöründen t_n anındaki yer değiştirme ve ivme vektörleri hesaplanır. Bir önceki çevrimdeki bilgiden şu anki (t_{n+1}) çevrimdeki çözümü bulmak için faydalanılır.

Daha sonra model içerisindeki her bir elemanın gerilme ve şekil değiştirme değerleri hesaplanıp, gerilmelerden türetilen iç kuvvetler bulunur. Bundan sonra, düğüm noktalarının serbestlik derecelerindeki iç ve dış kuvvetler kuvvet vektörünü elde edebilmek için toplanır (Chandrupatla ve Belegundu 2002).

3.3.4. Eksplisit Dinamik Analizin Aşamaları

Eksplisit dinamik analiz teorisi ile bir problemin çözülebilmesi için aşağıdaki aşamaların yapılması gerekir (ANSYS LS-DYNA Training Manual 2003):

1-CAD Modelinin hazırlanması

2-FEM Modelinin oluşturulması

- a) Eleman seçimi
- b) Malzeme modelinin seçimi
- c) Mesh oluşturulması

3-Yükleme ve Sınır şartlarının tanımlanması

- a) Dış kuvvetlerin uygulanması

b) Başlangıç hızının tanımlanması

c) Kontakların tanımlanması

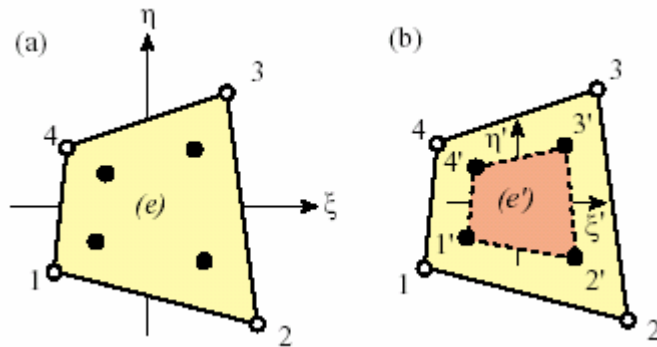
4- Eksplisit Çözümün Yapılması

5- Sonuçların değerlendirilmesi

3.3.5. Eksplisit Dinamik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Eksplisit dinamik analizden sonra elde edilen sonuçların yorumlanması gerekir. Yorum için uygulama alanına bağlı olarak ivme, hız, yer değiştirme, şekil değişimi, gerilme, kuvvet, enerji vs. gibi sonuçlar, modelin dar bir bölgesi veya tümü üzerinde kullanılabilir (Chandrupatla ve Belegundu 2002).

Sonuçların değerlendirilmesinde en çok kullanılan kriterlerden biri gerilme değerleridir. Analizden eleman tipine ve entegrasyon nokta sayısına bağlı olarak bir çok gerilme değerleri elde edilir. Aşağıda düzlem bir eleman içinde gerilme hesabında kullanılan 4 Gauss noktası gösterilmektedir (Şekil 3.18). Gauss noktasındaki gerilme değerleri enterpolasyon veya extrapolasyonla eleman içinde herhangi bir noktada gerilme değerlerinin elde edilmesinde kullanılabilir.



Şekil 3.18. Düzlem bir elemanda 2X2 Gauss entegrasyon noktalarında gerilme hesabı

Bir eleman içinde gerilme değerlerinin en çok merak edildiği yerler, çoğunlukla eleman merkezi ve nodlardaki gerilme değerleridir. Eleman merkezindeki gerilme hesabı basit olmasına karşın nodlardaki gerilme hesabı biraz daha detaylıdır. Birden çok eleman tarafından paylaşılan nodda gerilme hesabı baz alınan elemana göre farklılık gösterecektir. Bu durumda yaygın kullanılan yaklaşım, paylaşılan nodda ortalama gerilme değerini kullanmaktır.

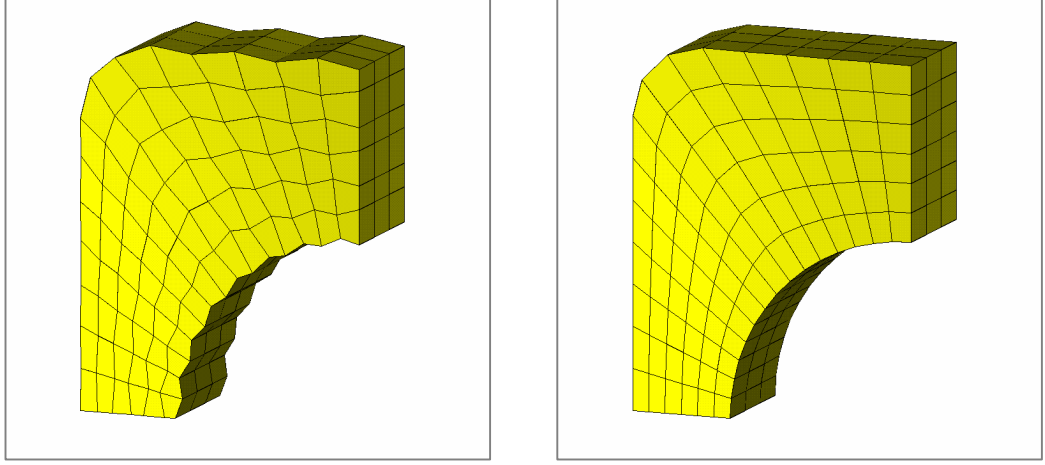
Her bir entegrasyon noktasında elde edilen gerilmenin birden çok bileşeni olabilir. Bu durumda mevcut gerilme bileşenlerinden eşdeğer bir gerilme değeri elde edilerek sonuçlar yorumlanabilir. Eşdeğer gerilmeyi hesaplamada en çok kullanılan metotlardan biri Von Mises gerilmesidir. Von Mises metodu eşdeğer gerilmeyi, çarpılma enerjisini esas alarak ve asal gerilmeleri kullanarak hesaplar ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). Burada asal gerilmeler normal ve kayma/kesme gerilmelerinin bileşkeleridir (Shigley ve Mischke 2001). Von Mises gerilmesi ifadesi:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (3.29)$$

Önemli bir nokta; Von Mises eşdeğer gerilmenin hep pozitif olmasıdır. Von Mises gerilmelerde çekme ve basma gerilme bölgeleri ayırt edilemez.

Analiz sonuçlarının doğruluğu için iç enerjiler, hourglass (Kum saati modları) enerjiler, kinetik enerjiler kullanılabilir. Yapının toptan cevabından çok daha yüksek bir frekansta salındığı sıfır enerjili şekil değiştirme modudur (ANSYS LS-DYNA Training Manual 2003).

Hourglassing modları, fiziksel olarak mümkün olmayan kararlı matematiksel durumlara yol açar. Tipik olarak hiç Rijitlik yoktur ve mesh'e girintili çıkıntılı şekil değişimi görüntüsü verir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Hourglassing ile eleman şeklindeki bozulmalar

Örneğin analiz sonucunda hourglass enerjisinin, iç enerjinin %8-10'undan büyük bulunması, modelde yetersizliklere ve hatalara işaret eder (ANSYS LS-DYNA Training Manual 2003). Bu durumda hourglassing'e uğrayan bölgeler ya full entegrasyon elemanlarla yeniden mesh'lenir veya mesh yeniden daha küçük elemanlarla oluşturulur.

3.3.6. İmplicit ve Eksplisit yaklaşım arasındaki temel farklar ve uygulama alanları

Teorik olarak sonlu elemanlar teorisinde analitik ifadeler ile kullanılarak yapılan hesaplamalarda karmaşık geometriler söz konusu olduğunda ve doğrusal / doğrusal olmayan uygulamalarda sonlu elemanlar yönteminin ve bir çözücünün kullanılması kaçınılmazdır.

Penetrasyon gibi zamana bağlı, malzeme, geometri ve sınır koşulları açısından içeren doğrusal olmayan davranışlar gösteren modellerin analizinde temel olarak 2 çözüm yöntemi vardır. İmplicit ve Eksplisit olan bu yöntemler arasındaki ana farklar aşağıda tablo halinde verilmiştir (Çizelge 3.1).

Eksplisit yöntemdeki zaman adımı ve zaman artırımı diğer yönteme kıyasla oldukça küçük seçilebilmektedir. Bu sayede genellikle zamana bağlı olarak modellenen sistemlerde daha kısa sürede daha çok zaman adım çözümü içeren sonuç dizinleri elde edilebilmektedir.

Çizelge 3.1 İmplicit ve Eksplisit yöntemlerin karşılaştırılması

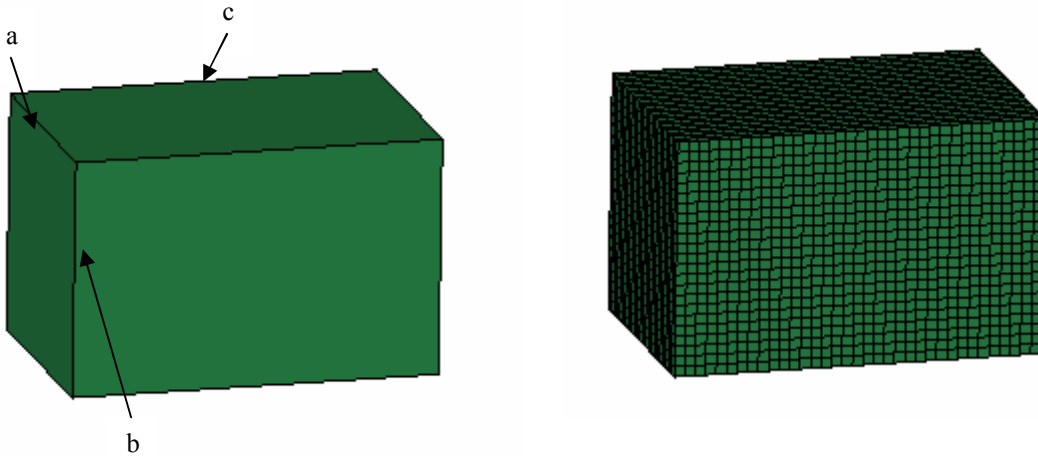
İMPLİSİT YAKLAŞIM	EKSPLİSİT YAKLAŞIM
Genelde statik ($\sum F=0$) ve/veya metal şekillendirme gibi yarı statik ($\sum F \approx 0$) analizlerde kullanılır	Genelde dinamik problemlerde ($\sum F=M.a$) ve/veya yarı statik ($\sum F \approx 0$) analizlerde kullanılır
Analizlerde genel olarak sönüm ve kütle matrisleri kullanılmaz ([C] ve [M])	[C] ve [M] matrisleri analizlerde kullanılır.
İntegrasyon işleminde zaman adımında sınırlama yoktur, fakat doğrusal olmayan analizlerde yakınsama probleminden dolayı adım aralığı yeterince küçük seçilmelidir.	Zaman adımı, sadece modelin en yüksek doğal frekansına bağlıdır.
Zaman adım sayısı genelde 1000'ler mertebesindedir	Zaman adım sayısı genelde 100000'ler mertebesindedir
Deplasman değerleri, bir sonraki zaman aralığı göz önünde bulundurularak iterasyon yöntemi ile hesaplanır	Deplasman değerleri bir önceki zaman adımına ait denge denklemlerinden elde edilir
Rijitlik matrisinin tersi her zaman aralığında hesaplanmalıdır. Bu, çözüm süresini arttıran bir etkidir	Rijitlik matrisinin tersini almaya gerek yoktur, bu nedenle her bir zaman adımına düşen zaman süresi nispeten kısadır.
Kuvvet, deplasman yakınsama kriteri vardır	Yakınsama kriteri yoktur
Doğrusal olmayan modellemeler zaman alıcı ve zordur	Modelleme daha kolaydır

Çizelge 3.1'de özetlendiği üzere toplam bileşke kuvvetin sıfır veya sıfıra yakın olmadığı durumlarda ve sisteme etkileyen kuvvetin çok dar bir zaman aralığında etkideği durumlarda eksplisit çözücü ve yöntemi kullanılmalıdır. Ayrıca bazı ileri düzey malzeme modellerinin ilgili çözücülerde kullanılması ve özellikler bunlar için geliştirilmesi sebebi ile bu yöntemi kullanmak köpük malzeme analizleri yapmak için kaçınılmaz bir sonuç teşkil etmektedir (ANSYS Ls-DYNA Training Manual. 2003).

3.6. Numerik yöntemlerle çarpma testi benzetimi

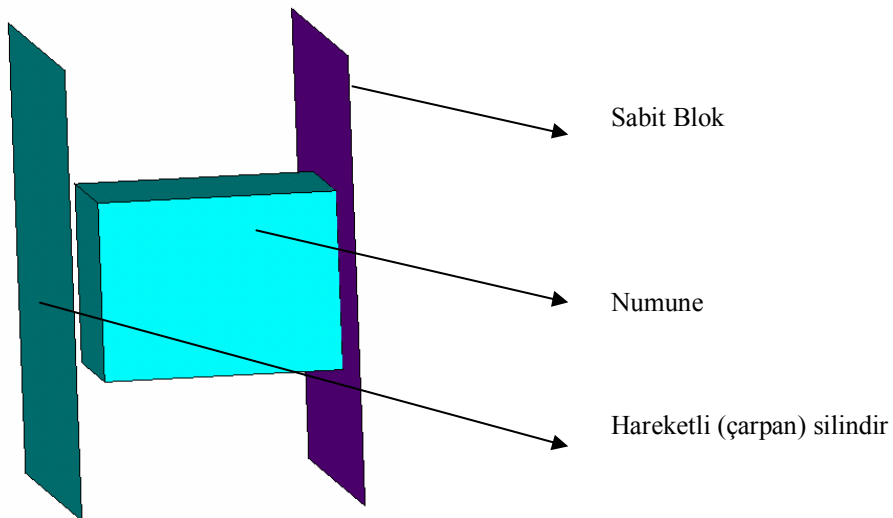
3.6.1. Katı model ve Sonlu Elemanlar Modeli

Deney numunemizin a:45mm X b:45mm X c:70mm boyutlarında olduğu için analiz modelinde de aynı boyutlarda modellenen alüminyum köpük numunemiz, yine aynı şekilde test çalışmasındaki gibi iki blok arasında tek eksenli olarak çarptırılmıştır.



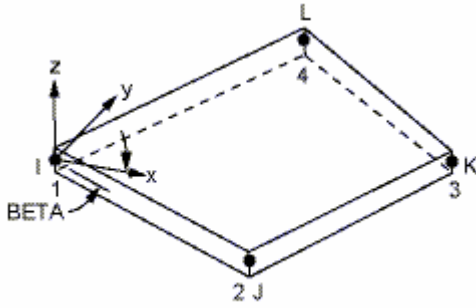
Şekil 3.28. Numunenin katı modeli ve sonlu elemanlar modeli

Şekil 3.28’de deney numunesi boyutlarındaki katı model ve sonlu elemanlar modeli görülmektedir. Şekil 3.29’da ise hareketli silindir, sabit blok ve ve numunenin modeli görülmektedir.



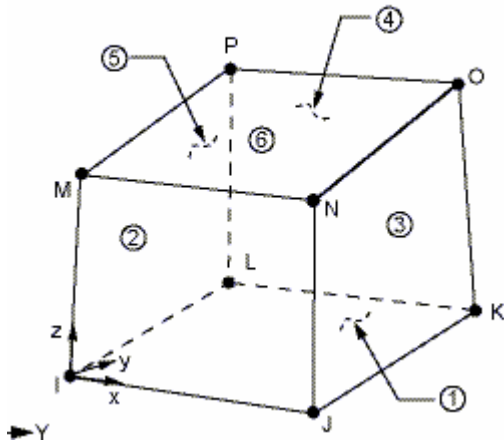
Şekil 3.29. Test kurulumunda numune, sabit blok ve hareketli silindir

3.6.2. Analizlerde Kullanılan eleman tipleri ve malzeme modelleri



Şekil 3.30. Analizlerde kullanılan kabuk eleman / Shell 163

Şekil 3.30'da görülen eleman tipi gelen olarak eksplisit üç boyutlu ince yapısal kabuk elemanı olarak kullanılır. Bu eleman her köşesinde olmak kaydıyla toplam olarak 4 adet düğüm noktasına sahip olup, x, y ve z yönlerinde dönme, hız ve ivmelenme serbestlik dereceleri vardır (ANSYS Elements Manual 2007).



Şekil 3.31. Analizlerde kullanılan katı eleman / Solid164

Şekil 3.31'de görülen eleman tipi gelen olarak eksplisit üç boyutlu katı elemanı olarak kullanılır. Bu eleman her köşesinde olmak kaydıyla toplam olarak 8 adet düğüm noktasına sahip olup, x, y ve z yönlerinde düzlemsel hareket, hız ve ivmelenme serbestlik dereceleri vardır (ANSYS Elements Manual 2007).

Eksplisit analizlerin temelinde elemanın davranışı genel olarak malzeme üzerinden atanır. Sonuçta sabit blok ve hareketli silindir üzerindeki muhtemel deformasyonlar köpük üzerindeki ile karşılaştırıldığında kesinlikle ihmal edilebilecek düzeyde olduğu için bu modeller jijit olarak malzeme modelinde tanımlanmıştır (ANSYS Elements Manual 2007).

Çizelge 3.8. Rijit kabulü yapılan çelik malzeme özellikleri

Yoğunluk ^I	7.85 E -6 kg/mm ³
Elastitite modülü ^{II}	210,000 MPa
Poisson oranı ^{III}	0,29

KAYNAK: I: Demirci 2004, II: Babalık 1997, III: Bakioğlu ve arkadaşları 2001

Çizelge 3.8’de çelik malzeme için kullanılan mekanik malzeme özellikleri görülmektedir. Bu özellikler, kütle matrisinin oluşturulması, hareket denkleminde yerine konulması ve analizin çözülmesi için yeterli bilgileri içermektedir.

Deforme olabilir köpük modeli olarak ezilebilir köpük malzeme modeli kullanılmıştır. Malzeme modeli özellikleri aşağıdaki tabloda görülmektedir.

Çizelge 3.9. Ezilebilir köpük malzeme özellikleri

Yoğunluk ^I	3.83 E -7 kg/mm ³
Elastitite modülü ^{II}	1903 MPa
Poisson oranı ^{III}	0,4
Load curve ID ^{IV}	1
Tens. Cut off value ^V	1e20
Viscous damping coefficient ^{VI}	0.1

KAYNAK: I: Çizelge 3.2, II: 4.7 eşitliği, III: ANSYS Elements Manual 2007, IV: Şekil 4.3 eğrisi, V: ANSYS Ls-DYNA Training Manual. 2003, VI :Thompson 1997

Çizelge 3.9’da kullanılan ‘Load Curve ID’ değeri basma testi sonucunda asal gerilme ile birlikte oluşan plastik deformasyona bağlı olarak basma düzlemine dik yöndeki

kayma gerilmesinin değişmedir. Şekil 4.3'deki eğriye dik yöndeki bileşen matris şeklinde malzeme özelliği olarak tanımlanır.

3.6.3. Analizlerde Kullanılan Kontak algoritması

Analizlerde deney numunesi ile sabit yüzey ve yine deney numunesi ile hareketli silindir yüzeyi arasında iki yönlü genel otomatik kontak algoritması kullanılmıştır. Kontak algoritması sayesinde birbirinden farklı olan parçaların birbirleri ile olan temaslarını tanımlama olanağı elde edilir.

Kontak algoritması için ;

statik sürtünme katsayısı $k = 0,14$

dinamik sürtünme katsayısı $\mu = 0,1$ kullanılmıştır.

Genel otomatik kontak algoritması en çok kullanılan kontak tipidir. Özelliği ise kabuk yapılar için eleman normalinin iki yönünde birden kontak çifti'ni aramasıdır. Bu algoritma sayesinde analiz sonrasında ilgili veri kartları doldurularak yüzeyler üzerinden reaksiyon kuvvetleri elde edilebilmektedir.

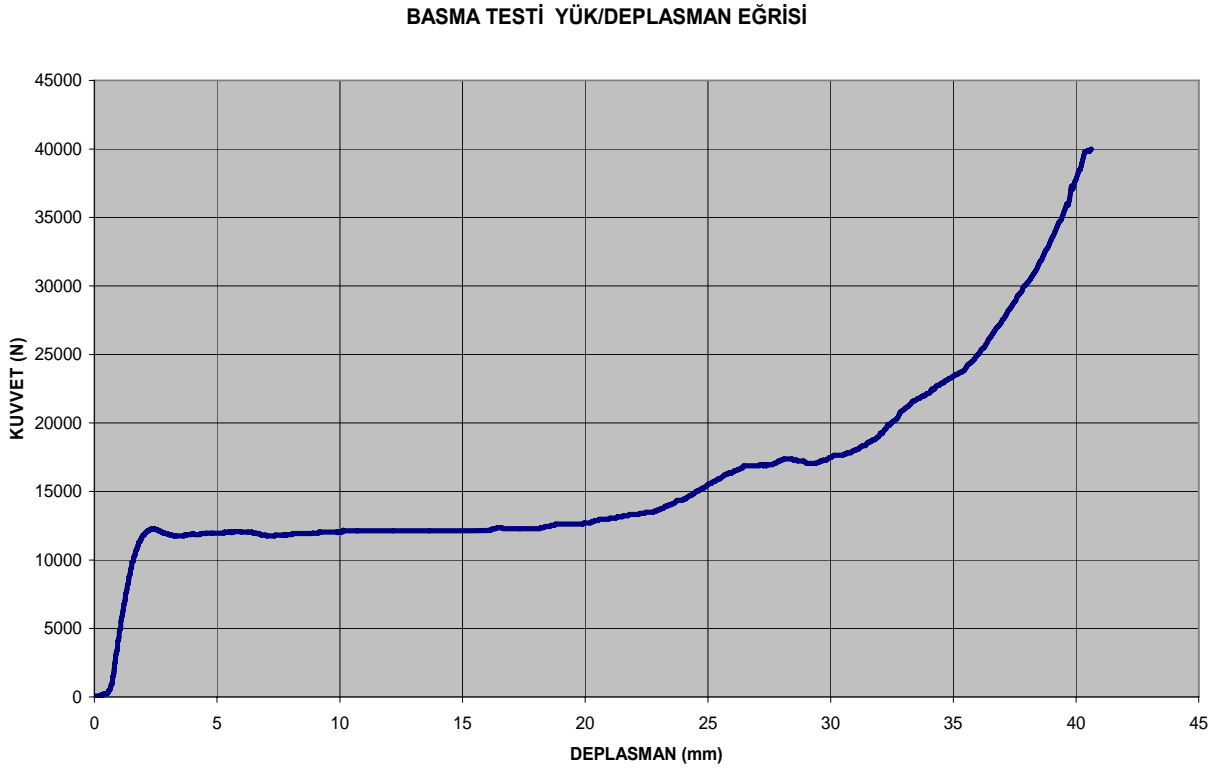
4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Basma Testi Sonuçları ve Tartışma

Basma testlerinin yapılışı materyal ve yöntem bölümünde anlatılmıştır. Toplamda 9 adet numunenin test sonuçları ortalamasından elde edilen eğriler ve çıkarımlar aşağıdaki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

4.1.1. Basma testi yük deplasman eğrileri

Düşük hızlarda gerçekleştirilen basma testinden elde edilen yük deplasman eğrisi şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1 Basma testi yük-deplasman eğrisi

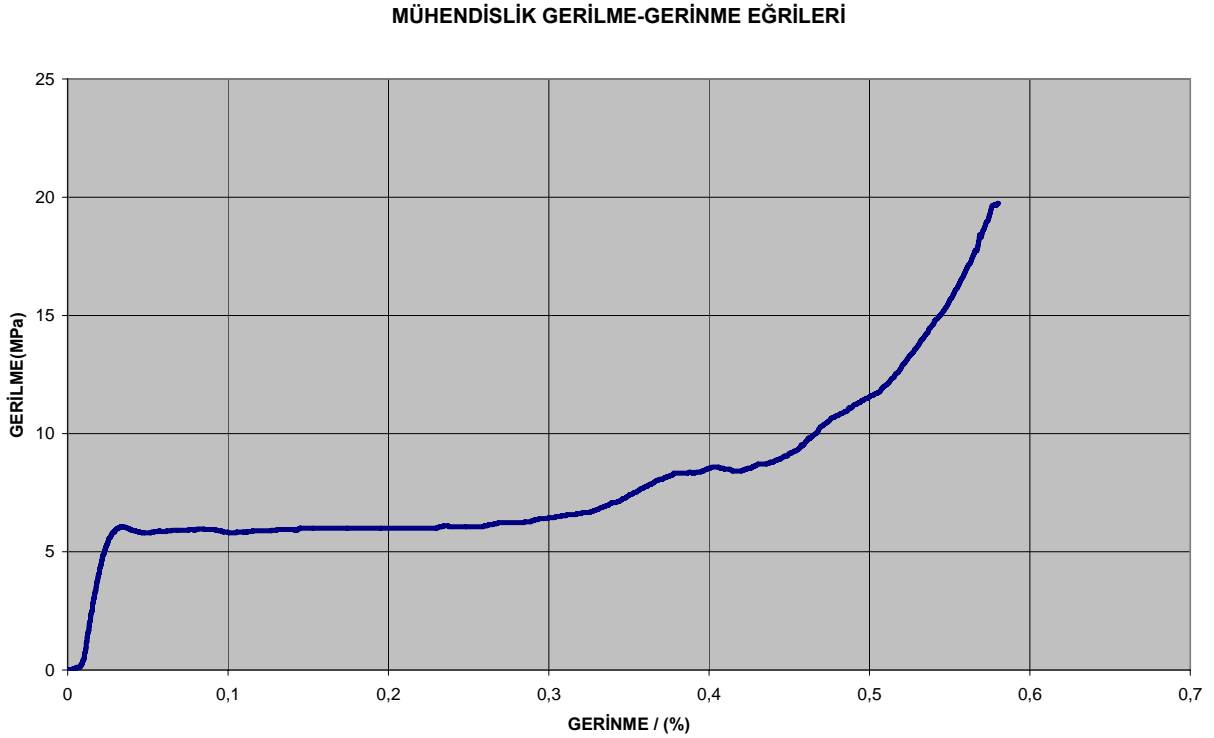
4.1 ana başlığı altında açıklanan basma testi ile elde edilen yük deplasman eğrileri ilgili rölatif yoğunluk değeri şu anki Alüminyum köpük üreticilerinin yapmış olduğu testlerle paralellik göstermektedir. Elde edilen yük deplasman eğrilerinin 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak gerinme gerilme eğrilerine dönüştürülmesi de teorik olarak doğru

bir yaklaşımdır. Basma testleri farklı sayıdaki numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu değerlerin ortalamaları kullanılmıştır. Çizelge 3.2’de bu deney setleri ve ortalama değerleri görülmektedir.

Popov 1990 yılında yapmış olduğu çalışmasında farklı tipteki malzemeler üzerine basma ve çekme testleri gerçekleştirmiş ve bu testler sırasında ortalama değerleri kullanmıştır. Bu şekilde malzeme düzensizliklerinden, tekil deneysel hatalardan dolayı oluşan hataların önüne geçilmiş olacaktır. Çalışmada 3 farklı set halinde toplamda 9 adet deney numunesi kullanılarak bu problemler önlenmiştir.

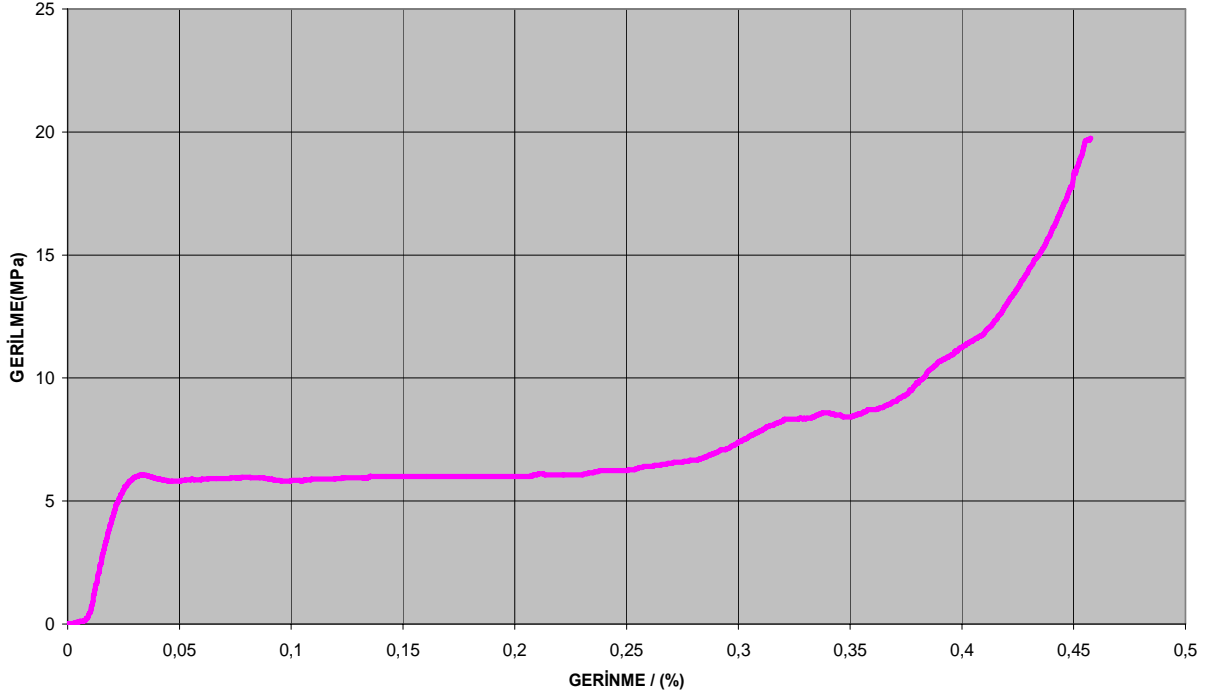
4.1.2. Basma testi gerilme gerinme eğrileri

Elde edilen yük deplasman eğrisi 2.2, 2.3 eşitlikleri kullanılarak önce Mühendislik gerilme gerinme eğrilerine çevrilmiştir (Şekil 4.2). Bu eğriyi oluşturan değerler 2.4 eşitliği gereğince gerçek mühendislik gerinmesi değerlerine dönüştürülmüştür (Şekil 4.3).



Şekil 4.2 Basma testi mühendislik gerilme - gerinme eğrileri

GERÇEK GERİLME-GERİNME EĞRİLERİ



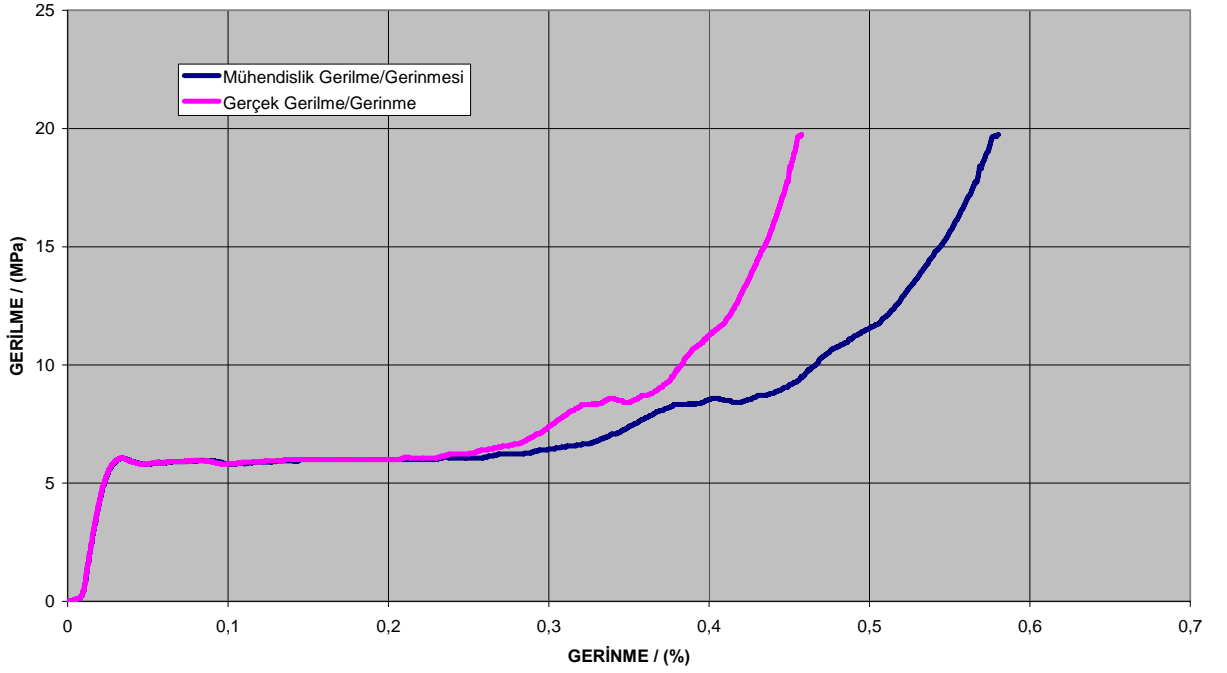
Şekil 4.3 Basma testi Gerçek gerilme - gerinme eğrileri

Bu dönüştürülen eğride beklenen bir sonuç olarak aynı gerilme değerine karşılık gelen gerinme değeri daha az olduğu için eğri sanki sola doğru bir miktar ötelenmiş gibi görülmektedir.

Şekil 4.4'de görülebilen bu durum gayet normaldir. Gerçekte basma ve çekme durumlarında aşamalara göre malzeme kesiti daralmakta veya incelmekte olduğundan, bu durumun tespiti zor bir noktadır. Bu sebeple öncelikle ilk aşamada bu kesit sabit kabulü yapılır ve sonrasında 2.4 eşitliği ile gerçek gerilme gerinme eğrilerine dönüştürülür. Bu hesaplamaların tümünde gerçek gerinme değerleri esas alınmıştır

Şekil 4.3'de elde edilen Gerilme gerinme eğrisi alüminyum köpük malzemelerden beklenen temel davranışları yansıtmaktadır. Beals ve Thompson (1997) tarafından basma yüklemesi altında elde edilen eğri karakteristikleri ve çeşitli bölgeler bu Şekil 2.52 ve Şekil 2.60'da açıkça görülmektedir.

GERÇEK / MÜHENDİSLİK GERİLME-GERİNME EĞRİLERİ



Şekil 4.4 Basma testi Gerçek mühendislik gerilme - gerinme eğrileri

Benzer bir karakteristik eğri Hayes ve ark. tarafından da elde edilmiştir. Petek yapılı metaller üzerine yapılan çalışma sonucunda Şekil 2.60'da görülen lineer bölge, düzlemsel bölge ve yoğunlaşma bölgeleri Şekil 4.3'de elde etmiş olduğumuz basma testi eğrilerinde aynen görülmektedir

Hayes ve ark.'nın (2004) yapmış oldukları başka bir deneysel çalışmada öncelikle statik olarak gerilme gerinme eğrilerini elde etmiş ve arkasında hızları artırarak dinamik durumu da incelemişlerdir. Burada elde edilen değerler çelik malzemeler üzerinde olduğu için gerilme değerleri ve eğilim köpük malzemelerinkinde bir miktar farklıdır. Özellikle elde edilen gerilme seviyeleri çok yüksektir.

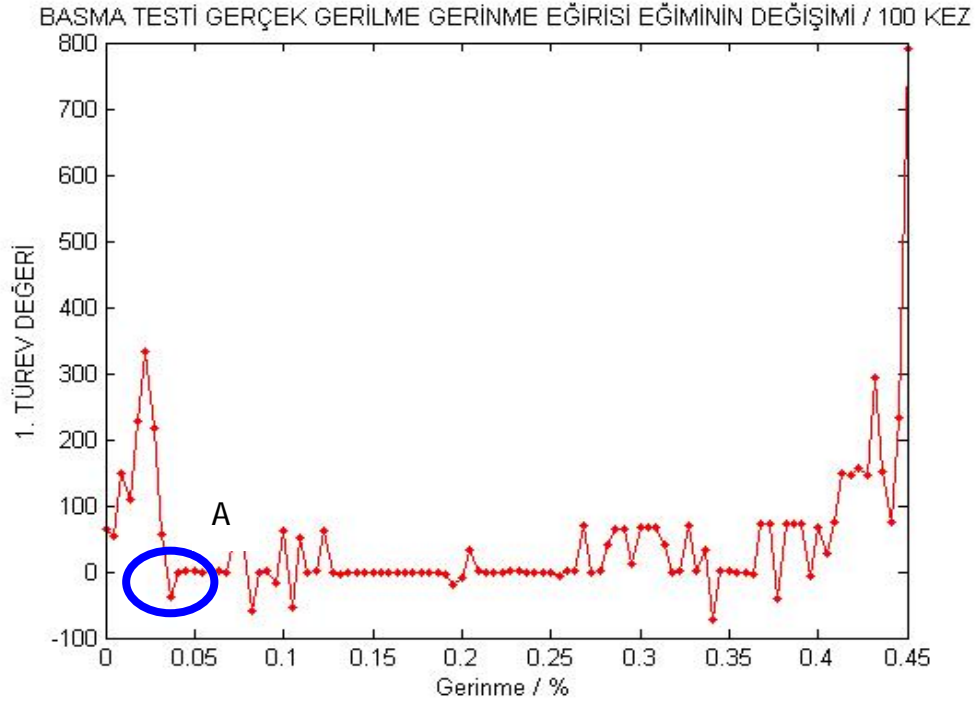
Andrews ve ark.'nın 1999'da yaptıkları çalışmada elde ettikleri gerilme değerleri farklı alaşım elementleri ihtiva etmelerine ve hücre boyutlarındaki farklılığa rağmen şekil 4.3'deki eğrisine benzerlik göstermektedirler. Özellikle şekil 2.43'ün basma yüklemesi altındaki eğrisinde düzlem gerilme bölgesi, çalışmamıza elde edilen eğri ile aynı karakteristiktir. Değerlerin rölatif olarak farklı olmasının sebebi ise alaşım elementleridir. Yapı içerisindeki alaşım elementleri bazı durumlarda yapının yüklemelere karşı olan cevabını değiştirdiği için bu eğrilerin paralel olarak yukarı veya aşağıya oynamasına sebep olmaktadır.

Aynı şekilde herhangi bir ısıl işlem uygulanması durumunda ise Zhuoa ve ark.'nın (2000) şekil 2.48'de görüldüğü gibi elde ettikleri eğrilerden görülmektedir. Özellikle şekil 2.48'b incelenir ise tavlama ve su verme işlemlerinden sonra eğride dikey bir değişim meydana gelmektedir. Ancak bu durum her ne kadar enerji sönümleme oranında artışa sebebiyet vereceği düşüncesi doğursa da atalet kuvvetlerindeki artış sebebi ile bu mümkün olmamaktadır. Bu sonuç aynı zamanda DEGISHER ve KRISZT (2002) tarafından yapılan çalışmada da bulunmuştur. Şekil 2.9'da bu ilişki grafiklendirilmiştir.

Farklı alaşım elementlerinden dolayı basma testi neticesinde elde edilen gerilme gerinme eğrilerini değişeceği ile ilgili benzer bir görüş MEGUID ve arkadaşları (2002) tarafından da belirtilmiştir. Bu çalışmada farklı yoğunluklu numunelerle yapılan çalışma sonucunda yoğunluk farkının veya farklı alaşım elementlerinin etkisinin gerilme gerinme eğrilerinde açıkça görüldüğü ifade edilmektedir.

4.1.3. Basma testi sonuçlarında akma noktasının tespiti

Bu yöntemle yük deplasman eğrilerinden elde edilen gerçek gerilme gerinme eğrisi (şekil 4.2) üzerinde tüm değerler için ilgili aralıkta 100 eşit aralıkta türev alınır. Alınan türev değerleri ile eğrinin eğimi hesaplatılır. Türevin sıfır olduğu değerler teorik olarak eğimin sıfır olduğu, bu noktaya teğet geçirilen doğrunun x eksenine paralel olduğu matematiksel olarak bilinmektedir.



Şekil 4.5 Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 100 kez

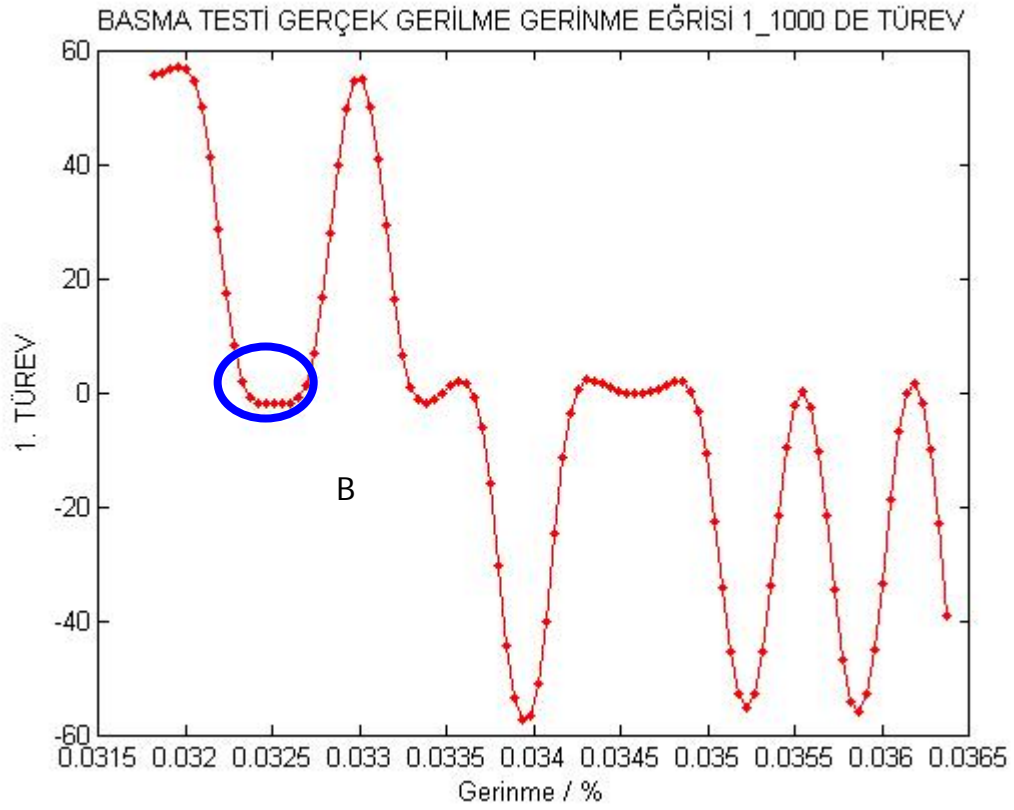
Bu türev değerleri şekil 4.5’de görüldüğü gibi elde edildikten sonra 1. türevin işaret değiştirdiği aralık tespit edilir.

0 değeri ile 0.45 gerinme değeri için 100 eşit aralıkta alına türevden sonra;

<u>Gerinme</u>	<u>Eğim (1. türev)</u>
0,0318182	55,5279
0,0363636	-39,0642

Değerleri arasında türev işaret değiştirmektedir (Şekil 4.5 üzerinde A bölgesi).

Bulunan ilk aralık için Gerinme değeri arasındaki fark 1/1000 değerinden daha büyük oranda farklı olduğu için (binler basamağından önceki bir değerde aynı oldukları için: 0,031 ve 0,036) işlem tekrarlanır. Bu durumda ilgili aralık için alınan türev sıklık sayısı yine 100 adet olacaktır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 100 kez

Burada bulunan değerlerden türevin işaret değiştirdiği aralık yeniden tespit edilir.

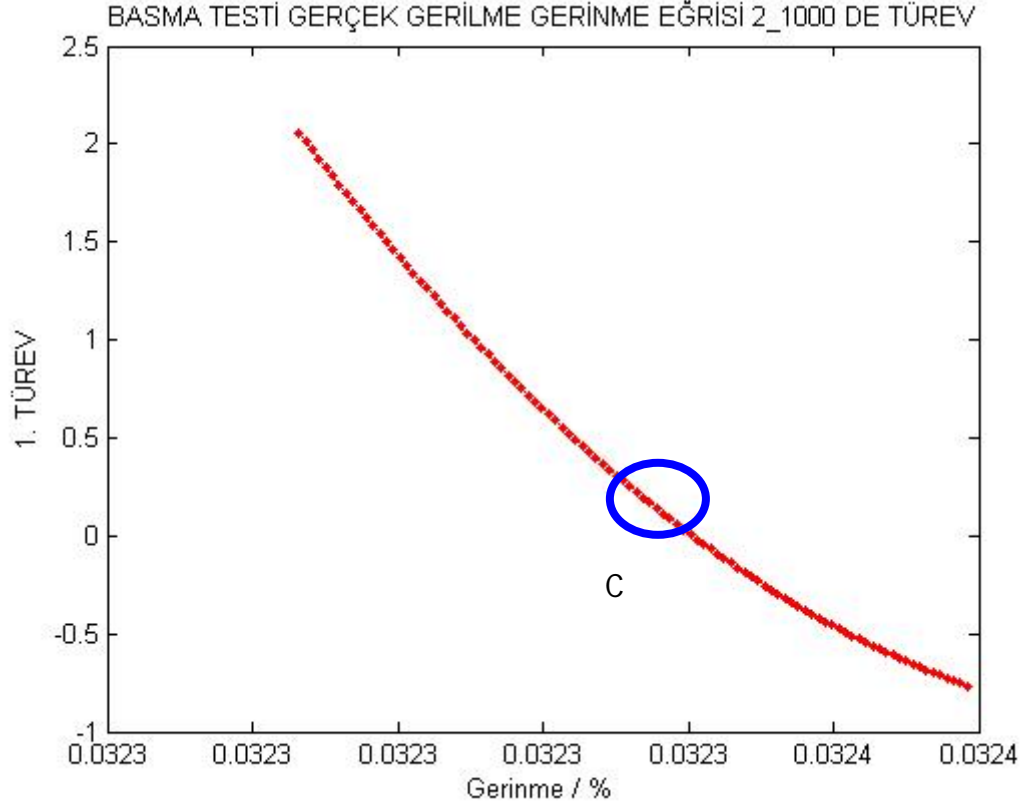
0,0318182 değeri ile 0,0363636 gerinme değeri için 100 eşit aralıkta alınan türevden sonra;

<u>Gerinme</u>	<u>Eğim (1. türev)</u>
0,0323232	2,05404
0,0323692	-0,7645

Değerleri arasında türev işaret değiştirmektedir (Şekil 4.7 üzerinde B bölgesi).
Elde edilen değerler şu şekilde yorumlanabilir;

Bulunan Gerinme değerindeki farklılık 1/1000 değerinden daha küçüktür (0,03232 ve 0,03236 değerleri) Gerinme değerleri için istenilen hassasiyet elde

edilmiştir. Aynı aralıkta elde edilen türev değerlerinden şu aşamada ilgili akma noktasını hassas olarak tespit etmek mümkün değildir. Türev değerlerindeki hassasiyeti elde edebilmek için bulunan ilgili aralık bu kez 1000 eşit aralık için türevlendirilir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 1000 kez

0,0323232 değeri ile 0,0323692 gerinme değeri için 1000 eşit aralıkta alınan türevden sonra;

<u>Gerinme</u>	<u>Eğim (1. türev)</u>
0,0323503	0,000386
0,0323503	-0,002139

Değerleri arasında türev işaret değiştirmektedir (Şekil b.5 üzerinde C bölgesi). Elde edilen değerler şu şekilde yorumlanabilir;

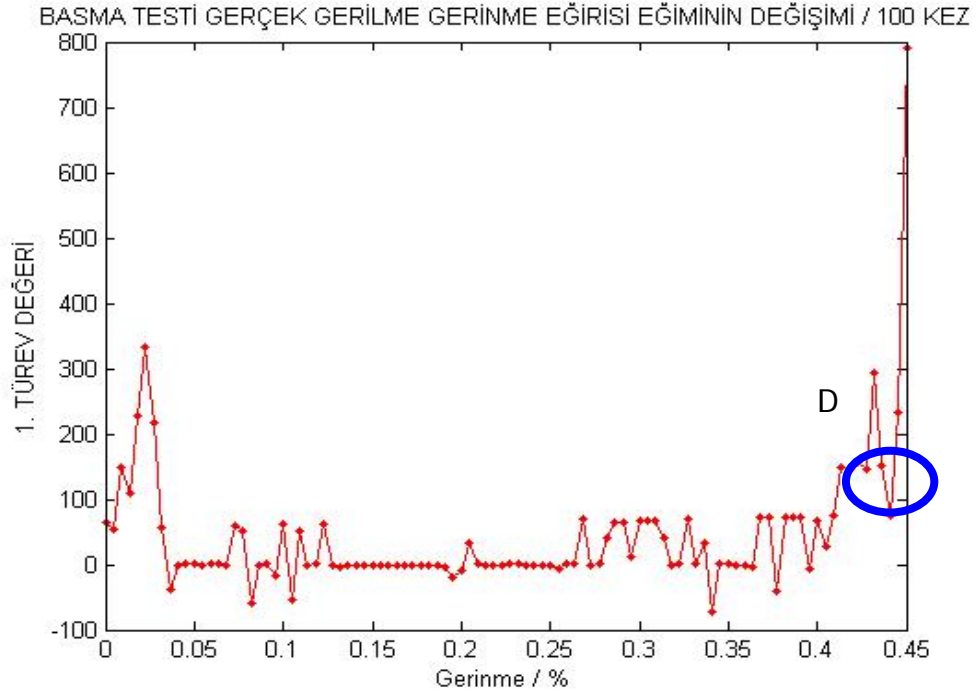
Gerinme değerleri arasındaki 1/1000 'deki değişimden daha küçük bir fark aralığında eğim değerleri arasındaki farkında 1/1000'den daha küçük olduğu değere kadar işlem 10 katı artırılarak tekrarlanırsa çok hassas Şekilde nokta tespiti yapılabilir (1/1000 ile elde edilemez ise 10000 adet eşit aralıklı türev alınır).

Buna göre malzeme için akma noktasının başladığı nokta hassas olarak 0,0323503 Gerçek gerinme değeridir. Bu noktanın tespit edilmesinin önemi sönümlenen enerji değerinin plastik deformasyon ile başlaması ve bu değerin hassas Şekilde tespit edilerek ilgili noktadaki aynı eğriye tekabül eden yük değerinden başlamak kaydı ile çarpma sırasındaki sönümlenen enerji tespit edilmesidir.

Aynı Şekilde benzeri işlem yoğunlaşma noktası için de yapılarak ilgili hassas aralık için sönümlenen enerji değerleri hesaplanmıştır. Benzer Şekilde farklı hızlarda yapılan testler ve analizlerin örtüşmesinden elde edilen değerler yüksek hızlarda analiz edilmiş ve hıza bağımlı olarak sönümlenen enerjiler tespit edilmiştir. Gerilme gerinme eğrilerinin altında kalan alanlardan da yine farklı hızlara bağlı olarak tokluk değerlerinin değişimi hesaplanmıştır.

4.1.4. Basma testi sonuçlarında yoğunlaşma noktasının tespiti

Akma noktasının tespit edilmesi sırasında kullanılan yöntem aynı Şekilde yoğunlaşma noktasının tespiti içinde kullanılacaktır. Buna göre Şekil 4.8'de görülen eğimin değişimi grafiğinde D ile işaretlenen bölgede yoğunlaşma meydana gelmektedir. Bu bölgenin karakteristik olarak A bölgesinden farkı aranan değerin eğimin sıfır olduğu bölge olmamasıdır. Bu bölgede eğim sürekli olarak artmalı ve bu artışın süreklilik kazandığı ilk değerin tespit edilmesi ile yoğunlaşma noktasının hassas olarak bulunması esastır.



Şekil 4.8 Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 100 kez

0 değeri ile 0,45 gerinme değeri için 100 eşit aralıkta alına türevden sonra;

<u>Gerinme</u>	<u>Eğim (1. türev)</u>
0,395455	6,36807
0,400000	-66,2911

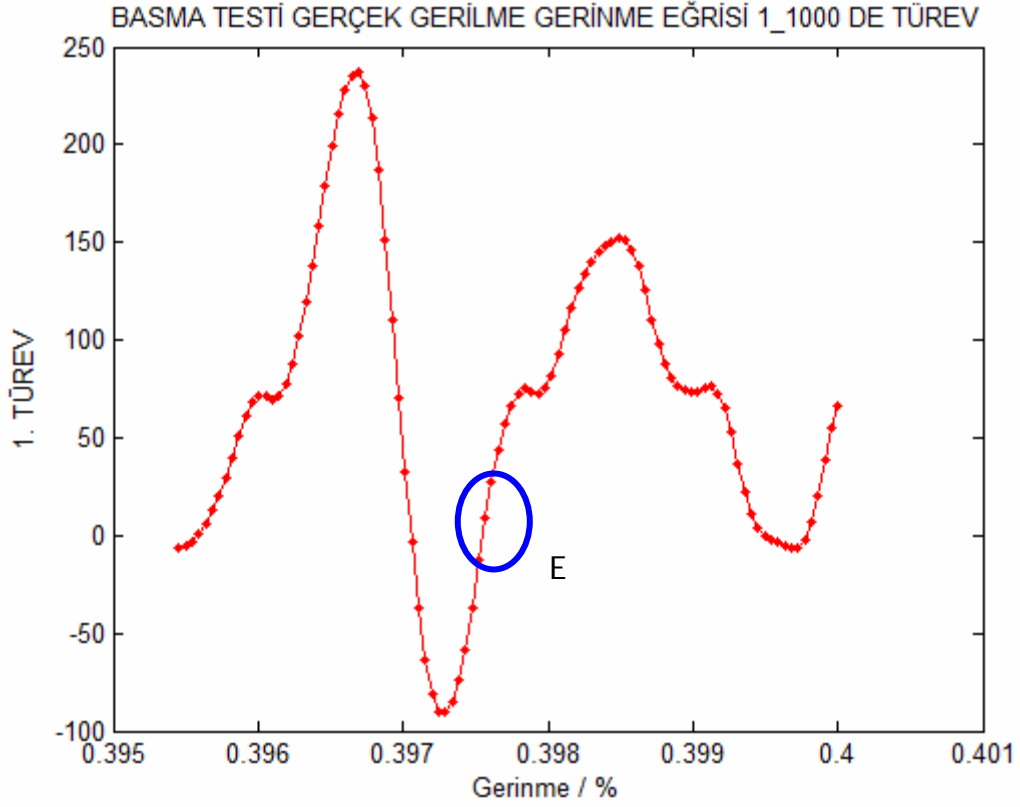
Değerleri arasında türev işaret değiştirmektedir (Şekil b.6 üzerinde D bölgesi).

Hesaplanan ilk aralık için gerinme değerleri arasındaki fark 1/1000 değerinden daha büyük olduğu için işlem tekrarlanır (0,395455 ve 0,400000)

0,395455 değeri ile 0,4000 gerinme değeri için 100 eşit aralıkta alınan türevden sonra;

<u>Gerinme</u>	<u>Eğim (1. türev)</u>
0,39977	-1,75653
0,399816	7,15377

Değerleri arasında türev işaret değiştirmektedir (Şekil 4.9 üzerinde E bölgesi).



Şekil 4.9. Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 1000 kez

Elde edilen değerler incelendiğinde (0,39977 ve 0,399816) hedeflenen 1/1000 hassasiyetinin elde edildiği görülmüştür. Bu aşamadan sonra aynı aralık için 1000 eşit aralıkta türev alınarak hassas olarak ilgili değer hesaplanabilir.

0,399777 değeri ile 0,399816 gerinme değeri için 1000 eşit aralıkta alınan türevden sonra;

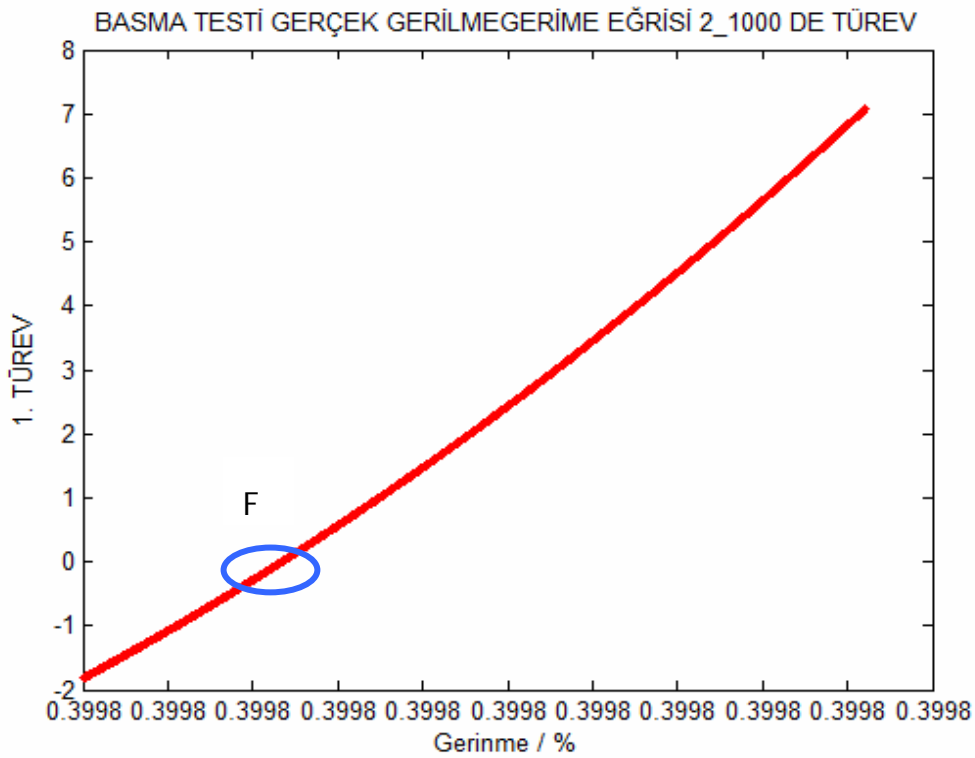
<u>Gerinme</u>	<u>Eğim (1. türev)</u>
0,399777	-0,24433
0,399782	0,00533

Değerleri arasında türev işaret değiştirmektedir (Şekil 4.10 üzerinde F noktası). Elde edilen değerler şu şekilde yorumlanabilir. Elde edilen noktalar arasında alınan türev değerlerinin farklı 1/1000 değerinden büyük olduğu için aynı noktalar arasında alınan türev sayısı 10 kat artırılacaktır. Buna göre;

0,399777 değeri ile 0,399816 gerinme değeri için 10000 eşit aralıktta alınan türevden sonra;

<u>Gerinme</u>	<u>Eğim (1. türev)</u>
0,399777	-0,0003217
0,399782	0,0004566

Değerleri arasında türev işaret değiştirmektedir.



şekil 4.10. Basma testi gerçek gerilme/ gerinme eğrisi eğiminin değişimi / 10000 kez

0,399816 Gerçek gerinme değeri yoğunlaşma bölgesinin başladığı ilk noktadır. Bu noktanın tespit edilmesinin önemi plastik deformasyona dönüşen enerjinin bu noktadan sonra sönümlenme yeteneğini kaybetmesidir. Bu değer hassas şekilde tespit edilerek ilgili noktadaki aynı eğriye tekabül eden yük değerinden başlamak kaydı ile çarpma sırasındaki sönümlenme enerjinin st değeri tespit edilmiştir.

Basma testlerinde uygulanarak geliştirilen bu yöntem farklı hızlardaki çarpma testleri neticesinde elde edilen eğrilerde kullanılmıştır. Yöntem geliştirilirken basma

testleri sonuçlarının kullanılması çeşitli dinamik etkilerin, ataletlerin ve dinamik sürtünme katsayısından dolayı bulunacak yöntemin etkilenebileceği düşüncesidir.

Buna paralel olarak basma testlerinin düşük hızlarda yapılması sebebi ile anlık pekleşme olmaması da bir başka etkendir. Genel olarak literatürde düşük hızlarda tokluk ve sönmülenen enerji değerleri bir kullanım alanı bulmadığı için ilgili basma testlerinde bu değerler hesaplanmamıştır.

4.2. Basma testi sonuçlarında Elastisite modülünün elde edilmesi

Elastisite modülü kaynak araştırması ve materyal yöntem bölümlerinde belirtildiği üzere malzemenin doğrusallığının limit olarak tanımlanabilir. Buna göre akma noktasının başladığı noktanın Tanjant değeri bize teorik olarak Elastisite modülünü verecektir. Bu aşamadaki iki sorun akma noktasının doğru tespit edilmesi ve akma noktasına kadar çok az bir oranda da olsa plastik gerinme değerinin doğrusallığı ve sonuçları etkilemesidir.

Genel olarak toplam gerinme değeri elastik ve plastik bileşenlerin toplamından meydana gelmektedir. Eğer bu plastik bileşeni 4.1.3 bölümünde hassas olarak tespit edilen gerinme ve gerinme değerlerinden mutlak olarak çıkartırsak Elastisite modülü düzeltilmiş gerçek değeri ile elde edilmiş olacaktır.

Yapılan yükleme değerleri elastik sınırları aştığı zaman malzeme üzerinde plastik deformasyonlar meydana gelmeye başlar. Bu durumda Gerinmeden bahsederken yeni bir terim devreye girer. Çünkü yapıda iki farklı tip gerinme vardır. Toplam gerinme değeri elastik ve plastik değerlerin toplamına eşittir.

$$\text{Temel gerinme değeri Hook kanununa göre, } \varepsilon = \sigma / E \quad (4.1)$$

$$\text{Elastik gerinme değeri Hook kanununa göre, } \varepsilon_e = \sigma / E \quad (4.2)$$

$$\text{Plastik gerinme değeri, } \varepsilon_p = (\sigma/K)^{1/n} \quad (4.3)$$

4.3 eşitliği güç kanunundan çıkarılmış olup gerilme plastik gerinme ve malzemenin gerinme sertleşmesi ile ilişkilidir. $\sigma = K \epsilon_p^n$ eşitliğinde K mukavemet sabiti n ise gerinme sertleşmesi Üssü'dür.

Bunlara bağlı olarak toplam gerinme değeri aşağıdaki değeri almaktadır.

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p = \sigma / E + (\sigma/K)^{1/n} \quad (4.4)$$

$$\epsilon = 0,0323503 \quad (4.5)$$

gerinme değeri aslında içerisinde plastik bileşeni de içeren gerinme değeridir. Bu değere karşılık gelen gerilme değeri ise eğri üzerinden

$$\sigma = 6,186 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

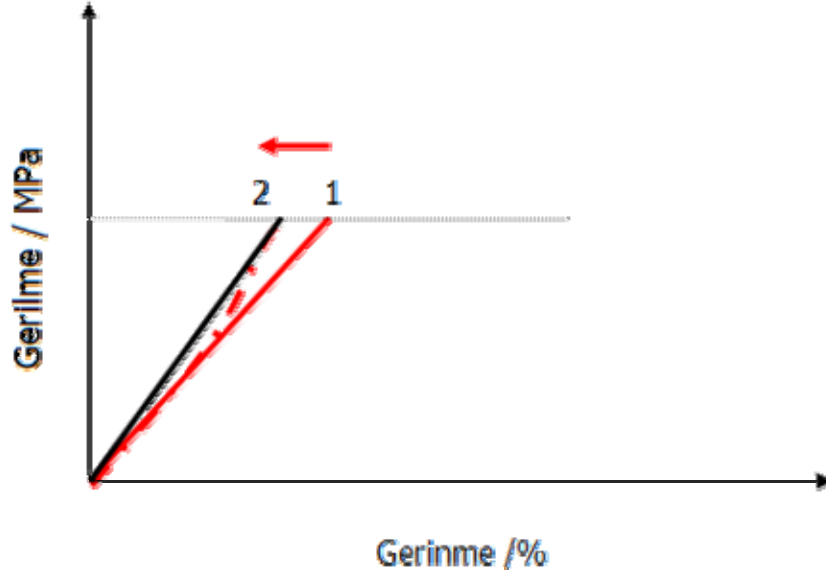
olarak okunmaktadır.

Buradan 4.1 eşitliği kullanılarak;

$$\text{Elastisite modülü, } E = 1903 \text{ MPa} \quad (4.7)$$

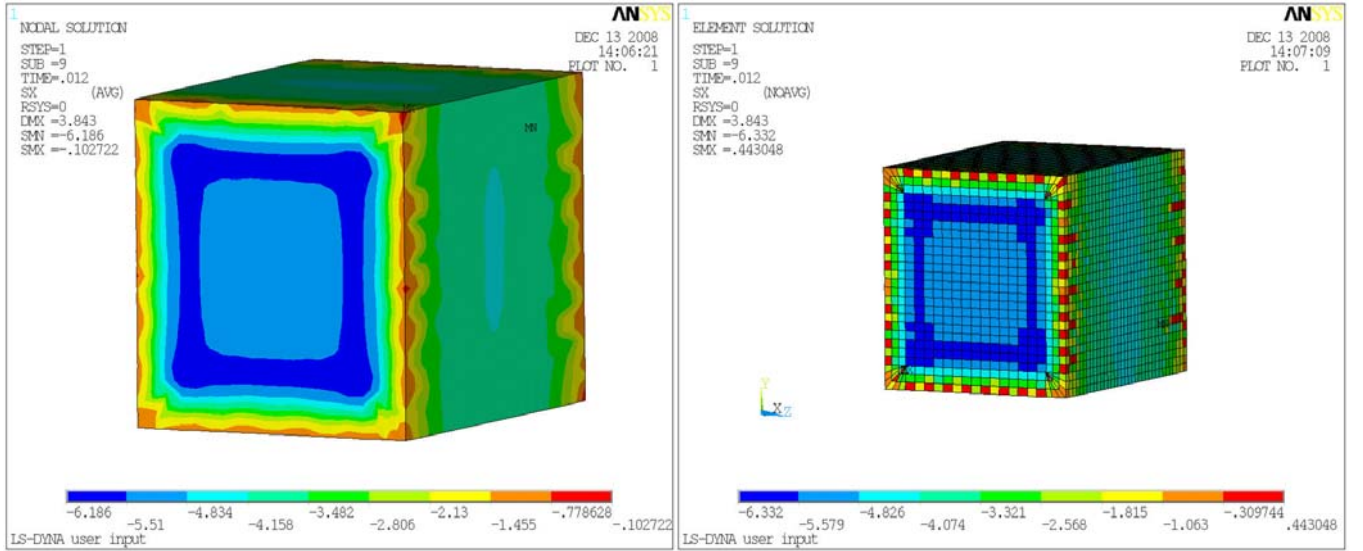
Olarak hesaplanır.

Hesaplanan bu değer Şekil 4.11'deki 1 numaralı doğrusal çizginin Tanjant değeridir. Gerçekteki Elastisite modülü ise 2 numaralı doğrusal çizgiye dönüşen ve kesikli çizgi ile doğrusallığı bozan eğrinin 2 noktasındaki tanjant değeridir. Gerçek olarak elde edilmesi gereken değer 4.2 eşitliğindeki Elastik gerinmedir



Şekil 4.11. Plastik bileşen içeren gerilme değeri için Elastisite modülü hesaplama

Akmanın başladığı nokta yukarıda hassas olarak hesaplanmıştır. Bu noktadaki plastik gerilme değerini yapılan analiz ile aşağıdaki şekilde elde edilebilir.



Şekil 4.12.a. Akma noktasının başlangıç değerindeki gerilme dağılımı

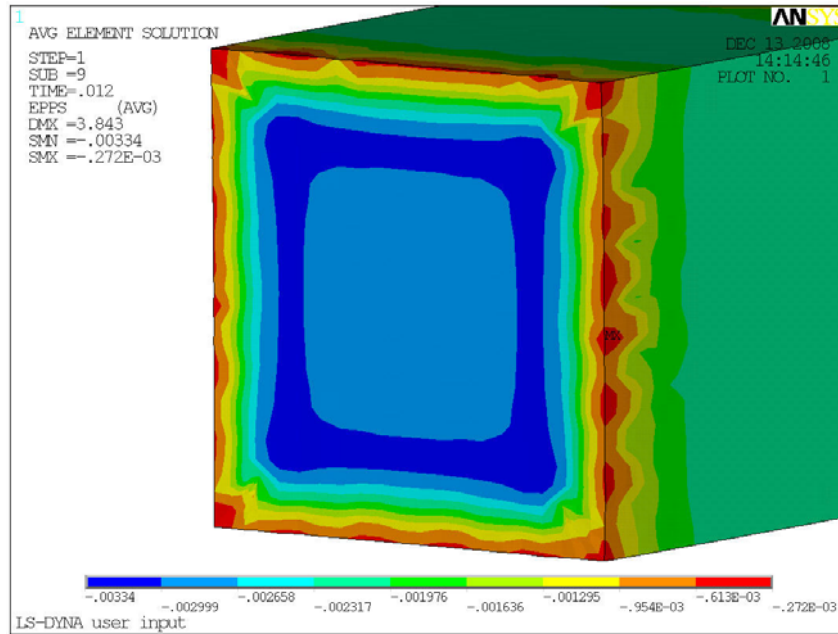
Şekil 4.12'de akma noktasında elde edilen gerilme değerinin test ile örtüştüğü rahatlıkla görülebilmektedir. Burada elde edilmiş olan 6,186 MPa'lık (bk 4.6) gerilme

değeri test sonuçlarında da elde edilmiştir. Bu noktadan hareket ile ilgili dağılımdaki plastik gerilme değeri şekil 4.13 ve şekil 4.14'deki gibidir.

Şekil 4.12'de dağılımı ile birlikte görülen plastik gerilme değeri

$$\epsilon_p = 0,00334 \quad (4.8)$$

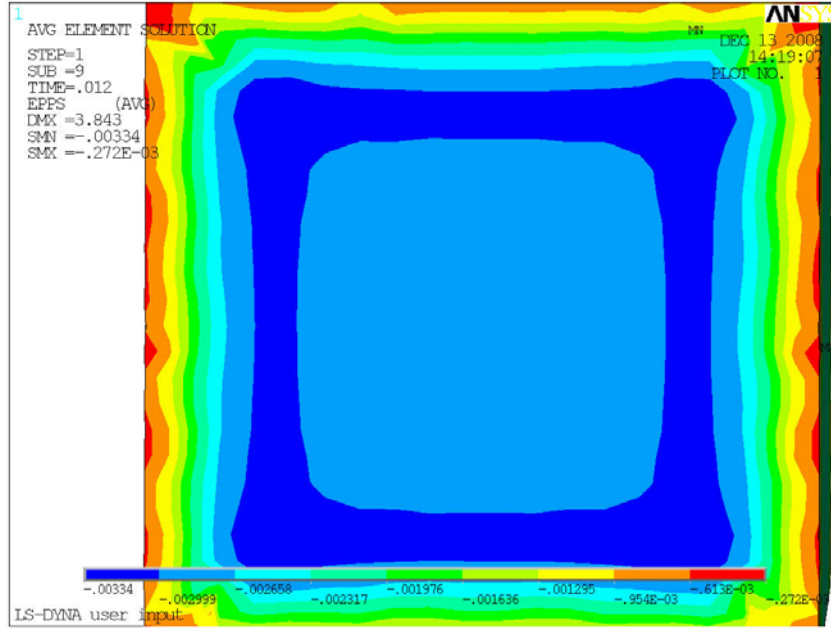
olarak elde edilir. Bu değer hesaplanmasında malzeme modeli literatürdeki 4.3 ve 4.4 eşitliklerini kullanmaktadır (ANSYS Elements Manual, 1999, ANSYS- LS-DYNA Trainin Manual, 2003).



Şekil 4.13. Akma noktasının başlangıç değerindeki plastik gerilme (EPPS)

Şekil 4.13'de daha detaylı olarak verilen dağılım incelendiğinde tek eksenli olarak yapılan basma işleminde malzemenin cevabının oldukça simetrik olduğu görülmektedir. Basma işleminin ilerleyen aşamalarında bu simetrik dağılım, malzeme içi kayma gerilmeleri, taneler arası deformasyonlar ve yoğunlaşma mekanizmaları sebebi ile daha farklı olacaktır.

Şekil 4.10'da görülen 2 noktasındaki değerle bu analiz sonuçlarında elde edilen plastik gerilme değerlerinin test ile bulunan gerilme değerinden çıkarılması ile 4.4 eşitliğinde bulunan elastik gerilme, ϵ_e değeri elde edilir. Bu değer gerilme değerine bölünmesi ile düzeltilmiş ve plastik gerilme değerlerinden arındırılmış yeni Elastisite modülü elde edilmiş olur. 4.9 ve 4.10 eşitliklerinde bu işlemler görülmektedir.



Şekil 4.14. Akma noktasının başlangıç değerindeki plastik gerilme detayı (EPPS)

$\epsilon_e = \epsilon - \epsilon_p$ olduğundan

$$\epsilon_e = 0,0323503 - 0,00334,$$

$$\epsilon_e = 0,0290103 \quad (4.9)$$

Olarak elde edilir.

Buradan

$E = \sigma / \epsilon_e$ eşitliği kullanılarak,

$$\text{Düzeltilmiş Elastisite Modülü} \quad E_d = 2132 \text{ MPa} \quad (4.10)$$

Olarak elde edilir.

4.10 eşitliği ile bulunan elastisite modülünü 4.11 eşitliğinde yerine konular ise ilgili formülasyonda kullanılan n katsayısı yukarıdaki hesaplama yöntemi ile karşılaştırılabilir.

$$E_{Köpük} = E_{Katı} \left[\frac{\rho_{Köpük}}{\rho_{Katı}} \right]^n \quad (4.11)$$

(Fraunhofer)

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

$E_{Katı}$: Alüminyumun elastisite modülünü,

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

$\rho_{Katı}$: Alüminyumun yoğunluğunu,

n : Titreşim deneyleri kullanılarak elde edilen elastisite değeri ile yoğunluğun oluşturduğu doğrunun eğimini göstermektedir ($1.5 \leq n \leq 2.5$).

$$2132 = 7 \cdot 10^4 (3.83 \times 10^{-7} / 2.71 \times 10^{-6})^n$$

$$2132 = 7 \times 10^4 \times 0.1413134133^n$$

$$0.030457 = 0.1413134133^n$$

$$n = 1.76 \quad (4.12)$$

Olarak bulunur. 4.10 eşitliğinde elde edilmiş olan sonuç Fraunhofer sonuçları ile ve ilgili kriterleri ile uyum göstermektedir.

Bu durumda Elde edilmiş elastisite modülü (4.7) ile düzeltilmiş Elastisite modülü(4.10) birbirine bölünerek elde edilen katsayı formülasyona çarpan olarak eklenecektir veya bulunan ilk gerinme değeri (4.5) düzeltilmiş değer bölünerek,

$$E_d = 1.12 (\sigma / \epsilon) \text{ veya} \quad (4.13)$$

$$E_d = (\sigma / 0.89 \epsilon) \quad (4.14)$$

Olarak kullanılabilir.

Düşük hızlarda yapılan basma testleri neticesinde elde edilen gerilme-gerinme eğrileri kullanılarak elde edilen Elastisite modülünün köpük malzemeler için tespitine yönelik çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda genel olarak rölatif yoğunluk oranları ve ilgili malzemenin tam matris hali kullanılmış şekilde literatürde bulunan elastisite modülü belirli bir üstel çarpan ile modifiye edilerek elastisite modülü verilmektedir. 4.11 eşitliğinde Fraunhofer enstitüsü tarafından geliştirilmiş bu formülasyon yapılan titreşim deneylerinin hassasiyetine bağlı olarak bir değer vermektedir.

ZHIHUA'nın (2005) çalışmasında ifade ettiği gibi lineer elastik bileşenin baskın olduğu bölge sadece düşük gerinme hızlarında net olarak edile edilebilmektedir. Bu sebeple Elastisite modülü hesaplarında özellikle düşük ilerleme hızlarındaki basma testleri kullanılmalıdır. Şekil 4.1'de elde edilen eğri bu şekilde 100 mm/dak'lık ilerleme hızında elde edilmiştir. Bunun ötesinde kapalı hücreli köpük yapılarında plastik gerinme değerinin elastik olana oranı açık hücreli yapılarak göre çok daha yüksek olduğundan dolayı bu hızın düşük tutulması durumunda bile lineer elastik bölge içerisinde de plastik bir bileşen oluşacaktır. 4.9 eşitliğinde bu değer teorik olarak hesaplanabilmiştir.

Fraunhofer Enstitüsünün çalışmasına paralel olarak DEGISCHER ve KRISZT (2002)'de kapalı ve açık hücrelerde belli farklar olmak kaydı ile benzer ilişkileri kurmuştur. İki çalışma arasında fark olarak titreşim deneylerinden elde edilen n katsayısının 4.11 eşitliğindeki şeklinin DEGISCHER ve KRISZT tarafından sabit bir ara değer olarak kullanılmasıdır. Bu çalışmada n katsayısı direk olarak sayısallaştırılmış ve 2 olarak ifadeye eklenmiştir. Çalışmamızda kullandığımız yöntemle elde edilen elastisite modülü Fraunhofer Enstitüsünün ifadesinde yerine konulduğunda elde edilen n katsayısı birbirini desteklemektedir.

ASHBY ve arkadaşlarının çalışmasında ifade ettikleri gibi ve yukarıda desteklendiği üzere elastisite modülünü veren ifadeler üzerine şimdiye kadar yapılan çalışmalarda bazı kriterlere göre bu değerlerin tespitinin zor olduğu da ifade edilmektedir.

4.13 ve 4.14 eşitliklerinde elde edilen ifadeler yapılan çalışmalara nispeten daha kolay ve kesin sonuçlar vermektedir.

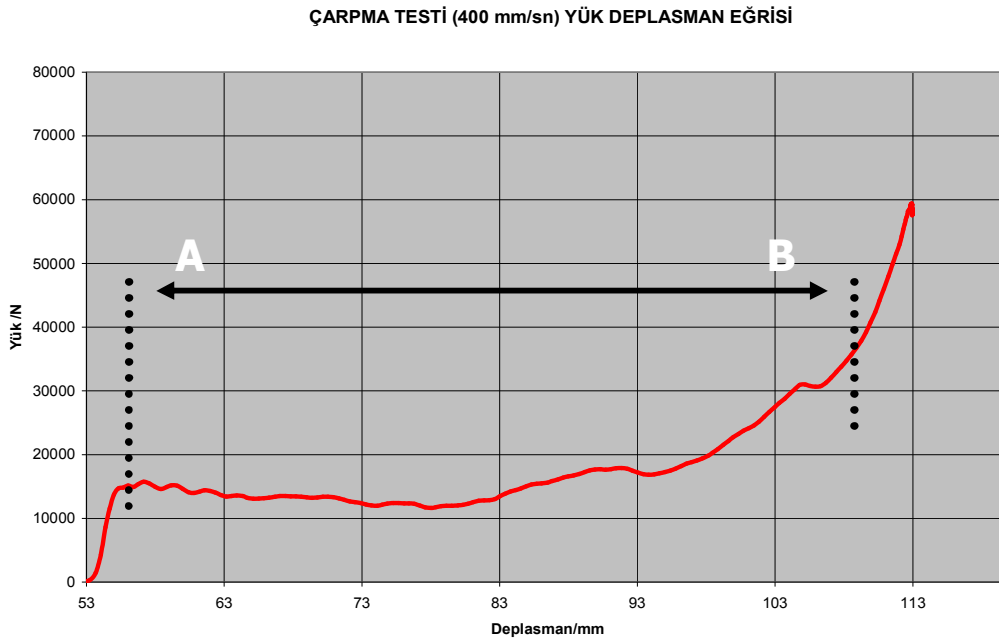
Sonuç olarak elde edilen eğrinin direk olarak analiz edilmesi neticesinde elde edilen plastik bileşenlerden arındırılmış gerinme değeri ile lineer malzeme modülünün (BABALIK 1997) kullanılması hata payını ve seçin riskini ortadan kaldırmaktadır. Zira n katsayısının en küçük ve en büyük değerleri arasındaki fark % 40'ı bulmaktadır. Bu da elde edilecek elastisite modülleri arasında büyük fark yaratacaktır.

4.3 Çarpma Testi Sonuçları ve Tartışma

Materyal ve yöntem bölümü 3.5’de detayları verilen testler neticesinde elde edilen eğriler farklı hızlar için 4.3.1, 4.3.2 ve 4.3.3 bölümlerinde görülmektedir. Çıkan sonuçlar detaylı şekilde yorumlanmıştır.

4.3.1. 400 mm/sn-(1,44km/saat) için test sonuçları

4.3.1.1. 400 mm/sn için Yük deplasman eğrileri



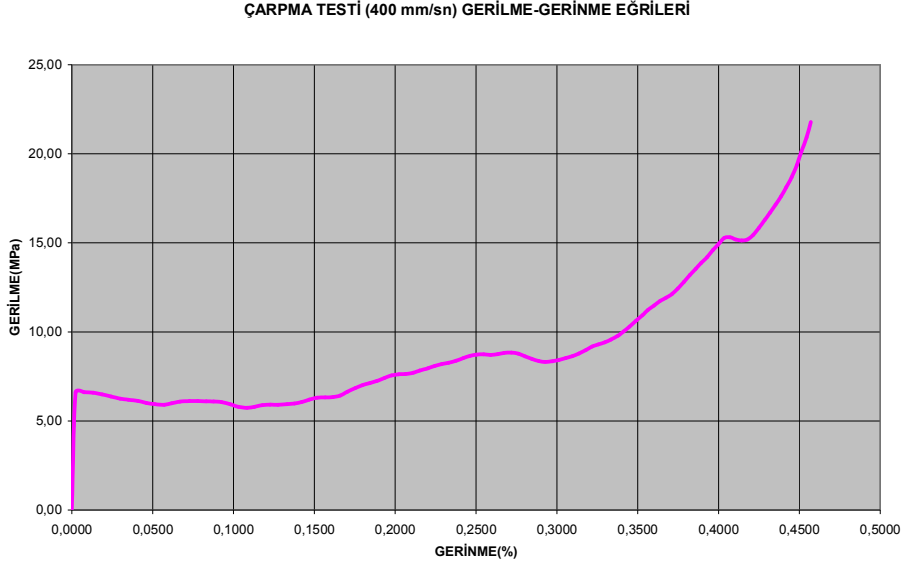
Şekil 4.15. 400 mm/sn için çarpma testi yük-deplasman eğrileri

400 mm/sn hız için gerçekleştirilen çarpma testinden elde edilen yük deplasman eğrisinde x eksenini değeri olan deplasmanın 53 mm’den başlamasının sebebi silindirin numuneye çarpmadan önce aldığı yoldan kaynaklanmaktadır. Bu eğri 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak 4.3.1.2 bölümünde görülen gerilme-gerinme eğrilerine çevrilmiştir.

Genel olarak düzlem gerilme bölgesi kabaca yine yük deplasman eğrisi üzerinde de görülebilmektedir. Şekil 4.15’deki A ve B noktaları arasındaki bant için kuvvet değeri 15.000 N olarak düzlemsel seyretmektedir.

4.3.1.2. 400 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri

Şekil 4.16'da 400 mm/sn çarpma hızı için elde edilen gerilme-gerinme eğrisi görülmektedir.

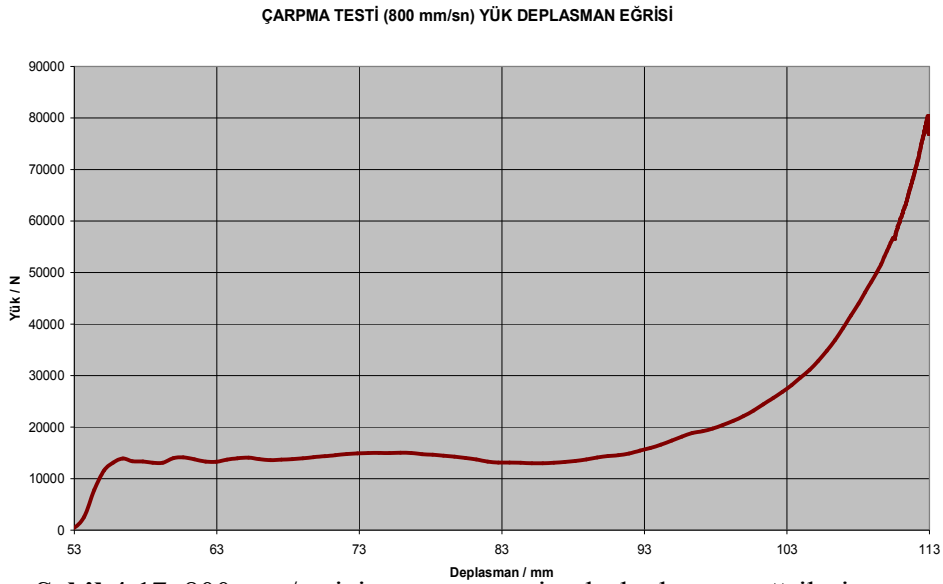


Şekil 4.16. 400 mm/sn için çarpma testi gerilme – gerinme eğrileri

4.3.2. 800 mm/sn-(2,88km/saat) için test sonuçları

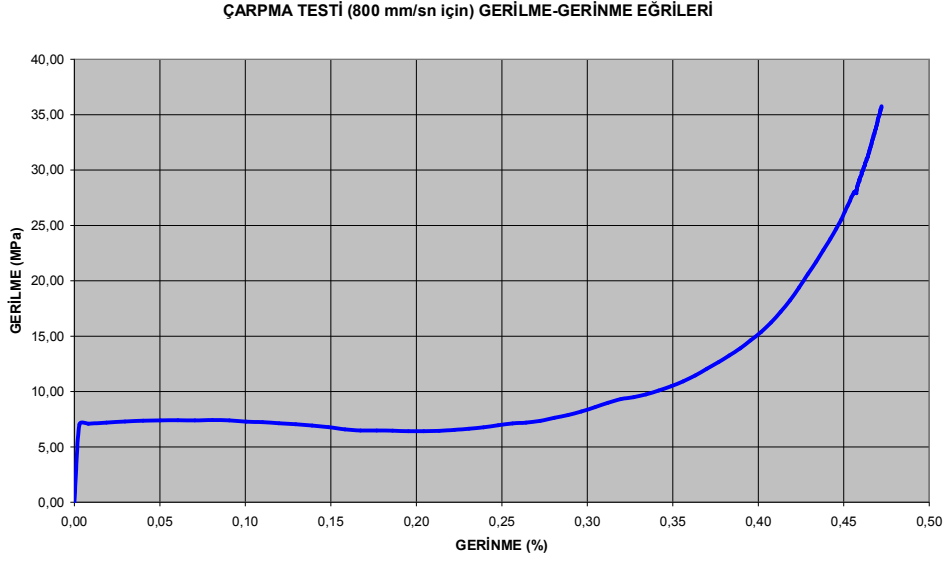
Şekil 4.17'de 800 mm/sn çarpma hızı için elde edilen yük-deplasman eğrisi, şekil 4.18'de işse aynı hız için elde edilen gerilme-gerinme eğrileri görülmektedir.

4.3.2.1. 800 mm/sn için Yük deplasman eğrileri



Şekil 4.17. 800 mm/sn için çarpma testi yük-deplasman eğrileri

4.3.2.2. 800 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri

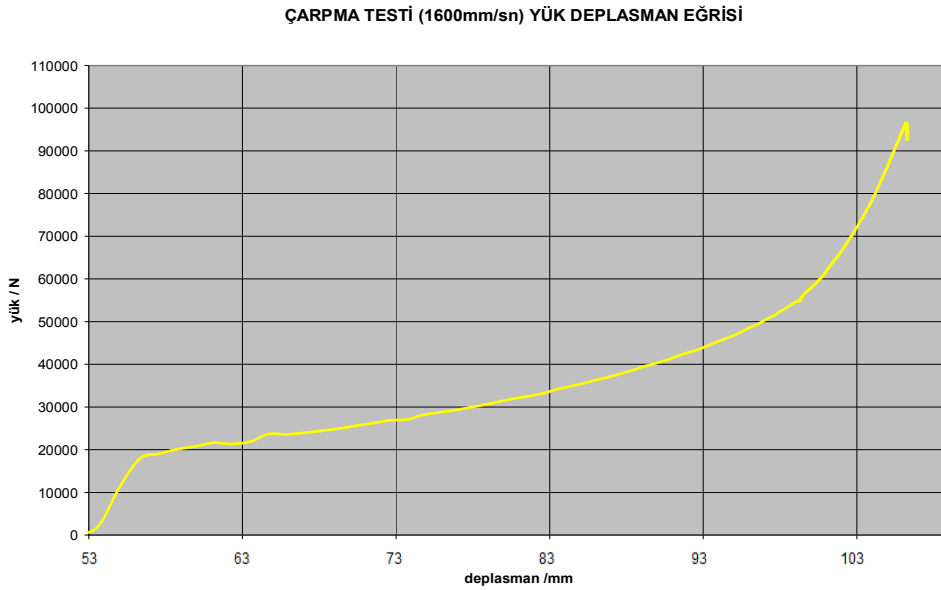


Şekil 4.18. 800 mm/sn için çarpma testi gerilme – gerinme eğrileri

4.3.3. 1600 mm/sn-(5,76km/saat) için test sonuçları

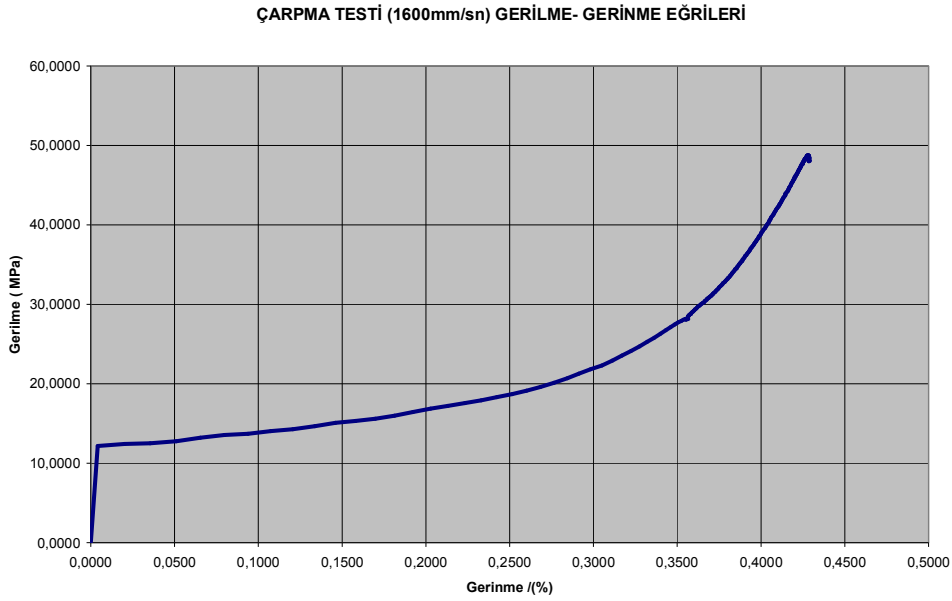
Şekil 4.19’da 1600 mm/sn çarpma hızı için elde edilen yük-deplasman eğrisi, şekil 4.20’de işse aynı hız için elde edilen gerilme-gerinme eğrileri görülmektedir.

4.3.3.1. 1600 mm/sn için Yük-deplasman eğrileri



Şekil 4.19. 1600 mm/sn için çarpma testi yük-deplasman eğrileri

4.3.3.2. 1600 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri



Şekil 4.20. 1600 mm/sn için çarpma testi gerilme – gerinme eğrileri

Üç farklı çarpma hızında elde edilen gerilme gerinme eğrilerine yönelik Mukai ve ark'nın (2006) yapmış oldukları çalışmaya benzer bir grafik elde edilmiştir. Şekil 2.47'de dinamik gerinme oranları artıkça nominal gerilme değerlerinin attığı görülmektedir. Şekil 4.16, şekil 4.18 ve şekil 4.20 karşılaştırıldığında ayı durumun meydana geldiği görülmektedir. Mukai ve ark'nın çalışmasında çarpma hızı yaklaşık olarak 800 mm/sn ve 12500 mm/sn olarak kullanılmıştır. Şekil 4.20'deki eğri de 800 mm/sn çarpma hızındaki sonuçlardır. Yapılan iki çalışma arasındaki fark hücre tipinin farklı olmasıdır. Bu sebeple nominal gerilme değerleri yatay olarak birbirinden farklılıklar göstermektedir. Bu beklenen bir sonuçtur.

Dinamik etkilerden dolayı bu eğrilerin karakteristiklerinin aynı kaldığı ancak değer olarak değiştikleri bilinmektedir. Ancak bazı durumlarda bu karakteristikleri de değişim gösterebilmektedir. Andrews ve ark. (1999) çalışmalarında elde ettikleri sonuçlarda bunu vurgulamışlardır. Çalışmalarında farklı tip malzeme kullanmalarına rağmen dinamik karakteristiği değişen çarpma testlerinde değerlerin değişimini grafiklendirmişlerdir (şekil 2.42).

Benzer şekilde içyapı değişimlerine ve ticari üretim firmalarının ticarileştirme şekillerine bağlı olarak farklı alaşım elementleri eklemeleri sonucunda aynı dinamik gerinme hızlarında bile farklı karakteristikteki eğrileri elde etmek mümkündür. Mukai ve ark. 2005 yılında yaptığı çalışmada YYK ve DTB numunelerindeki bu farkı şekil 2.12'deki eğrisi ile özetlemiştir. Bu çalışmadaki çarpma hızı yaklaşık olarak 10.000 mm/sn (30 km/saat)'dir.

Bu çalışmada benzetim ile aynı hızda elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında düzlem gerilme bölgelerinin aynı değerlerde seyrettiği görülmektedir. Şekil 4.84 incelendiğinde ortalama gerilme değeri 5 MPa altında seyrederken Mukai ve ark.'nın çalışmasında da bu değer 5 MPa bandındadır. Bu sayede iki çalışmanın birbirini desteklediği sonucu çıkmaktadır.

Mukai ve ark.'nın çalışmasına benzer olarak Zhihua'nın (2005) elde ettiği farklı hızlardaki eğrilerde de gerinme hızları arttıkça gerilme değerlerinin yükseldiği görülmektedir (şekil 2.20). Bu çalışmada da düzlem gerilme bandının 4 MPa ile 8 MPa bandında olduğuna dikkat çekilir ise sonuçların bu değerlerle de tutarlı olduğunu söylemek mümkündür.

Her iki çalışmada da elde edildiği gibi gerinme değerinin artışına karşılık gerilme değerinin neredeyse aynı kalması enerji sönmüleme mekanizmalarını harekete geçirmektedir. Miyoshi ve Itoh (1999) yaptıkları çalışmanın sonucu olarak bunu ortaya koymuşlardır.

Buradan hareket ile atalet kuvvetlerinin düşük oluşunun sistemin momentum seviyelerini de aşağılarda tutmasından dolayı bu düzlem gerilme değerlerinin mümkün olduğunca düşük olması isteneceği sonucu çıkartılabilir ve çarpma hızlarının artışına bağlı olarak elde edilen enerji sönmüleme oranlarındaki düşüşün sebebi olarak da bu sonuç öngörülebilir. Aynı zamanda ulaşılan maksimum gerilme değeri de yine çarpma hızıyla arttığı için kinetik enerjideki düzensizlikler de bu kapasitenin yararlı şekilde

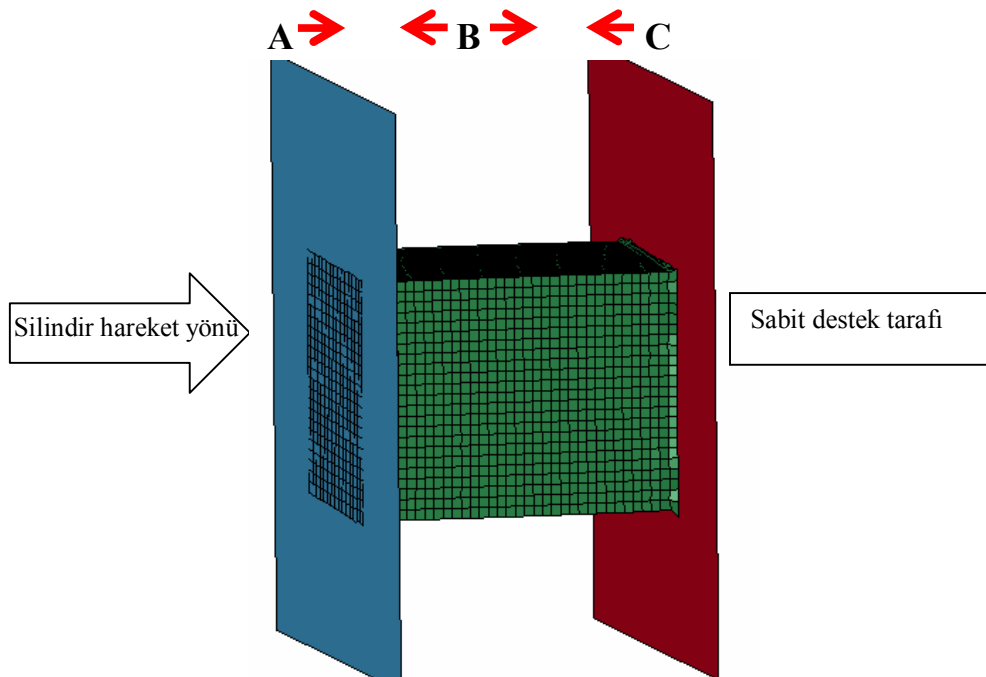
kullanılmasını engellemektedir. Yüksek hızlarda elde edilen eğriler bu sonuçlarla karşılaştırıldığında tamamen aynı prensibin elde edildiği açıkça görülmektedir. Bu karşılaştırmalar 4.5 bölümünde bulunabilir.

4.4. Çarpma Benzetimi Sonuçları ve Tartışma

Materyal ve yöntem bölümünde belirtilen malzeme tanımları ile ilgili analizleri sırası ile 400 mm/sn, 800mm/sn, 1600mm/sn, 3200 mm/sn, 6400 mm/sn, 12800 mm/sn, 17500 mm/sn ve 25000 mm/sn çarpma hızları için tekrarlanmıştır. Bu hızların km/saat karşılıkları aşağıdaki çizelge 4.1’de görülmektedir.

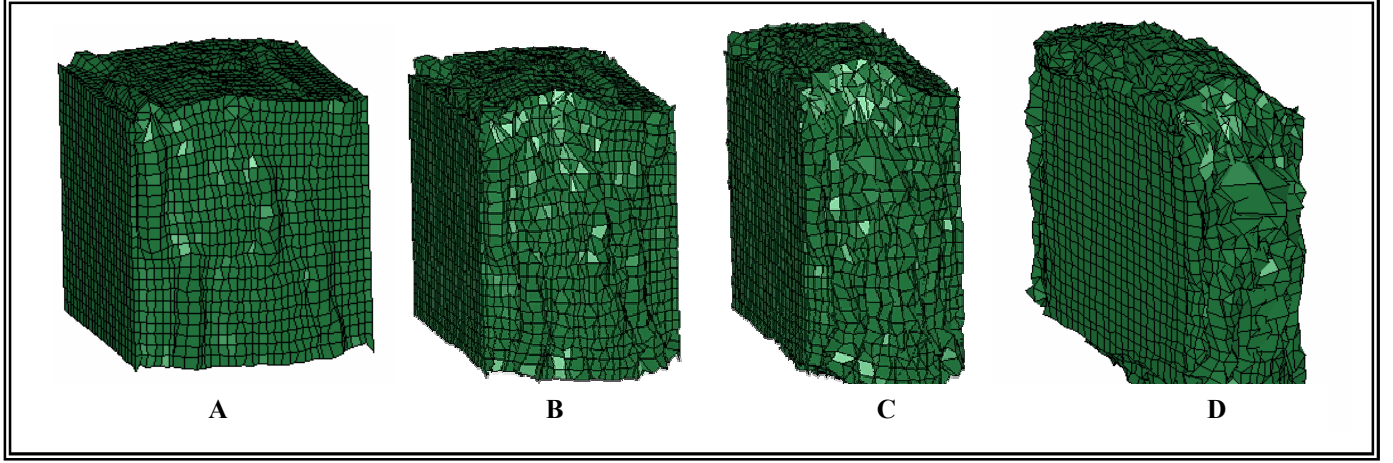
Çizelge 4.1. Çarpma hız değerleri

Çarpma hızı (mm/sn)	Çarpma hızı (km/saat)
400	1,44
800	2,88
1600	5,76
3200	11,52
6400	23,64
12800	46,08
17500	60
25000	90



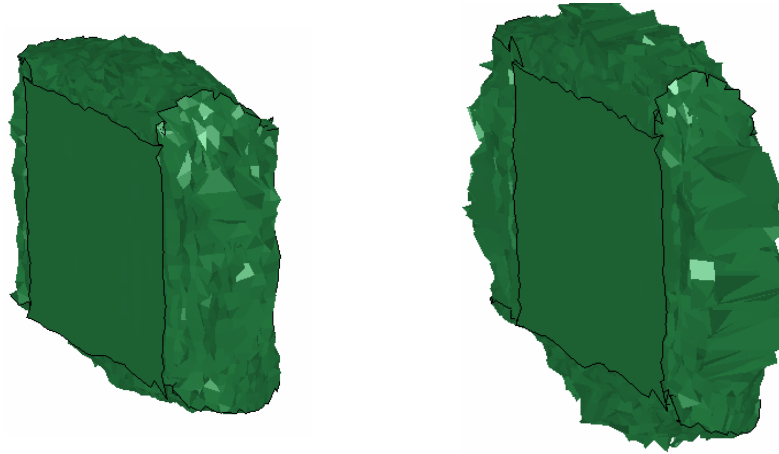
Şekil. 4.21. Analiz modelinde sonlu elemanlar modeli ve kontak çiftleri

Şekil.4.21’de görülen A sistemi ile B sistemi ve yine B sistemi ile C sistemi kontak algoritması ile ilişkilendirilmiştir. Çarpma işlemi sırasında deney numunesinin farklı aşamalara göre deforme olmuş halleri şekil. 4.22’de görülmektedir.



Şekil. 4.22. Farklı aşamalarda numune deformasyonları

Bu şekilde element görünümü haliyle, A aşamasında deformatsiyon yeni olarak başlamış, plastik olarak deformatsiyonlar ilk safhasındadır. B ve C aşmaları akma bölgesi ile düzlemsel gerilmenin yaşandığı ara geçiş bölgesindeki deformatsiyonları temsil etmektedir. D aşamasında ise artık yoğunlaşma tamamlanmış ve silindir hızı sifira yaklaşmıştır. Bu aşamalarla ilgili olarak detaylı gerilme ve deformatsiyon dağılımları 4.4.1 ile 4.4.8 bölümleri arasında detaylı şekilde verilmiştir.



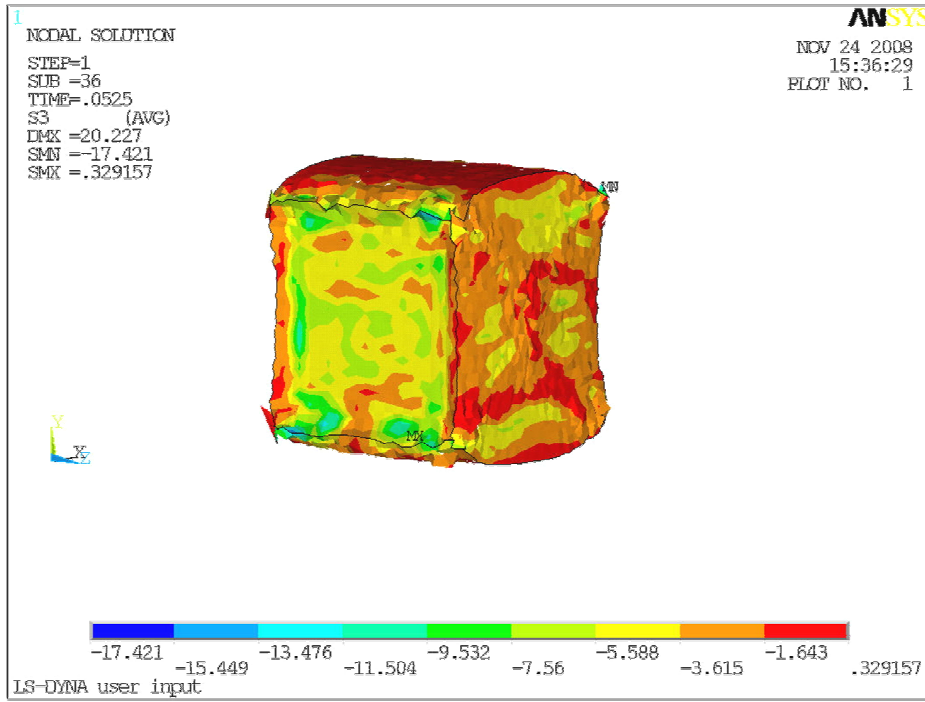
Şekil. 4.23. Deforme olmuş katı model görünümü

Şekil 4.23.’de yoğunlaşma bölgesinin ötesinde katı modelin deformatsiyon hali görülmektedir.

4.4.1. 400 mm/sn (1,44 km/saat) için benzetim sonuçları

400 mm/sn' lik hız ile yapılan çarpma benzetiminin farklı deformasyon değerleri için gerilme ve deformasyon dağılımları görülmektedir.

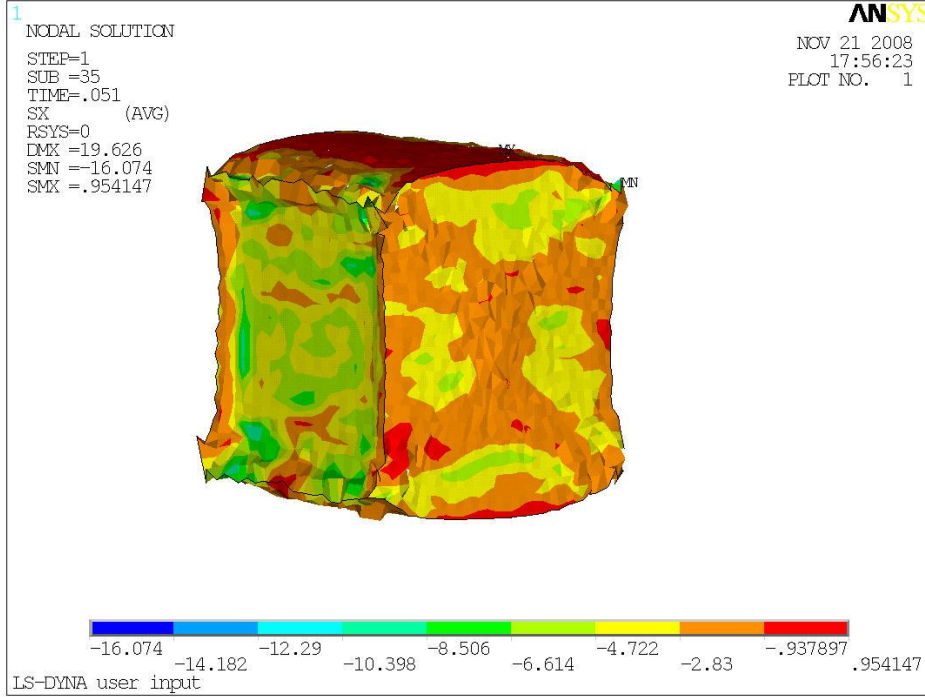
4.4.1.1. 400 mm/sn için Gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri



Şekil 4.24. ~20 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

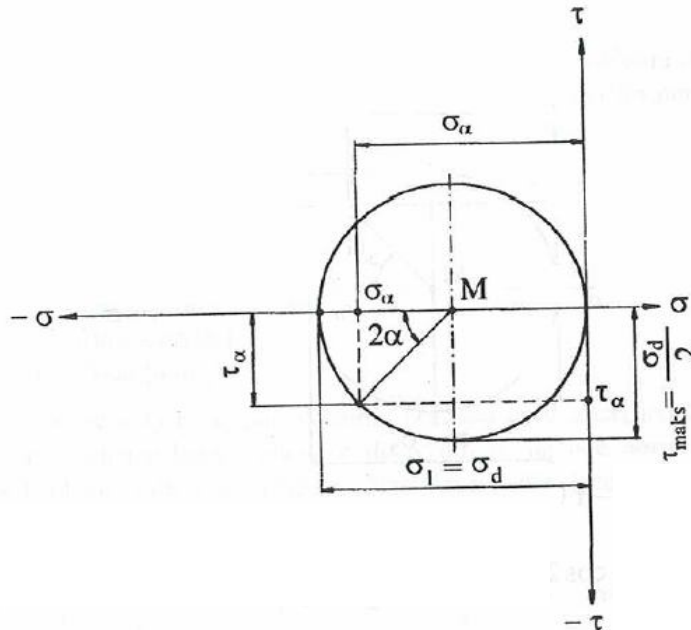
Şekil 4.24'de ~ 20 mm deformasyon değeri için S3 (minimum asal gerilme değeri) gerilme dağılımı görülmektedir. Bu değer 17,421 MPa olup, şekil 4.25'de görülen basma yönü olan X yönündeki gerilme değerine yakındır. Bu değerlerin birbirine yakın olması gerilme kriterleri ile ilgilidir.

Bası gerilmesi durumunda kesitte kayma gerilmesi olmaması veya ihmal edilebilir durumda olması sebebi ile ilgili yöndeki gerilme asal gerilmeyi vermektedir. Buradaki Asal gerilmeler genelde kayma gerilmelerinin sıfır olduğu kesitteki gerilmelerdir (Bakioğlu ve arkadaşları 2001).



Şekil 4.25. ~20 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı

Genel olarak tek eksenli gerilme durumunda asal gerilmeler, bası ve çeki gerilmesi durumlarına göre maksimum asal gerilme veya minimum asal gerilme olacak şekilde, ilgili yöndeki gerilmelere eşit olacaklardır. Bu durum kayma gerilmeleri devreye girene kadar sürecek ve sonrasında aralarında kayma gerilmeleri ile orantılı olacak şekilde bir fark oluşacaktır.



Şekil 4.26. Bası gerilmesi için Mohr çemberi (Babalık 1997)

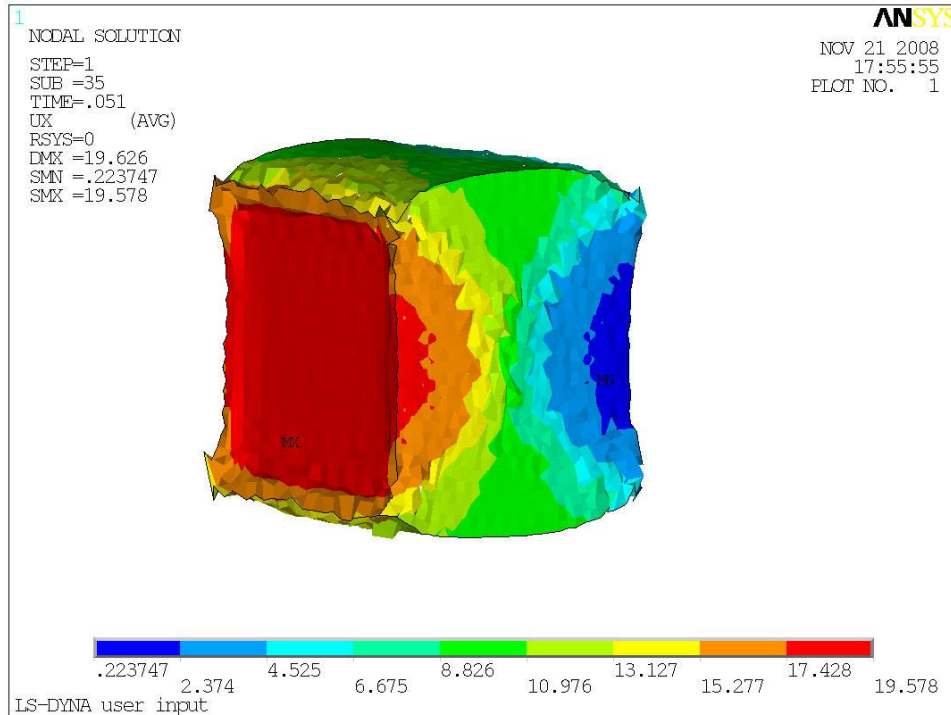
Şekil 4.26'da görüldüğü gibi tek eksenli gerilme durumunda nominal gerilme değeri en büyük haldedir. Bası gerilmeleri Mohr çemberi üzerinde '-' işareti ile gösterilirler. Bası gerilmesinin özel bir hali yüzey basıncıdır. Bir F kuvvetiyle birbirine bastırılan elemanların temas yüzeylerinde oluşan ve düzgün dağıldığı kabul edilen gerilmeye yüzey basıncı denir (Babalık 1997).

$$\text{Normal Gerilme: } \sigma_{\alpha} = \frac{F}{A} \cos^2 \alpha = \sigma_b \cdot \cos^2 \alpha \quad (4.15)$$

$$\text{Kayma Gerilmesi: } \tau_{\alpha} = \frac{F}{A} \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \sigma_b \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (4.16)$$

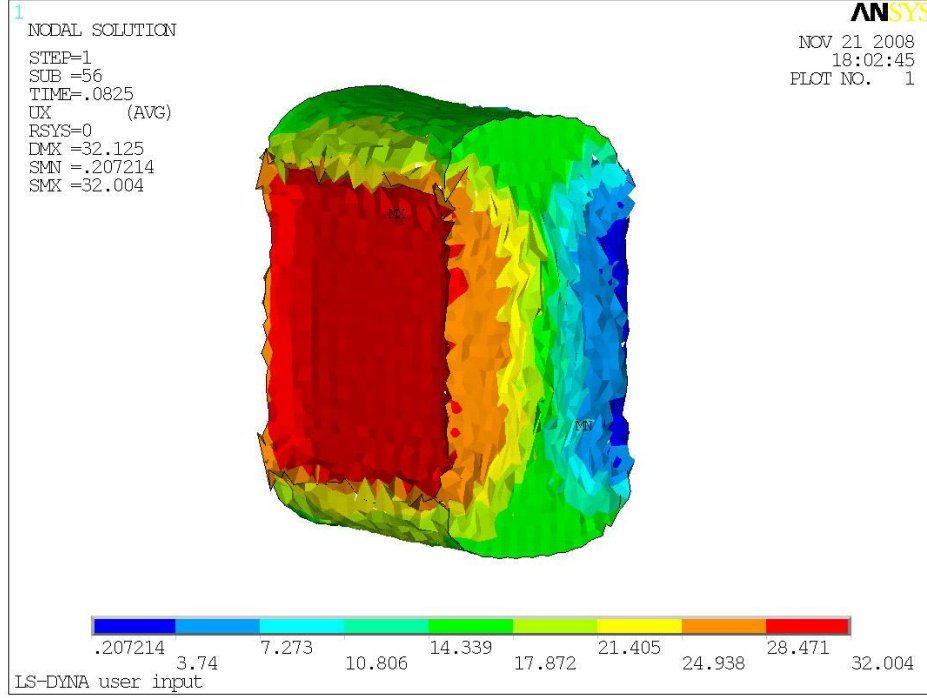
4.15 ve 4.16 eşitliklerinde normal gerilme ve kayma gerilmesi eşitlikleri bulunmaktadır.

Bu yüzey basıncı değeri tek eksenli bası veya çeki gerilmesi durumları için gerilme değeri olarak kullanılabilir. Dikkat edilmesi gereken konu ise ilgili mühendislik gerilmesinin gerçek gerilmeye çevrilmesidir.

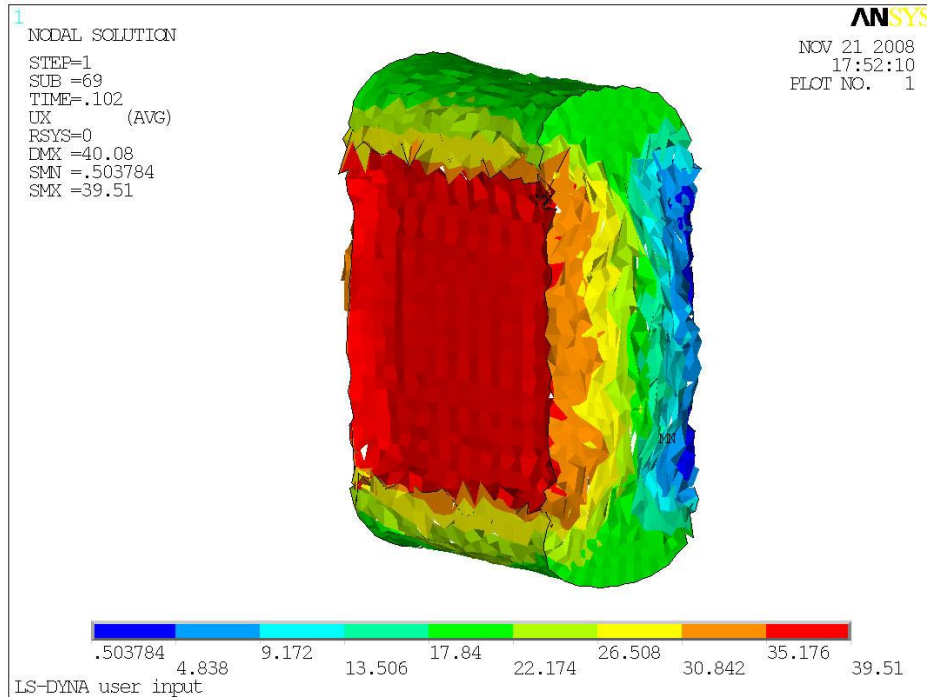


Şekil 4.27. 0,051. saniyedeki x yönündeki deformasyon

Şekil 4.27'de görüldüğü gibi tek eksenli olarak yapılan basma işlemi sonrasında numunenin yönel deformasyon dağılımı ekte görülmektedir. Deformasyon öncelikli olarak kırmızı bölgede görüldüğü gibi hareketli silindirin vurduğu taraftan başlamakta ve hiyerarşik olarak belirli bir oranda artmak kaydı ile bu kural bozulmamaktadır. Şekil 4.28 ve şekil 4.29'da ilgili deformasyon artışı kırmızıdan başlayarak mavi gösterime doğru takip edilebilir.



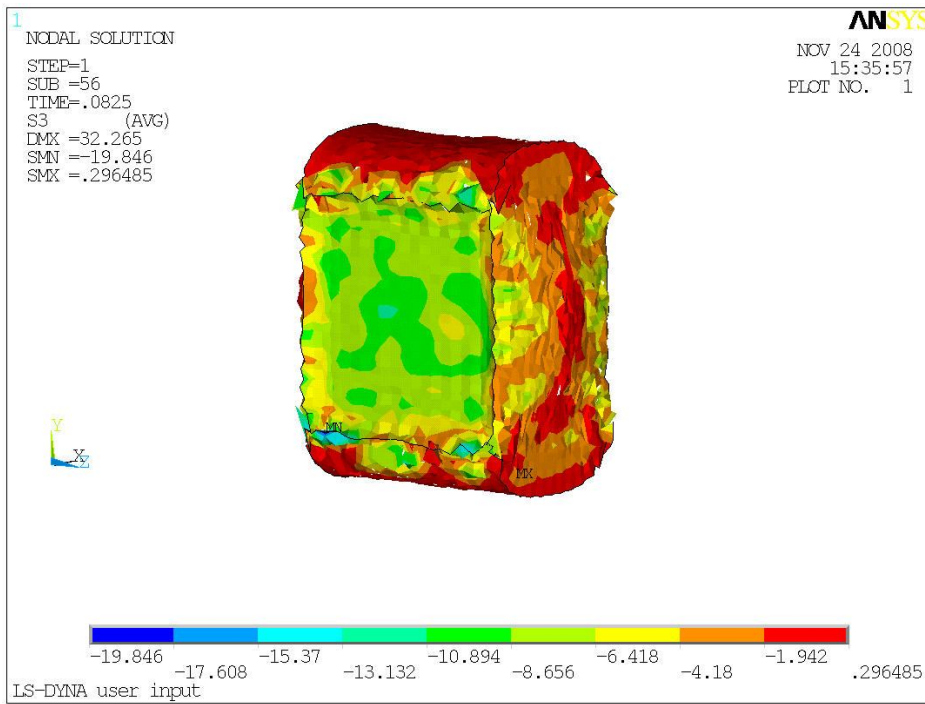
Şekil 4.28. ~0,0825. saniyedeki X yönündeki deformasyon



Şekil 4.29. ~0,1. saniyedeki X yönündeki deformasyon

McCullough ve ark. (1999) tarafından yapılan çalışmada da şekil 2.51 incelenir ise deformasyonun çarpmanın olduğu tarafta maksimum olduğu gözlemlenmektedir. Ancak gerinme dağılımı incelendiğinde bu deformasyonlarda orta bantta gerinme dağılımının beklendiği gibi yoğunlaştığı görülmektedir.

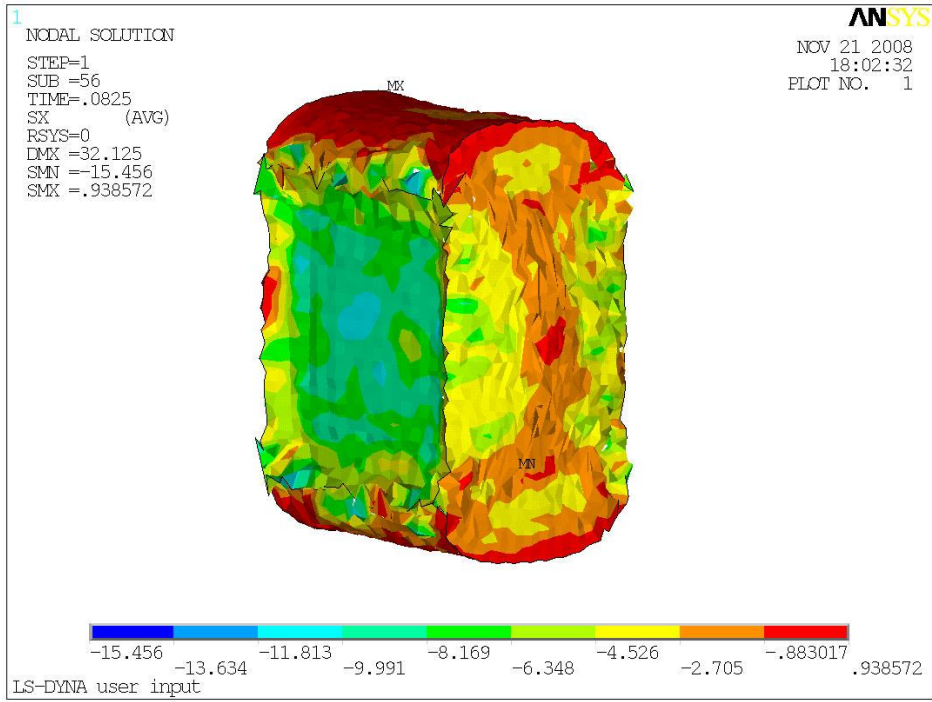
Zeguid ve ark.'nın (2002) elde ettiği basma testindeki şekil 2.61.'de görüldüğü gibi bölgesel deformasyonun orta noktada yoğunlaştığı görülmektedir.



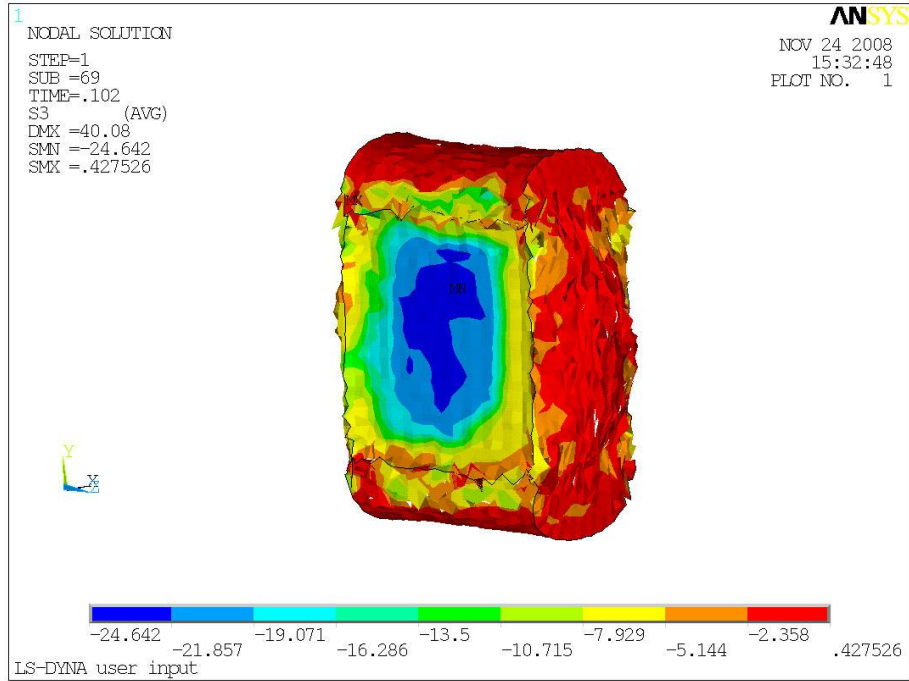
Şekil 4.30. ~ 32mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

Gerilme dağılımları açısından şekil 4.30, şekil 4.31, şekil 4.32 ve şekil 4.33'de görüldüğü gibi S3 gerilme dağılımı ile x yönündeki gerilme dağılımı değerleri kayma gerilmelerinden dolayı birbirinden farklılıklar göstermeye başlamıştır (Babalık 1997)

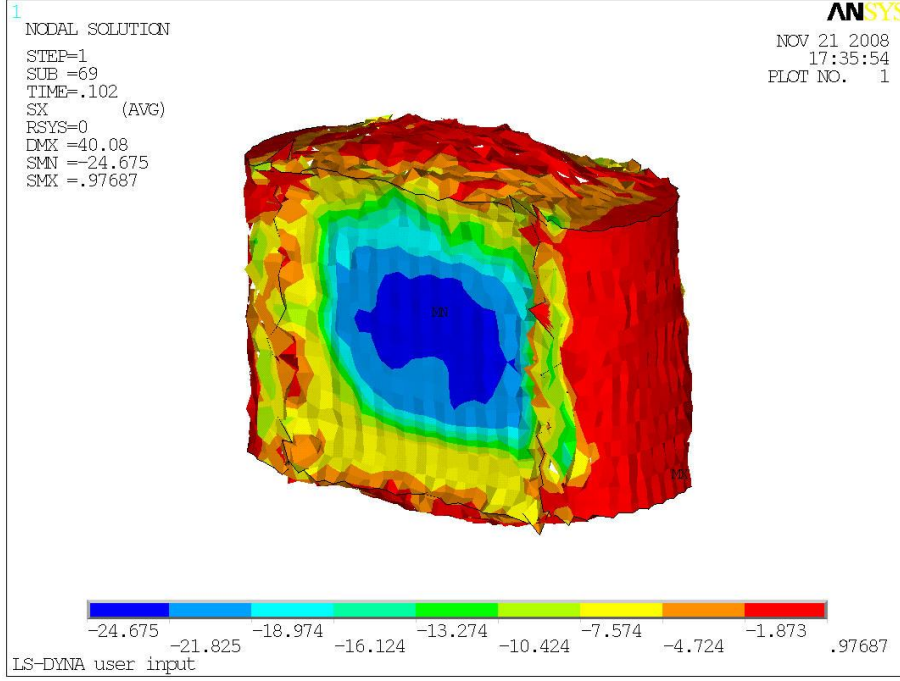
Şekil 4.31 ve şekil 4.32'deki orta bölgedeki deformasyonlar yine Zeguid ve ark.'nın elde ettikleri dağılıma oldukça benzerlerdir ve en yüksek gerilme ve dolayısı ile gerinme değeri de bu bölgelerde en yüksek değerini almaktadır.



Şekil 4.31. ~32 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı



Şekil 4.32. ~ 40mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

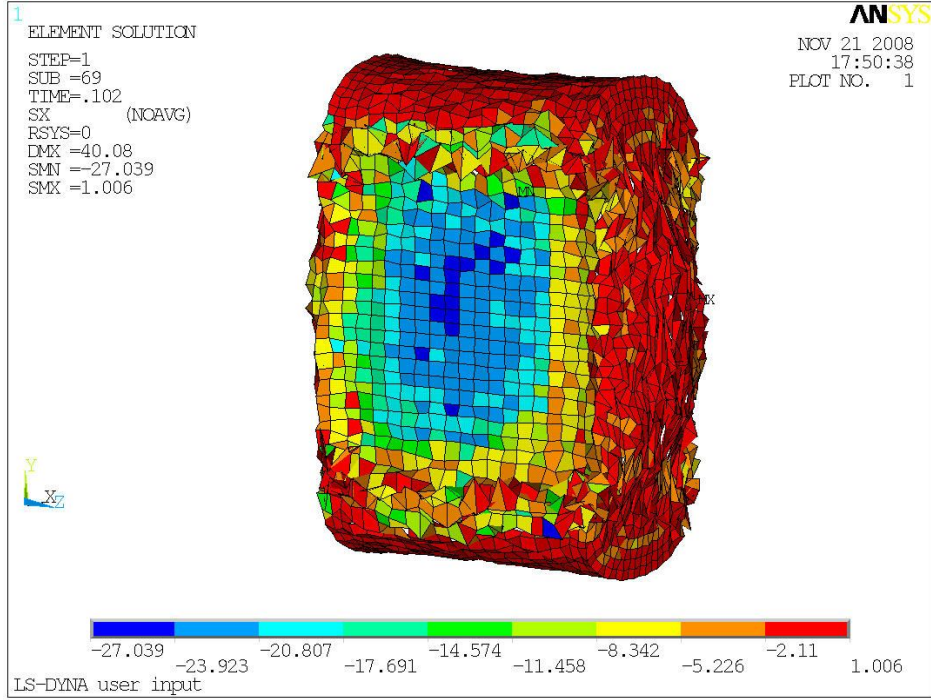


Şekil 4.33. ~ 40mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı

Şekil 4.34'de görülen element gösteriminden anlaşıldığı üzere çarpma yüzeyleri gerçek test yüzeylerine oldukça benzer, düz bir deformasyon görülmektedir. Yüzey bozulmaları bu yüzeylerden uzaklaştıkça artmaktadır. Bu değişim ise yine kayma gerilmeleri ve hücreler arası boşlukların kapanmasından kaynaklanmaktadır.

Sanders ve Gibson (2003) ince kesitlik mikro düzeydeki hücre duvarını parametrik olarak modellemişlerdir. Bu çalışmada hücre geometrisi monotonik olarak kopyalanarak çalışma elde edilmiştir.

Han ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada şekil 2.56.a'da bu hücrelerin arasındaki deformasyonları benzetim yöntemi ile yaptıkları çalışmada elde etmişlerdir.



Şekil 4.34. ~ 40mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı (element gösterimi)

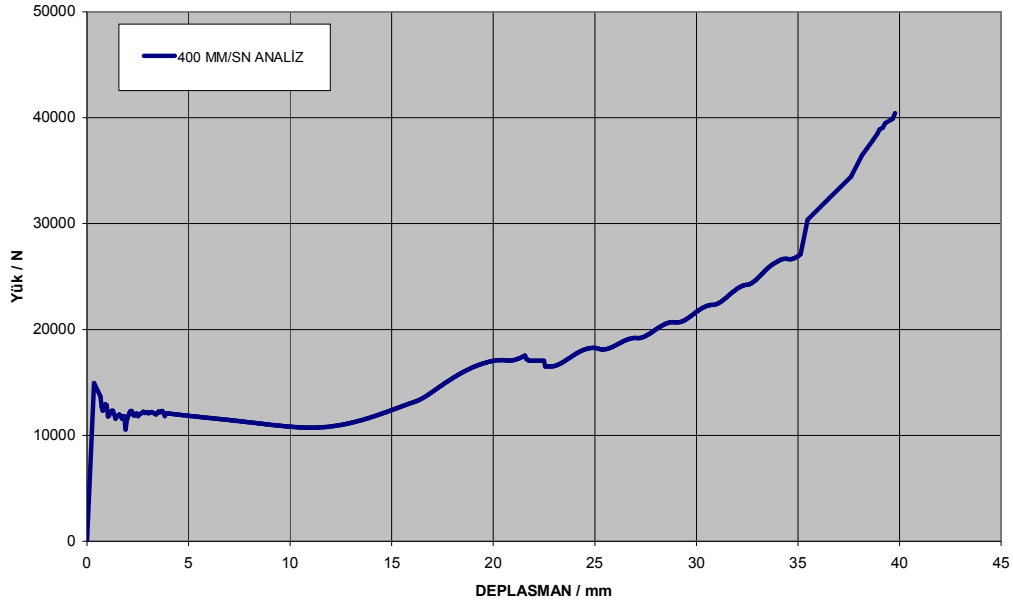
4.4.1.2. 400 mm/sn için yük-deplasman eğrileri

Şekil 4.35’de görüldüğü gibi 400 mm/sn için yapılan çarpma benzetimi sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrisi üzerinde düzlemsel gerilme bölgesi, yoğunlaşma noktasının başladığı aralık gözlemlenebilmektedir. Bu davranış karakteristiği köpük metallerin avantajını ortaya koymaktadır. Fuganti ve ark. (2000) yaptıkları çalışmada benzer bir düzlem gerilme bölgesi elde etmişlerdir.

Şekil 2.16 da görüldüğü gibi Fraunhofer enstitüsü tarafından yapılan basma testleri neticesinde de ilgili düzlem gerilme bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi tespit edilmiştir.

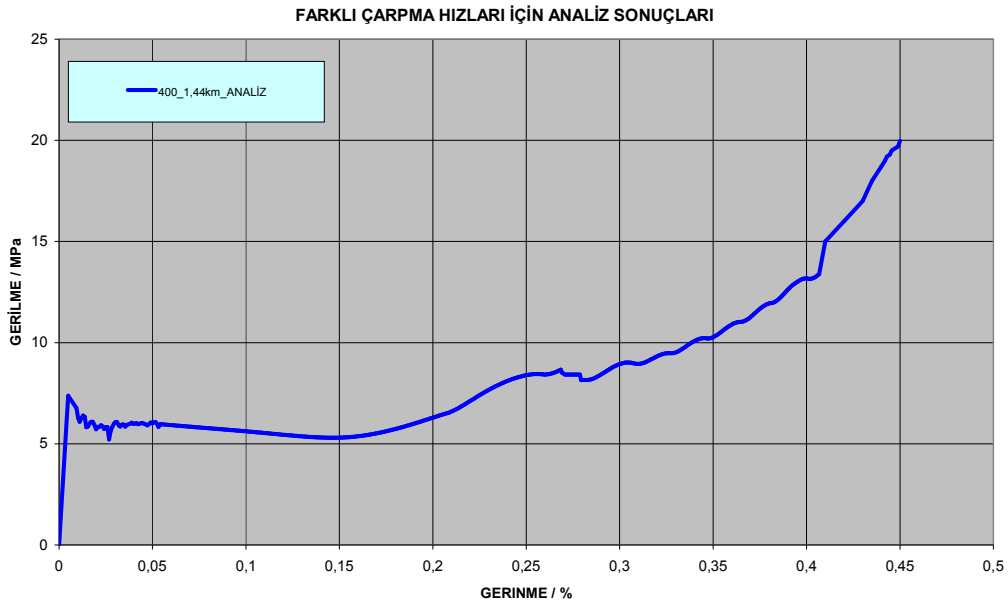
Şekil 4.36’de görülen gerilme-gerinme eğrileri 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak gerçek gerilme-gerinme eğrilerine çevrilmişlerdir.

ANALİZ (400 mm/sn) YÜK DEPLASMAN EĞRİLERİ



Şekil 4.35. 400 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri

4.4.1.3. 400 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri

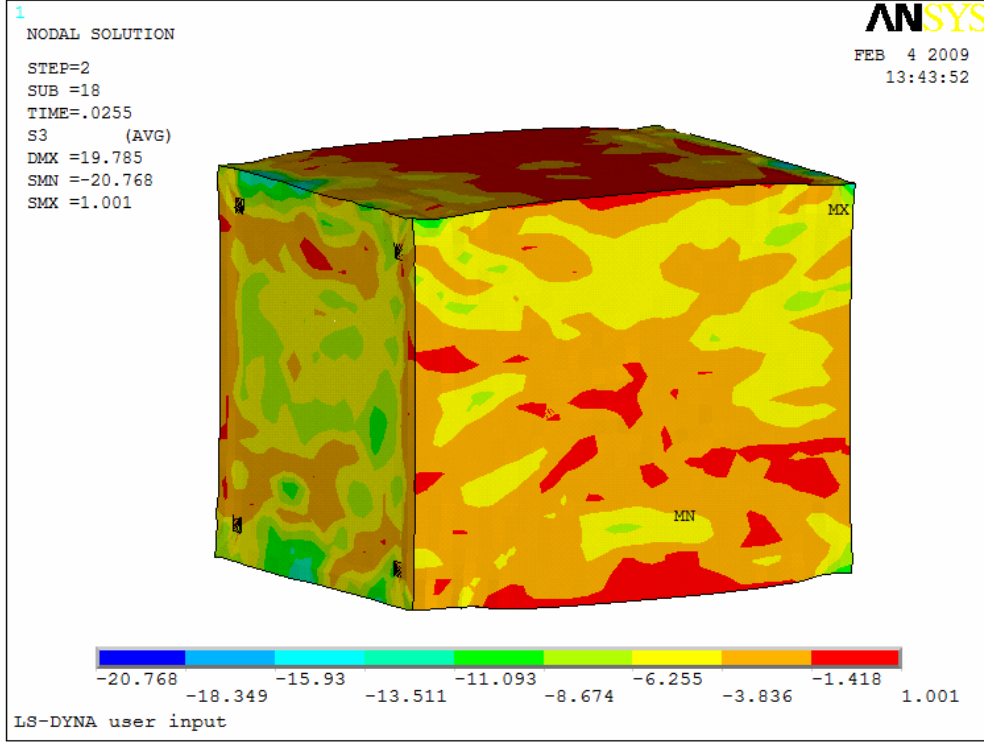


Şekil 4.36. 400 mm/sn için Analiz gerilme-gerinme eğrileri

4.4.2. 800 mm/sn-(2,88km/saat) için benzetim sonuçları

800 mm/sn' lik hız ile yapılan çarpma benzetiminin farklı deformasyon değerleri için gerilme ve deformasyon dağılımları görülmektedir.

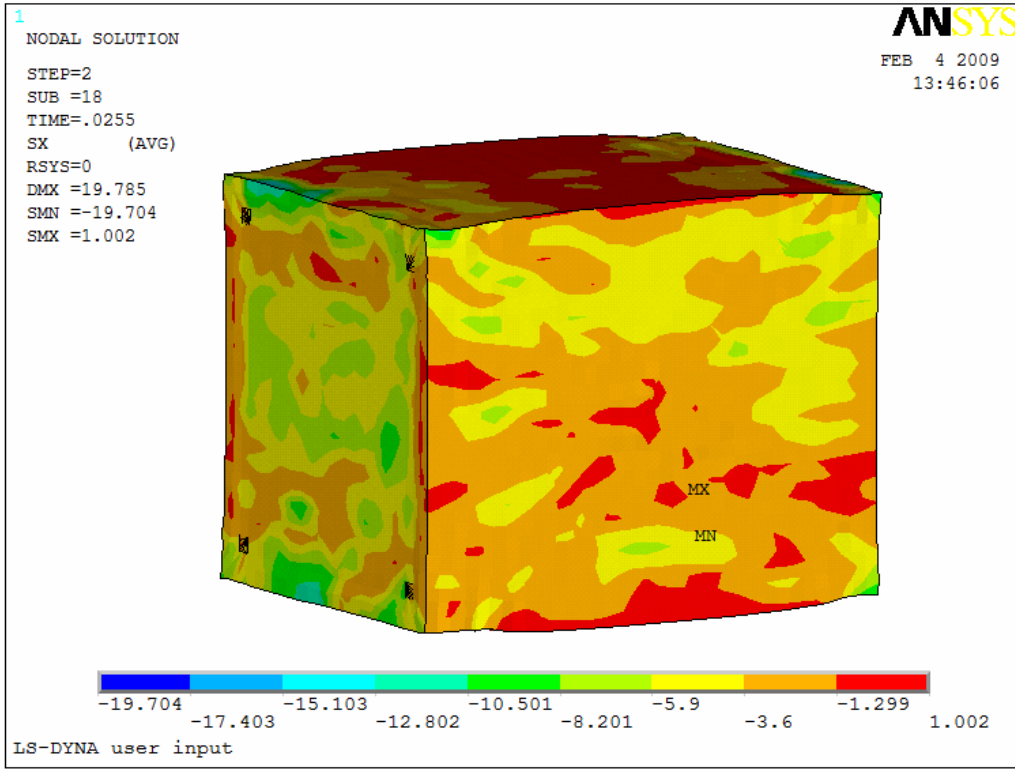
4.4.2.1. 800 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri



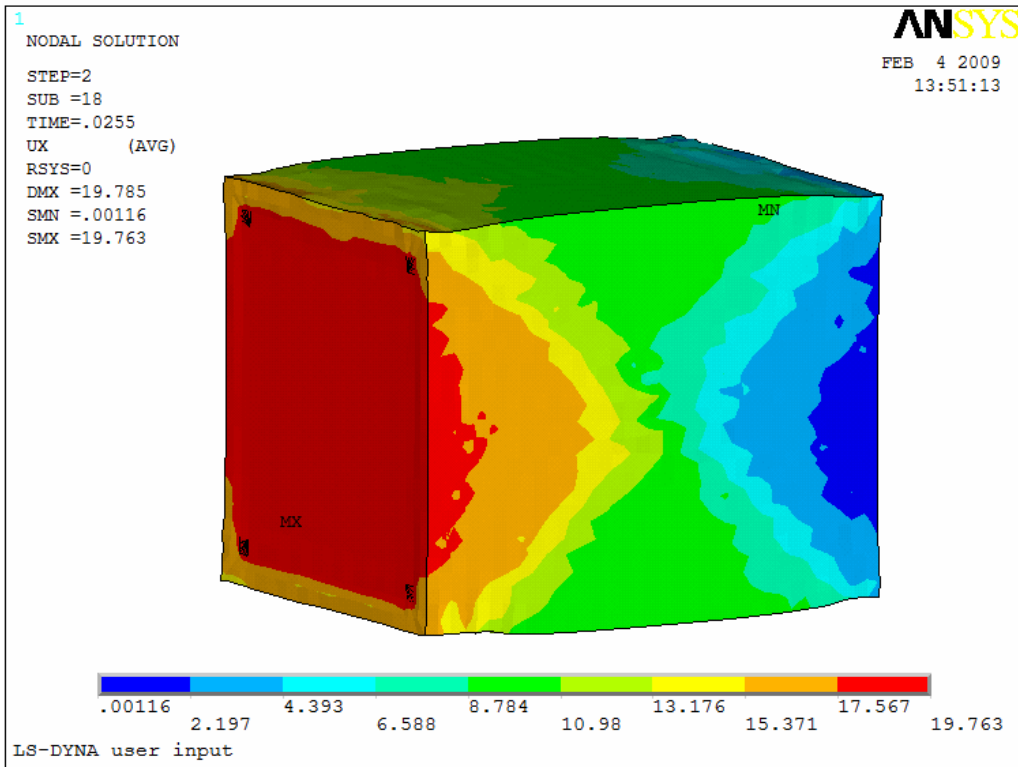
Şekil 4.37. ~20 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

Şekil 4.37'de ~ 20 mm deformasyon değeri için S3 (minimum asal gerilme değeri) gerilme dağılımı görülmektedir. Bu değer 20,768 MPa olup, şekil 4.38'de görülen basma yönü olan X yönündeki gerilme değerine yakındır. Bu değerlerin birbirine yakın olması gerilme kriterlerinden kaynaklanmaktadır (Bakioğlu ve ark. 2001).

Genel olarak önceki bölümlerde açıklandığı üzere belirli bir gerilme değerine kadar aynı olmaktadır. Bu durumda kayma gerilmelerinden kaynaklanan fark % 10 mertebelerindedir.

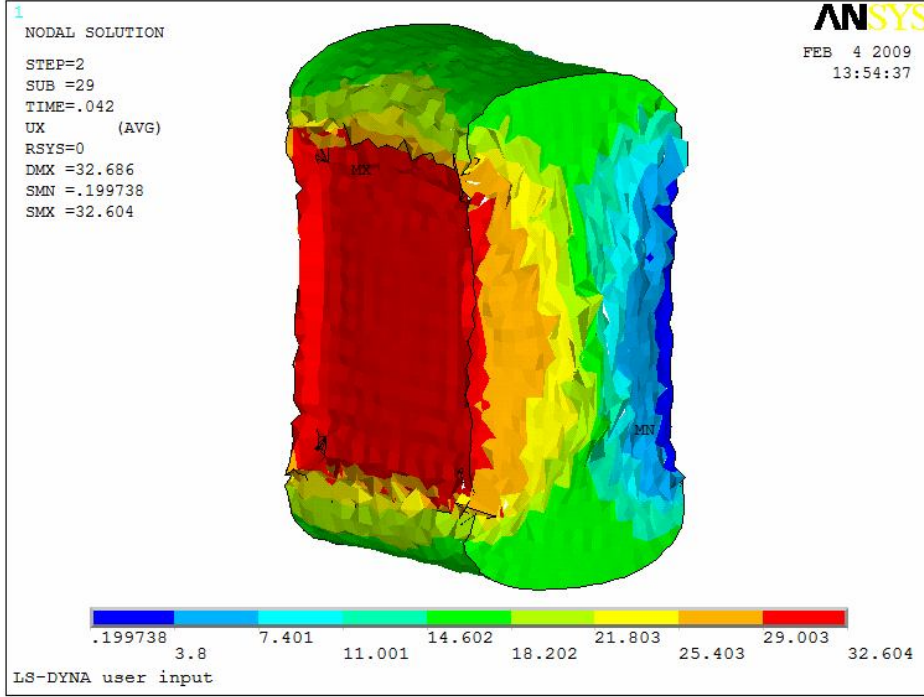


Şekil 4.38. ~20 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı

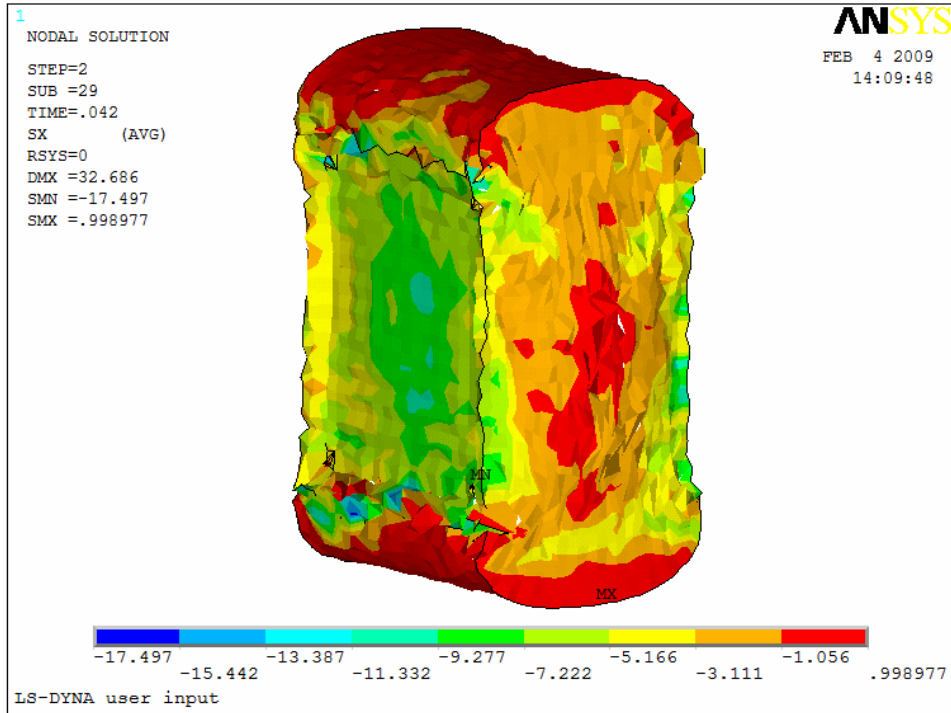


Şekil 4.39. 0.0255. saniyedeki x yönündeki deformasyon

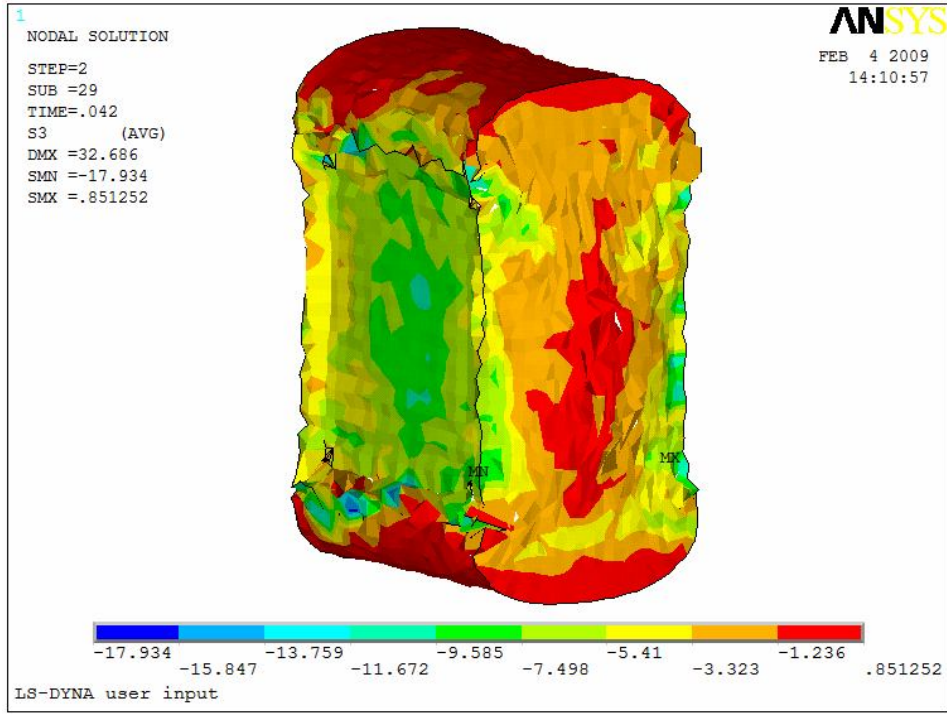
Şekil 4.39’da görülen deformasyon 4.27’deki hız ile karşılaştırıldığında çarpma hızı iki katına çıktığı için yarıya düşmüştür. Şekil 4.40’da ise Çarpma sırasındaki deformasyon aşamalarında orta bölgeleri temsil eden yaklaşık 32 mm’lik deformasyon görülmektedir. Yine aynı andaki X yönündeki gerilme dağılımı şekil 4.41’de görülmektedir.



Şekil 4.40. 0,042. saniyedeki x yönündeki deformasyon

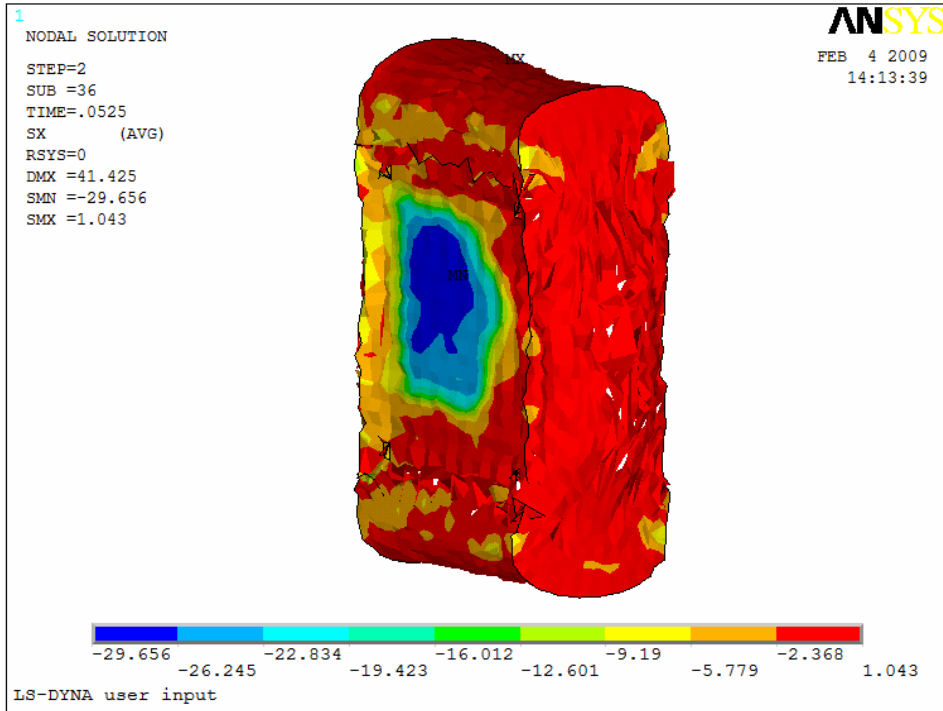


Şekil 4.41. ~32 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı

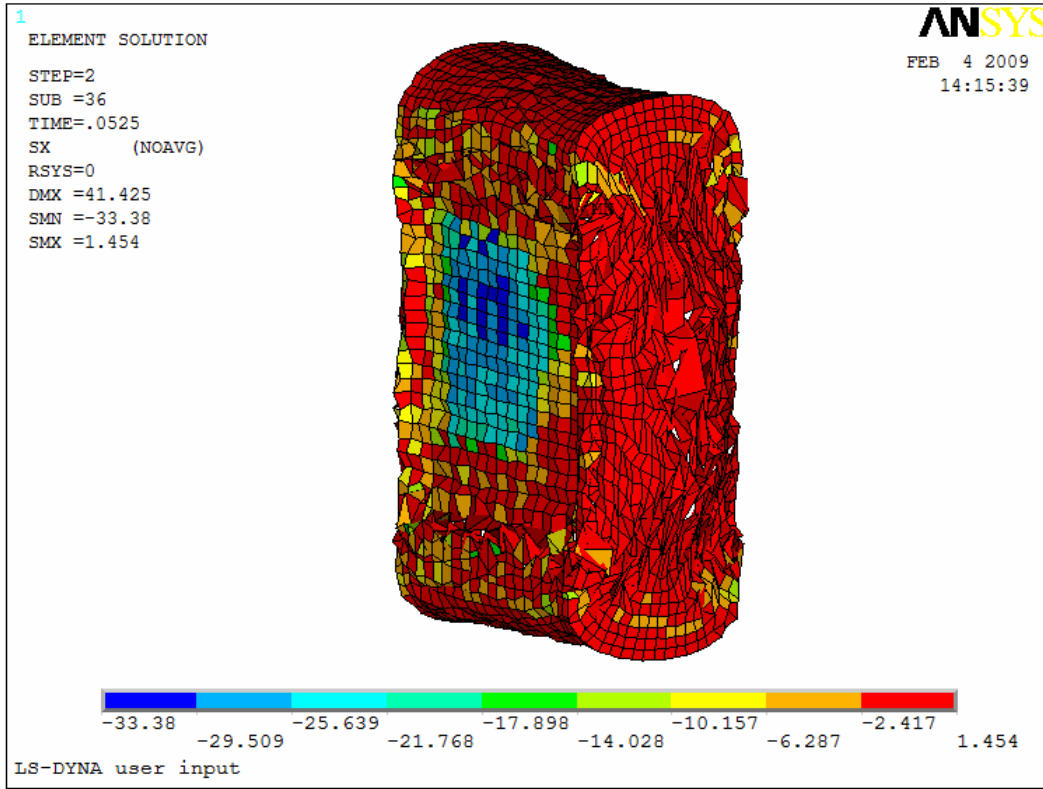


Şekil 4.42. ~ 32mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

Şekil 4.41 ve şekli 4.42'deki değer karşılaştırıldığında Asal gerilme değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.43. ~ 40mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı

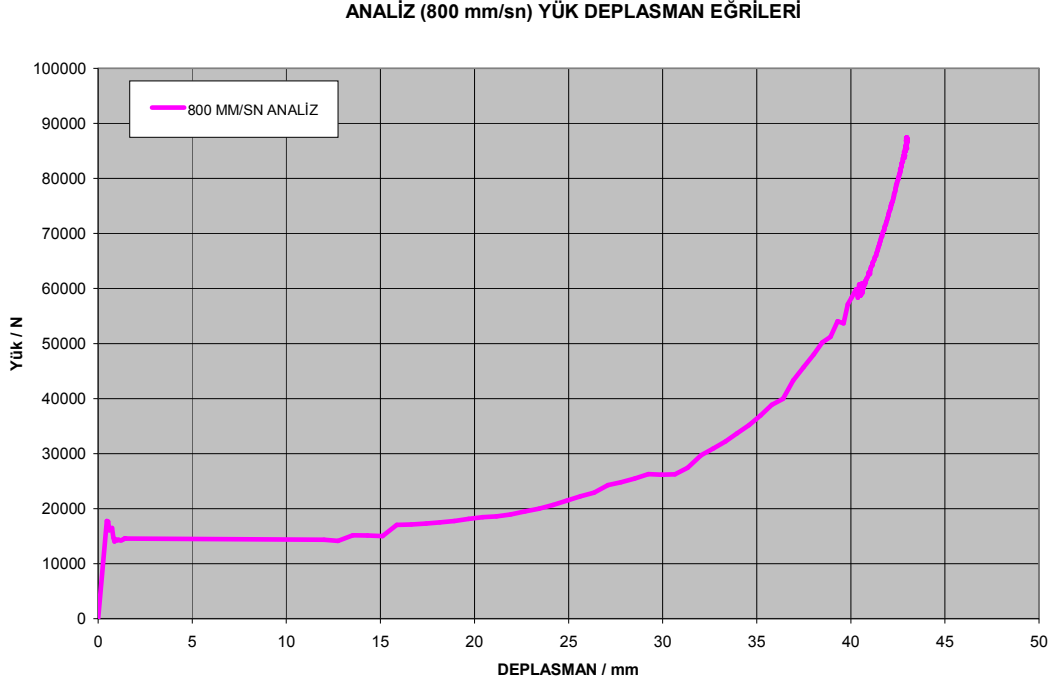


Şekil 4.44. ~ 40mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı (element gösterimi)

Çarpma sırasında deformasyon aşamasının sonlarına doğru element şekilleri bozulmaktadır. Ancak elde edilen sonuçlar eksplisit teori kullanıldığı için güvenilir değerler vermektedir. Basma benzetimi yapıldığı için şekil 4.44'deki dağılımda '-' yönündeki değerler anlam teşkil etmektedir. Skala üzerinde basmaya maruz kalan yüzlerdeki gerilme dağılımını ifade etmektedir.

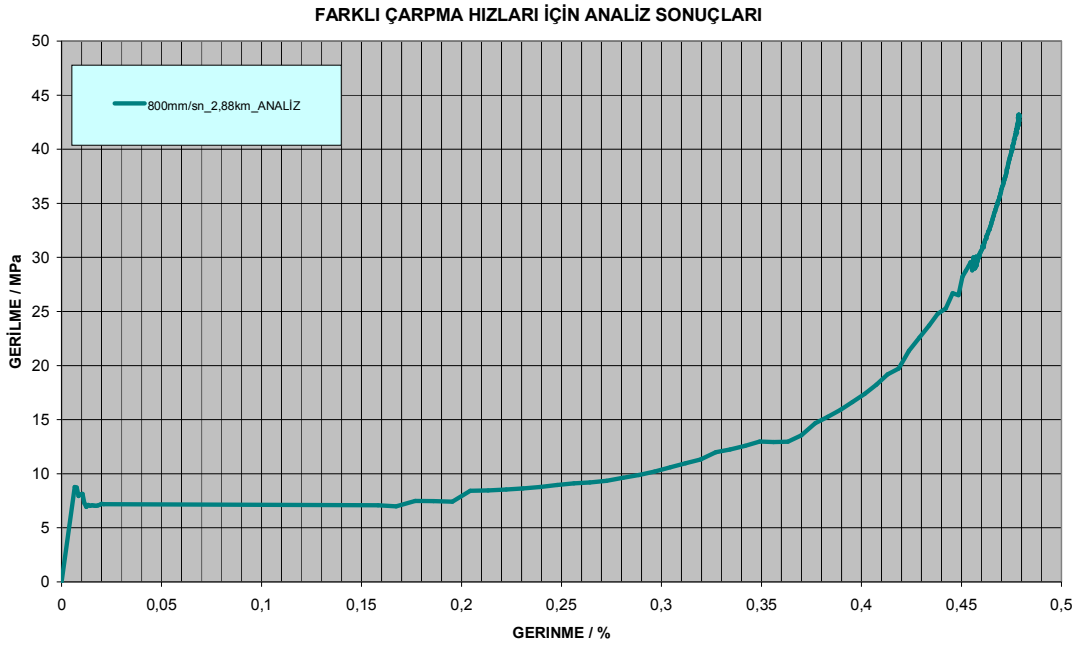
4.4.2.2. 800 mm/sn için yük deplasman eğrileri

Şekil 4.45 ve şekil 4.46’da görülen gerilme-gerinme eğrileri 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak gerçek gerilme-gerinme eğrilerine çevrilmişlerdir.



Şekil 4.45. 800 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri

4.4.2.3. 800 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri

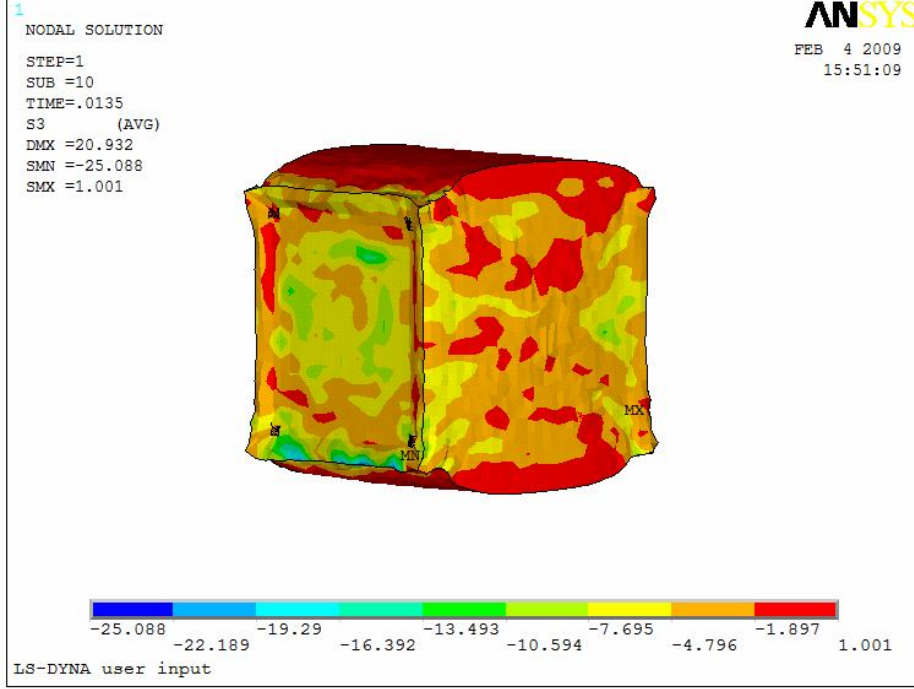


Şekil 4.46. 800 mm/sn için Analiz gerilme-gerinme eğrileri

4.4.3. 1600 mm/sn-(5,76km/saat) için benzetim sonuçları

1600 mm/sn' lik hız ile yapılan çarpma benzetiminin farklı deformasyon değerleri için gerilme ve deformasyon dağılımları görülmektedir.

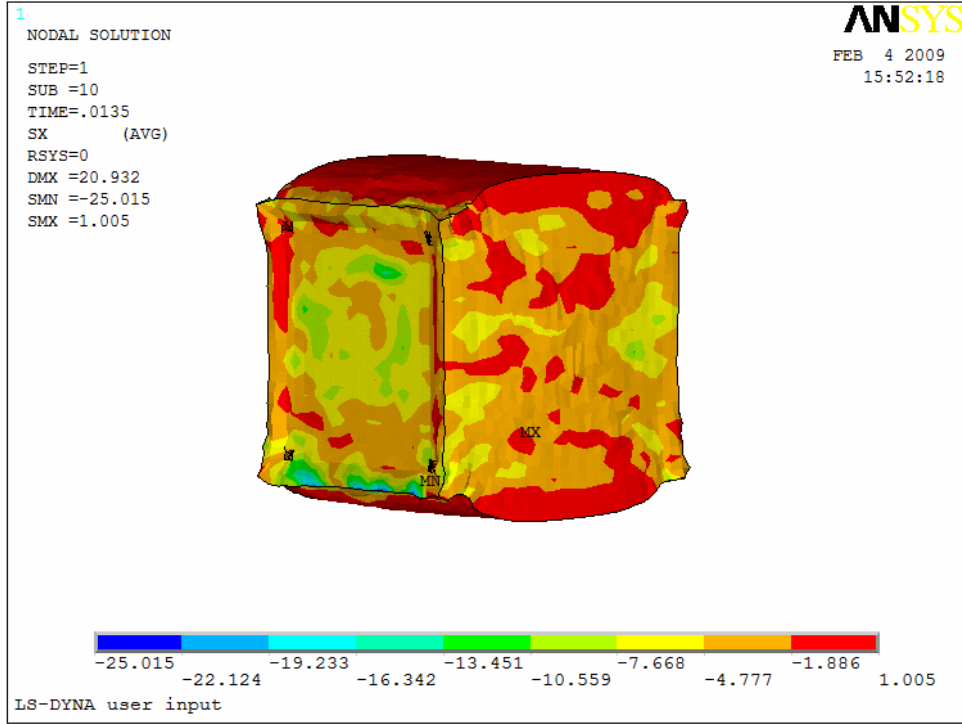
4.4.3.1. 1600 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri



Şekil 4.47. ~20 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

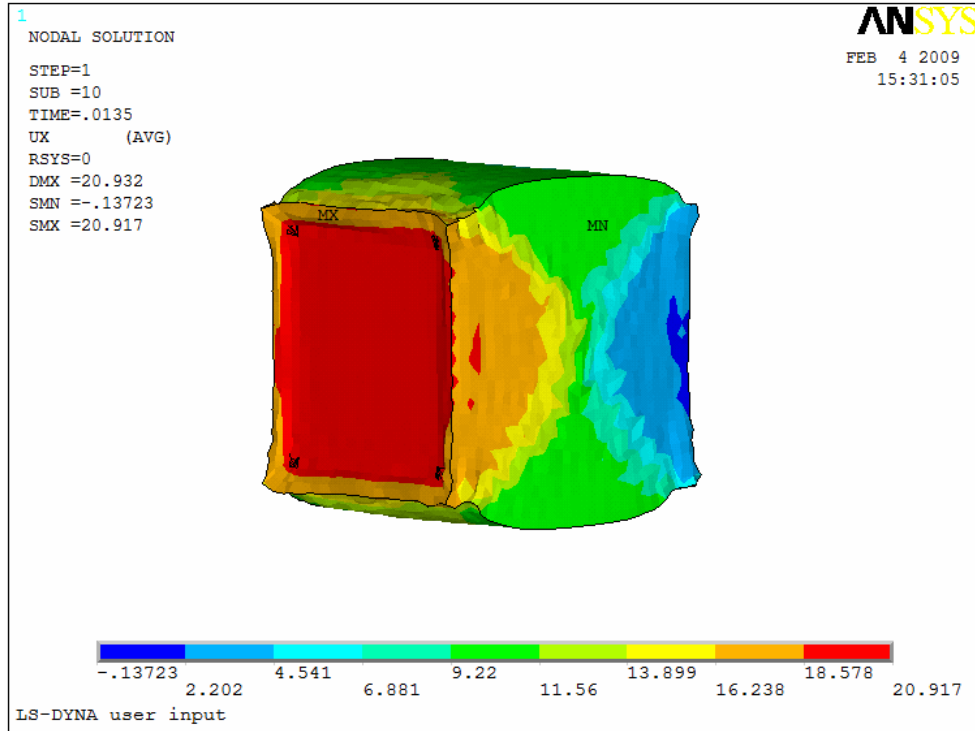
Şekil 4.47'de ~ 20 mm deformasyon değeri için S3 (minimum asal gerilme değeri) gerilme dağılımı görülmektedir. Bu değer 25,088 MPa olup, şekil 4.48'de görülen basma yönü olan X yönündeki gerilme değeri ile oldukça benzerdir.

Öchsner ve Lamprecht (2003) yapmış oldukları çalışmada akma başladığındaki gerilme değeri olarak 15 MPa, 25 MPa bandını tespit etmişlerdir. Çarpma hızı arttıkça anlık pekleşmeden dolayı bu değerler bir miktar değişmektedir. Çarpma hızı da yükseklikte düzlemsel gerilme bölgesi yatay olarak üst değerlerde seyretmektedir. Ancak bu mekanizmadan dolayı enerjinin sönmülenebilme kabiliyetinde gözle görülür bir azalma meydana gelmektedir.

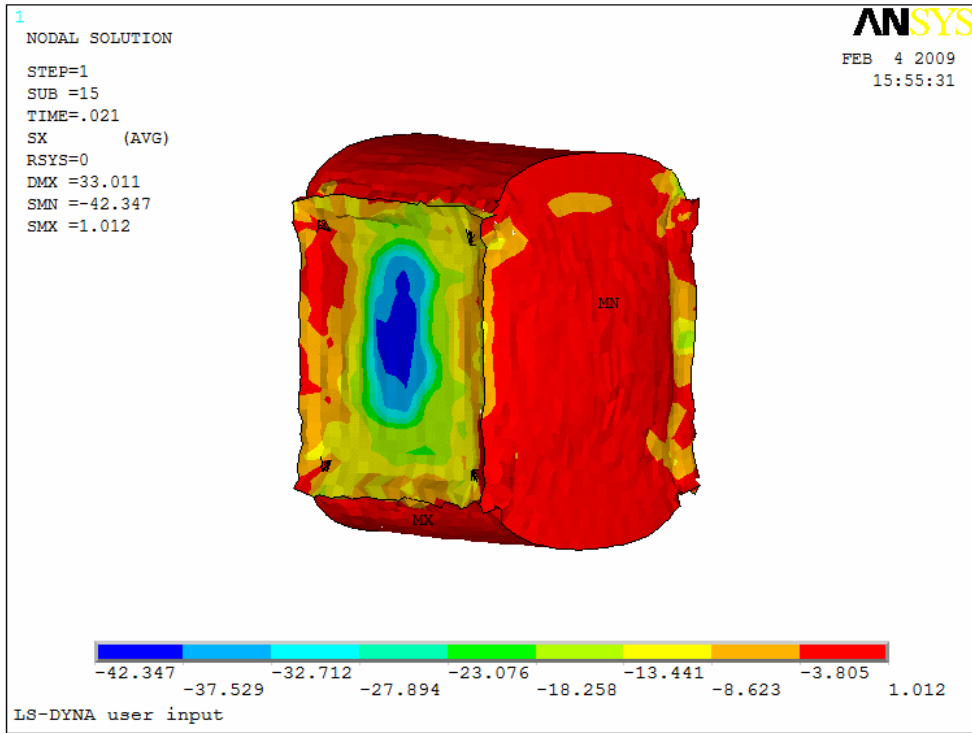


Şekil 4.48. ~20 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı

Şekil 4.49'da 0,0135. saniyedeki basma yönündeki deformasyon dağılımı görülmektedir. Deformasyon seviyelerinin başlarında olduğu için genel olarak şekil değiştirmeler simetrik seyretmektedir.

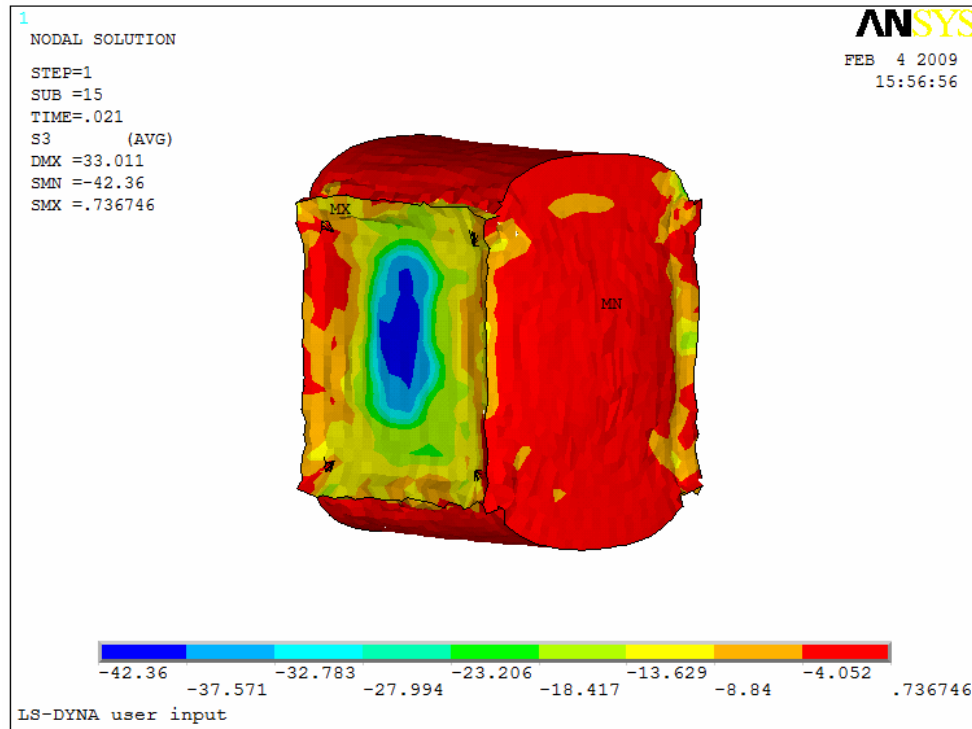


Şekil 4.49. 0.0135. saniyedeki x yönündeki deformasyon



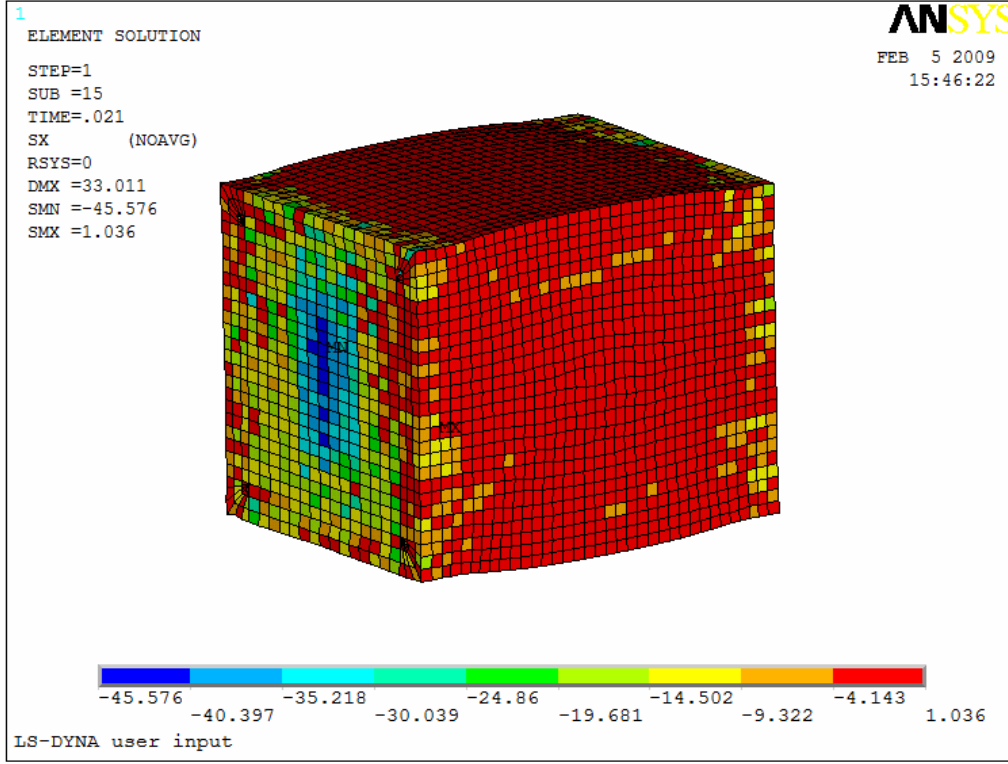
Şekil 4.50. ~33 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı

Şekil 4.50 ve şekil 4.51’de ‘-’ işaret ile elde edilen 42,347MPa’lık maksimum bası gerilmesi orta eksen etrafında yoğunlaşmaktadır. Bunu da orta bölgelerdeki kafes yapı etrafındaki yüzey basınçları bası karakterini zorladığı için kenar yüzeylerde daha çok nötr gerilme olduğu şeklinde yorumlayabiliriz.

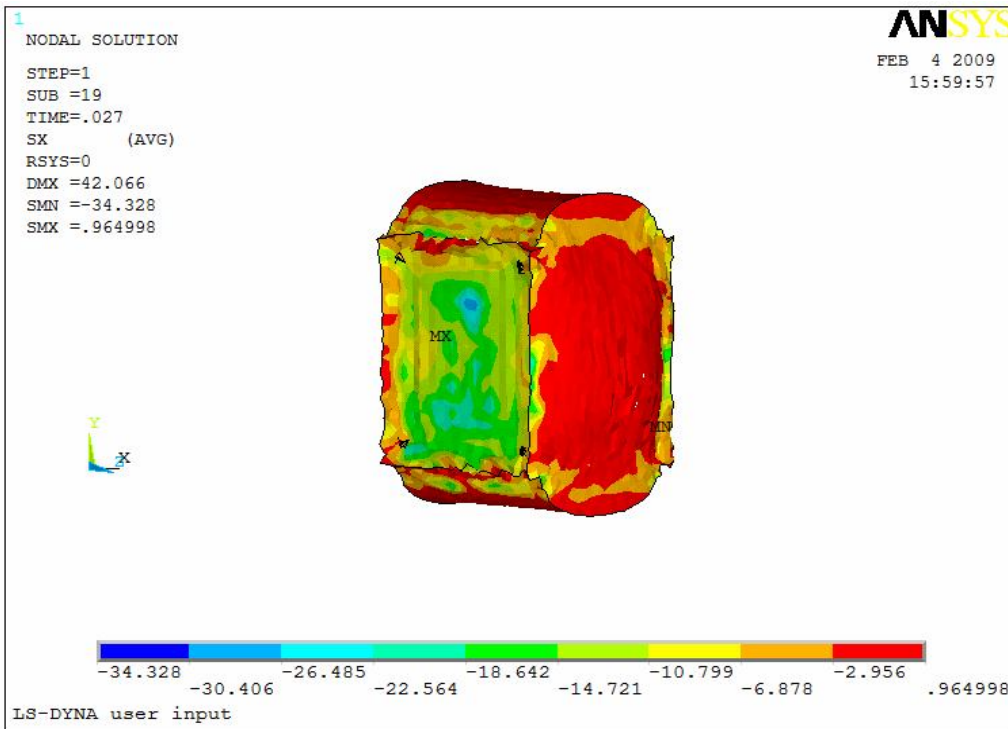


Şekil 4.51. ~ 33mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

Şekil 4.50 ve şekil 4.52 karşılaştırıldığında nodal çözüm ile element çözüm arasındaki farkın oldukça az olduğu görülmektedir. Buda elementlerin çözüm sırasında henüz az deforme olduğunu göstermektedir.

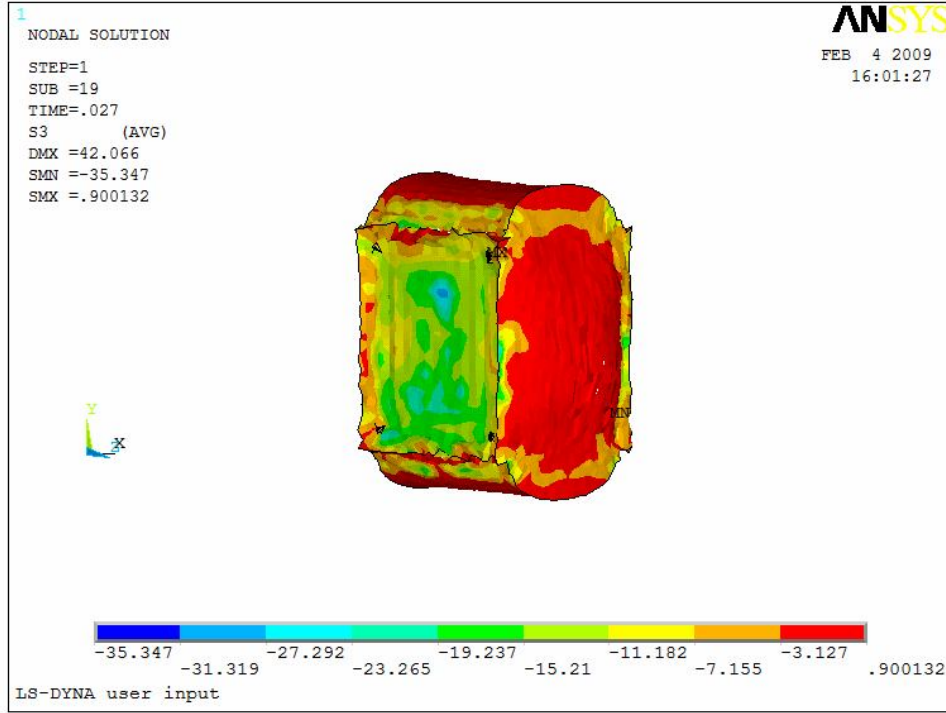


Şekil 4.52. ~ 33mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı(element gösterimi)



Şekil 4.53. ~42mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı

Şekil 4.53 ve şekil 4.54'de 42 mm.'lik deformasyon seviyesi için sırası ile basma yönündeki ve asal gerilme dağılımı görülmektedir.

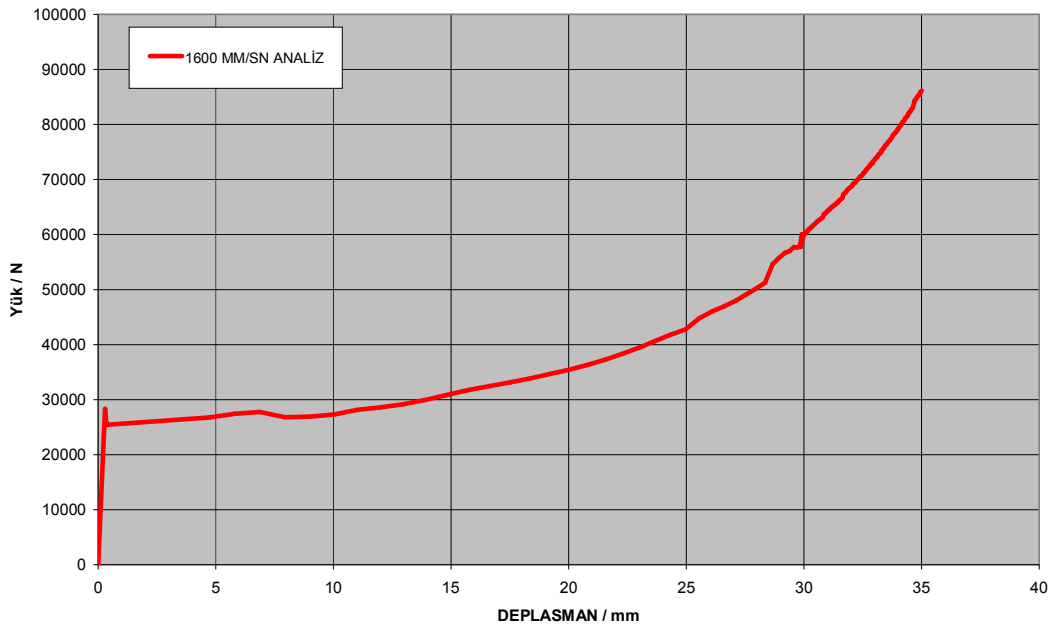


Şekil 4.54. ~ 42mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

4.4.3.2. 1600 mm/sn için yük deplasman eğrileri

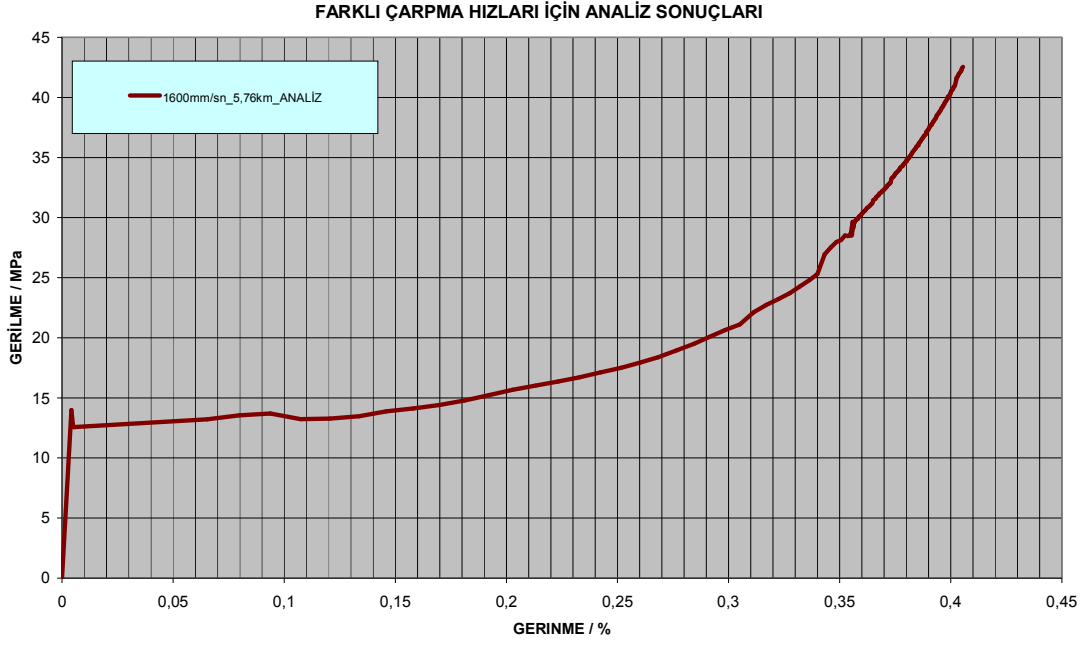
Şekil 4.56'da görülen yük deplasman eğrileri kullanılarak elde edilen şekil 4.57deki gerilme-gerinme eğrileri 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak gerçek gerilme-gerinme eğrilerine çevrilmişlerdir.

ANALİZ (1600 mm/sn) YÜK DEPLASMAN EĞRİLERİ



Şekil 4.55. 1600 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri

4.4.3.3. 1600 mm/sn için Gerilme-gerinme eğrileri



Şekil 4.56. 1600 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri

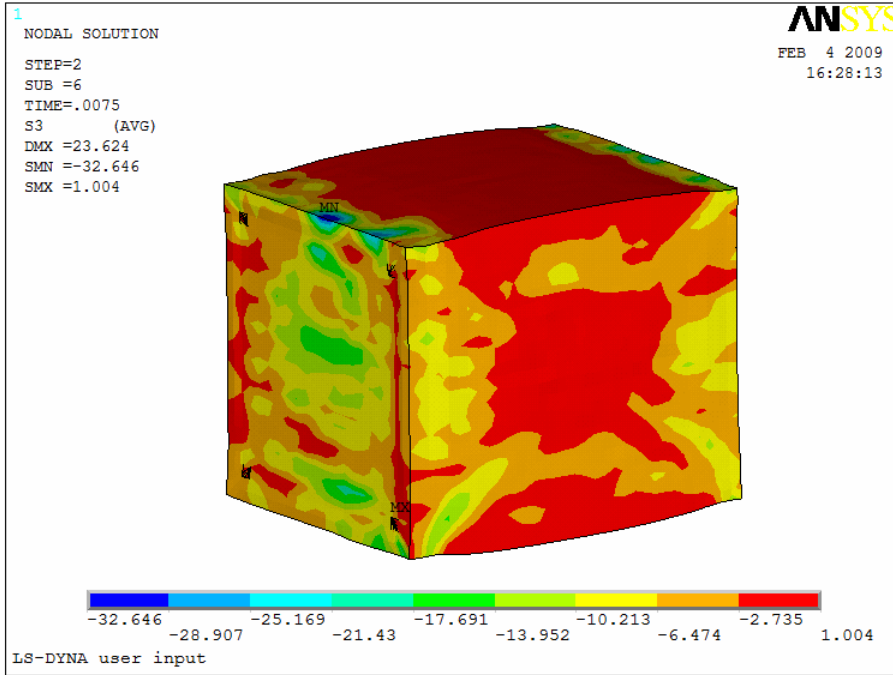
4.4.4. 3200 mm/sn-(11,52km/saat) için benzetim sonuçları

1600 mm/sn' lik hız ile yapılan çarpma benzetiminin farklı deformasyon değerleri için gerilme ve deformasyon dağılımları görülmektedir.

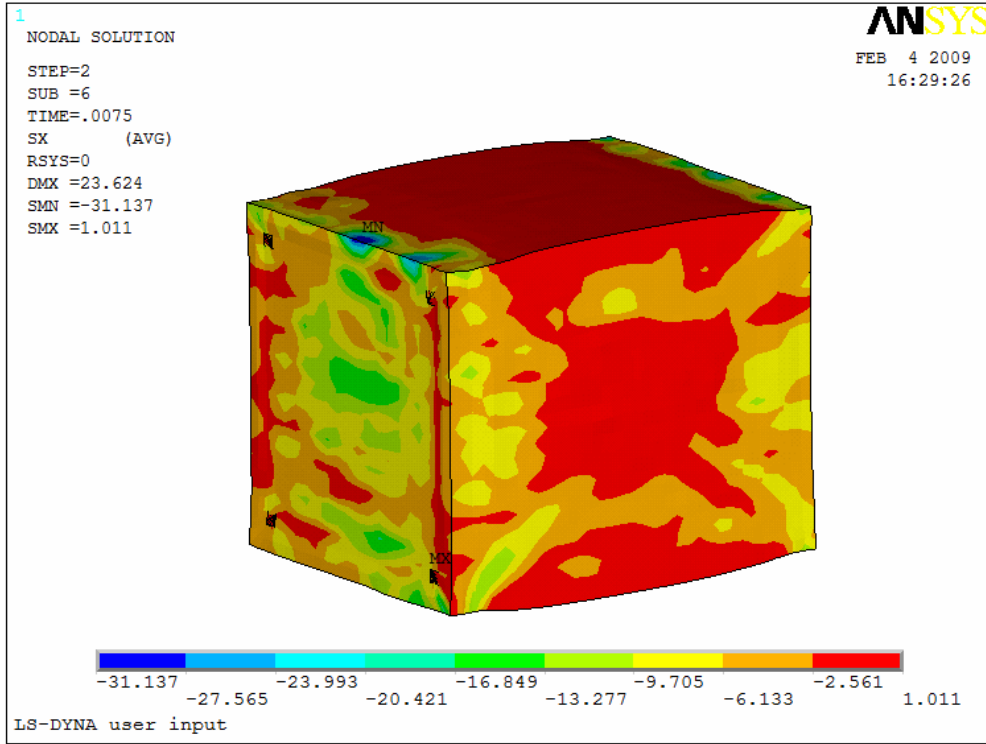
4.4.4.1. 3200 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri

3200 mm/sn çarpma hızı yaklaşık olarak enerji sönümlenme kapasitesi olarak verimli bir aralığın başlangıcı olarak tanımlanabilir. Şekil 4.57 ve şekil 4.58'de bu hız değeri için deformasyonun ilk aşaması görülmektedir. Yine aynı şekilde daha düşük hızlarda olduğu gibi bu değerler birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

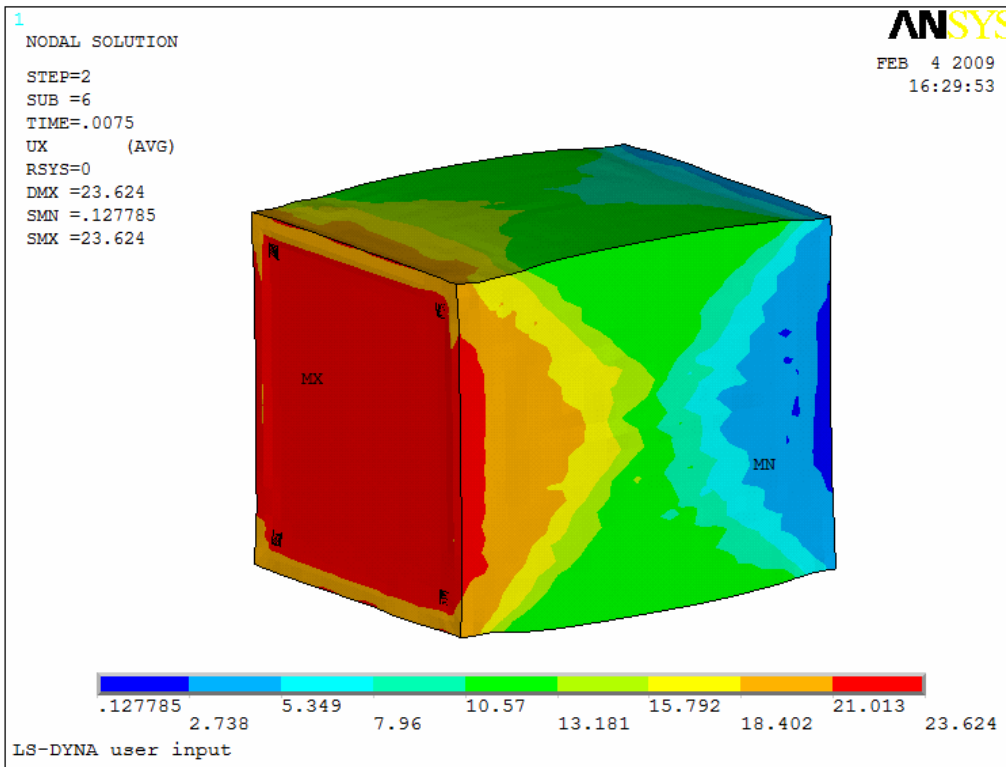
Düşük hız değerlerinde tartışma bölümünde açıklanacağı üzere deformasyon oranı artıkcı basma yönündeki değerler ise asal değerler birbirinden farklılık göstermek durumundadırlar (Babalık 1997). Ancak çarpma hızları arttıkça diğer mekanizmalar devreye gireceği için aradaki farklar rölatif olarak azalacaktır.



Şekil 4.57. ~23 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

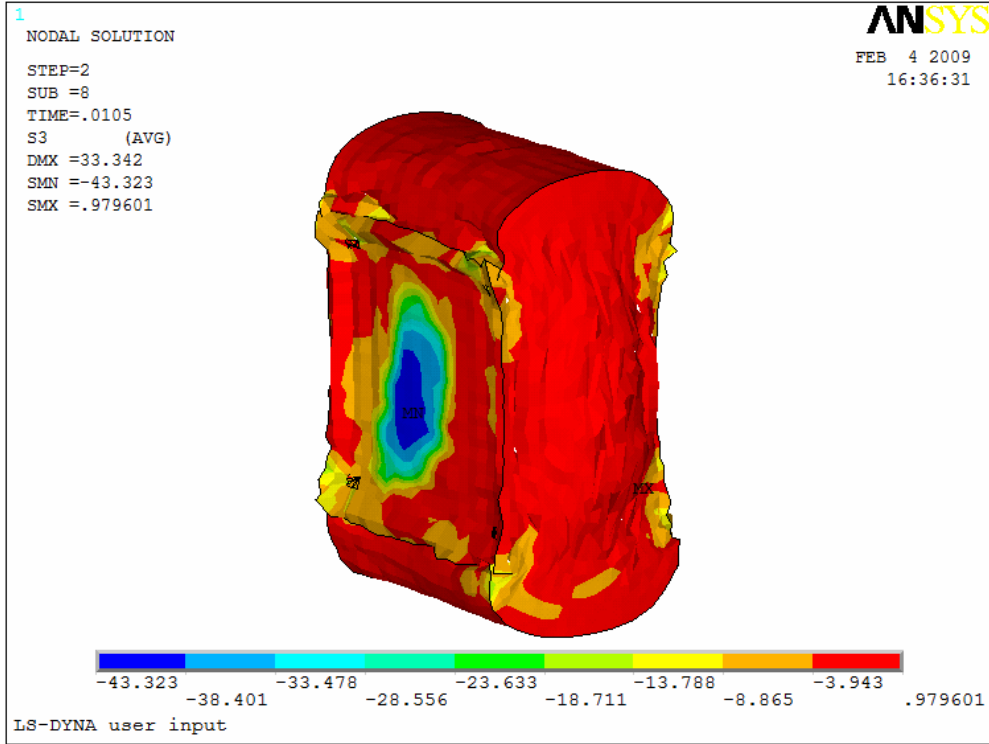


Şekil 4.58. ~23 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı

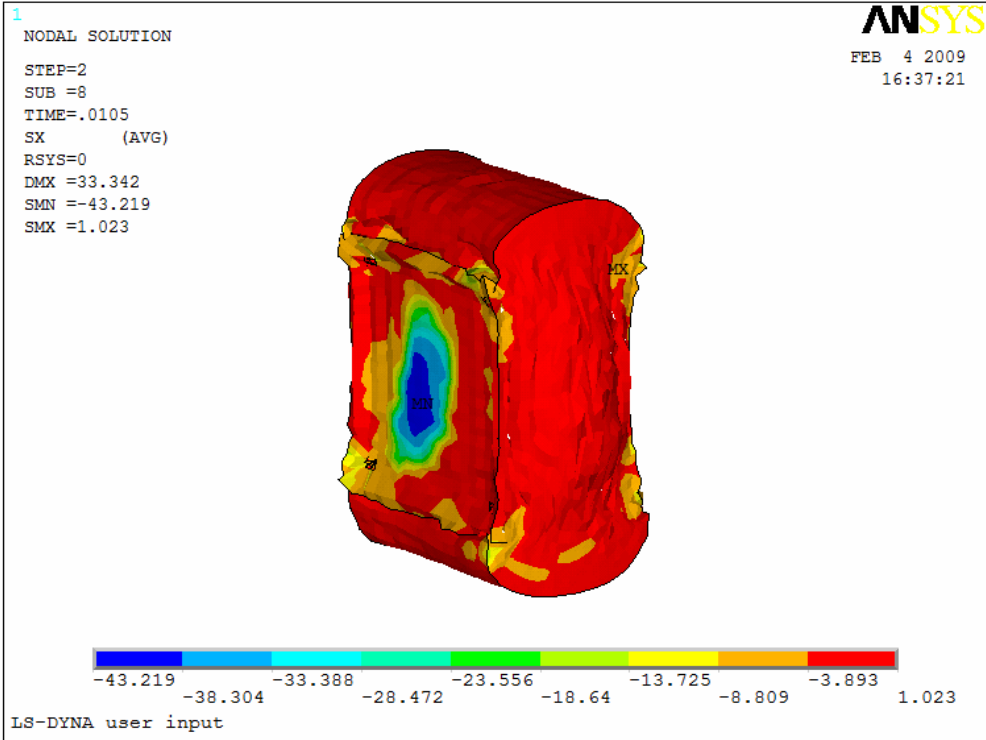


Şekil 4.59. 0,0075. saniyedeki x yönündeki deformasyon

Şekil 4.59’da önceki 2 şekil için aynı zamandaki deformasyon dağılımı görülmektedir. Çarpma hızı arttığı için aynı deformasyonlara daha hızlı şekilde ulaşılabilir.

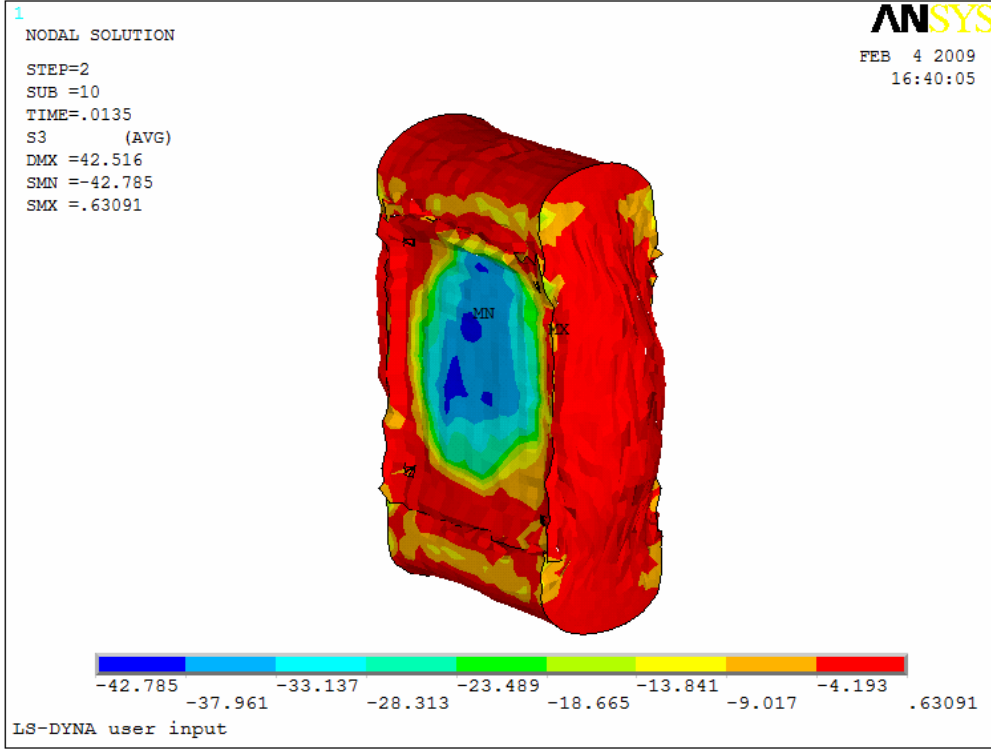


Şekil 4.60. ~33 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

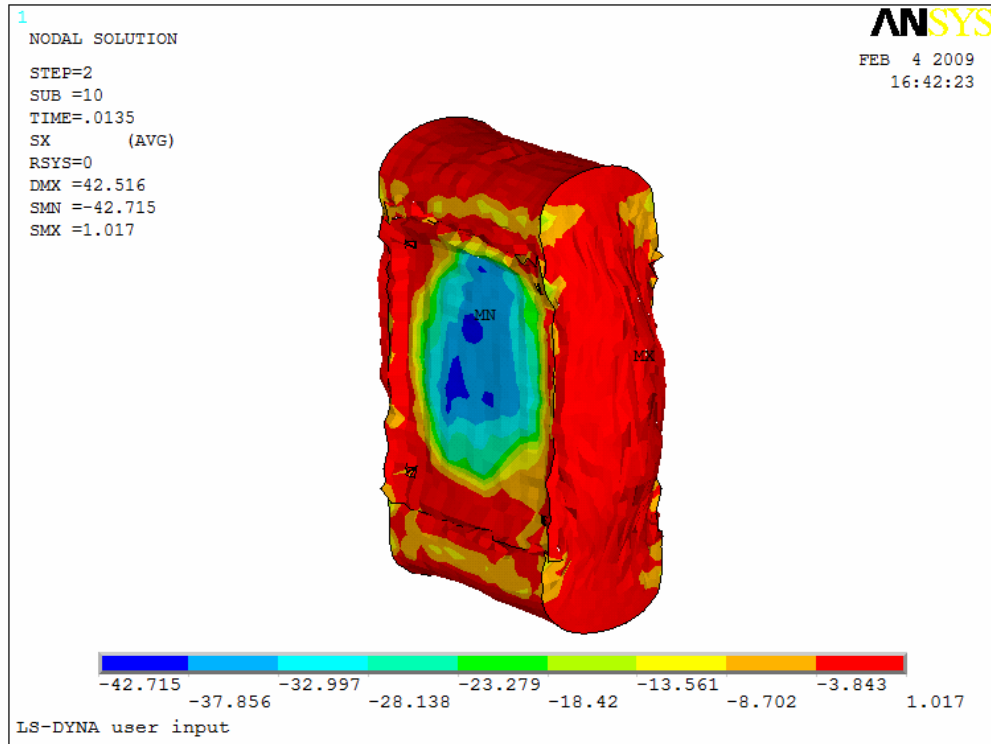


Şekil 4.61. ~33 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı

Şekil 4.60 ve şekil 4.61 ara deformasyon kademeleri için asal ve basma gerilme dağılımlarını göstermektedir.



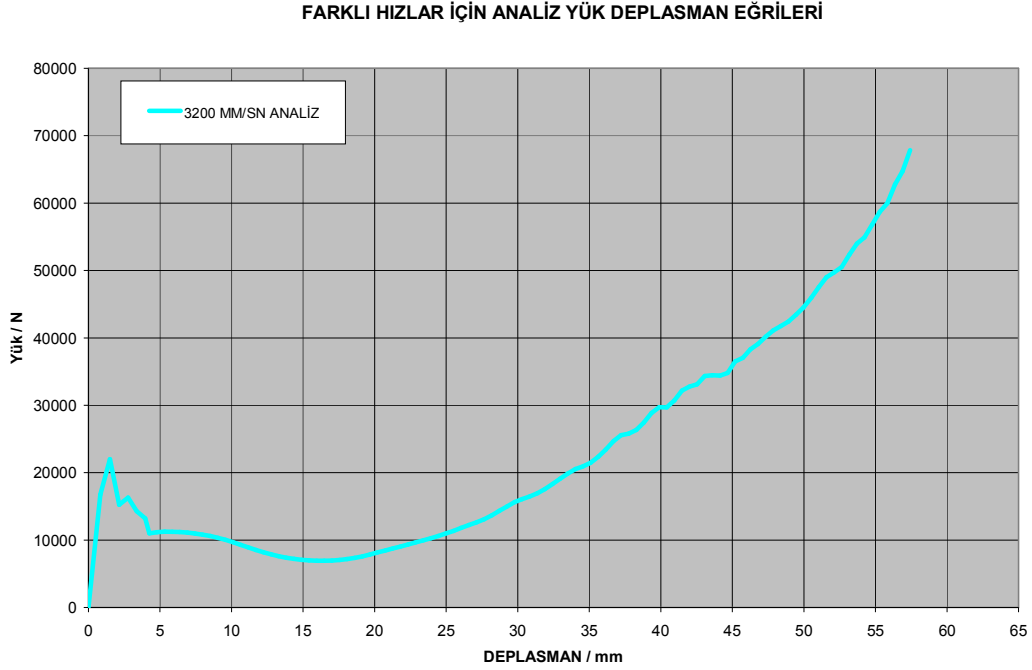
Şekil 4.62. ~42 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı



Şekil 4.63. ~42 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

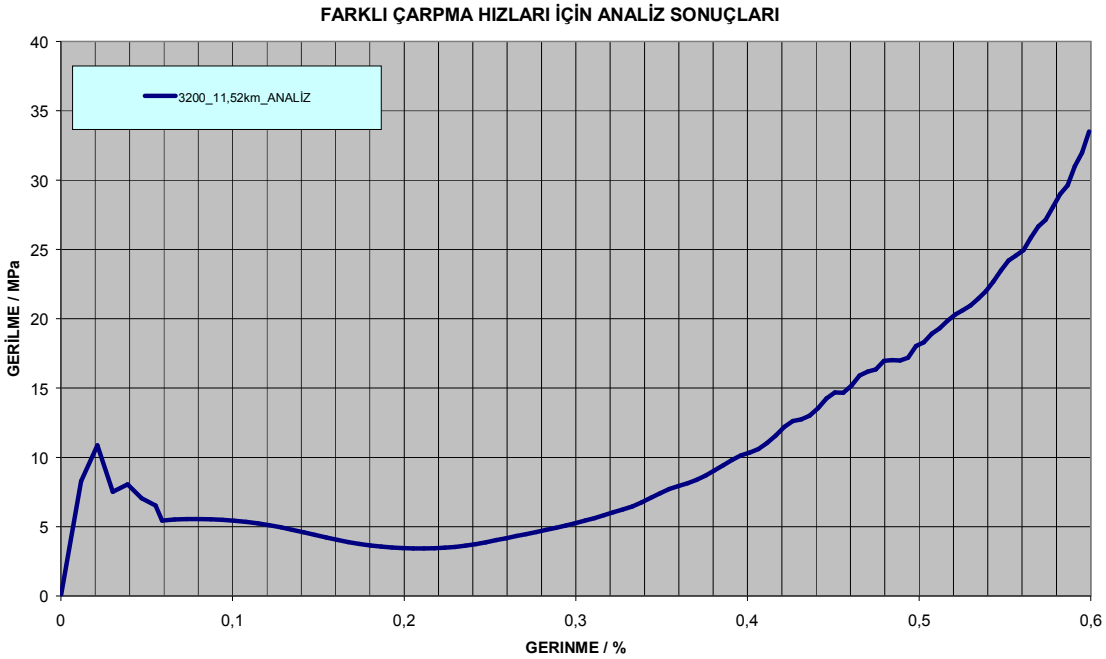
4.4.4.2. 3200 mm/sn için yük deplasman eğrileri

Şekil 4.64’de görülen yük deplasman eğrileri kullanılarak elde edilen şekil 4.67deki gerilme-gerinme eğrileri 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak gerçek gerilme-gerinme eğrilerine çevrilmişlerdir.



Şekil 4.64. 3200 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri

4.4.4.3. 3200 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri



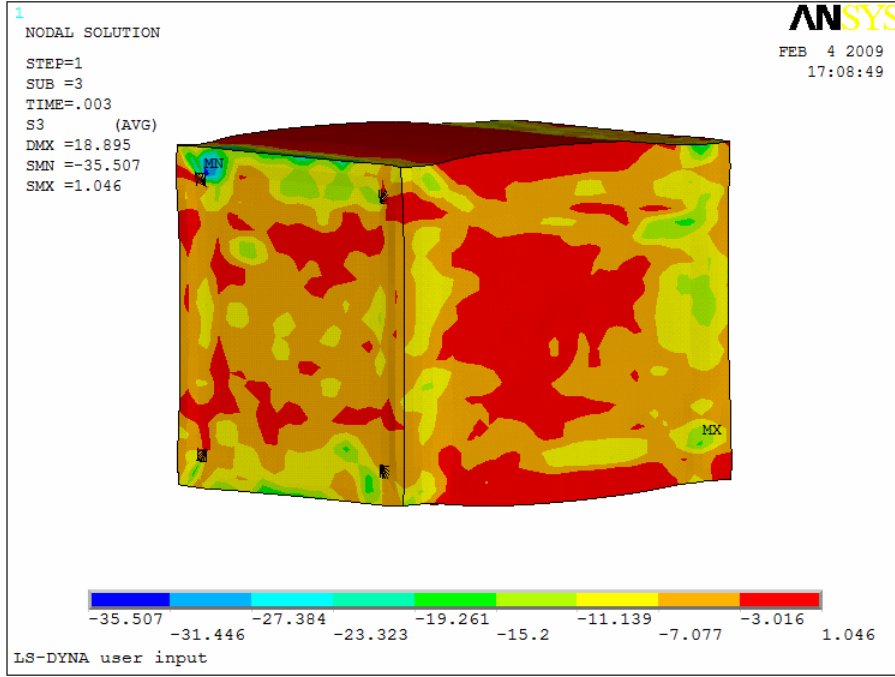
Şekil 4.65. 3200 mm/sn için analiz gerilme – gerinme eğrileri

4.4.5. 6400 mm/sn-(23,64km/saat) için benzetim sonuçları

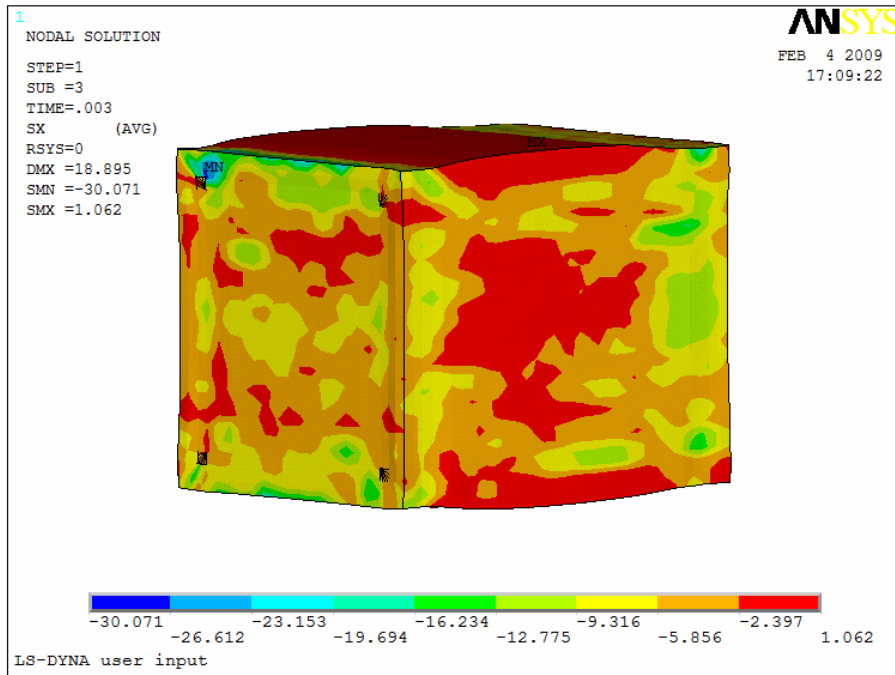
6400 mm/sn' lik hız ile yapılan çarpma benzetiminin farklı deformasyon değerleri için gerilme ve deformasyon dağılımları görülmektedir.

4.4.5.1. 6400 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri

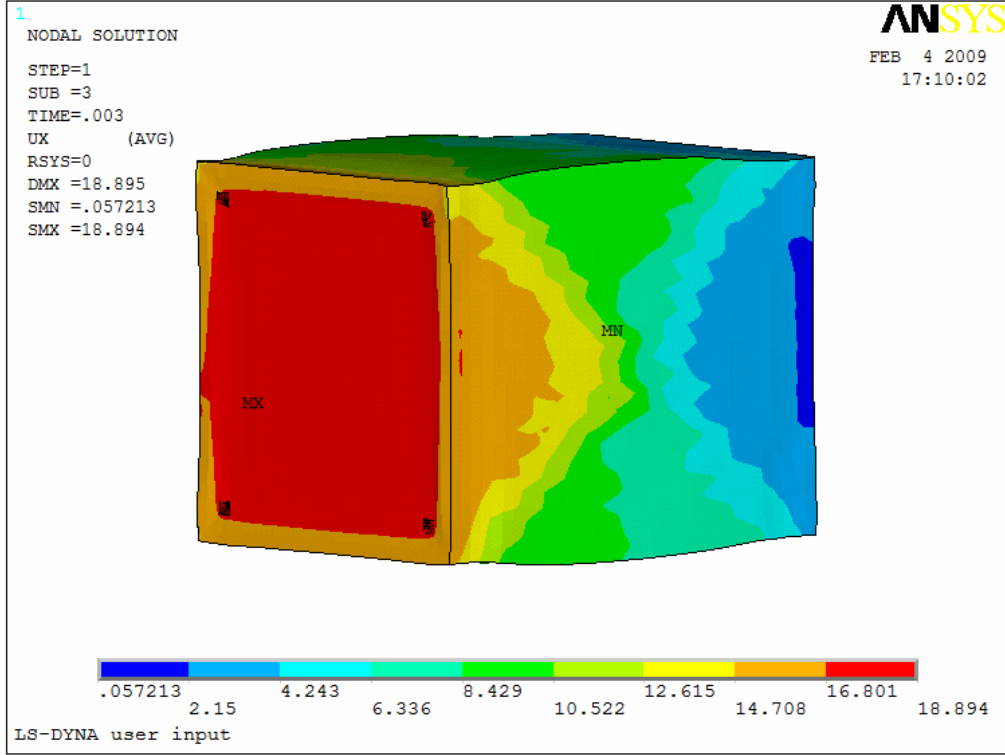
Sırası ile şekil 4.66'dan şekil 4.72'ye kadar artan deformasyon oranlarına bağlı olarak deformasyon dağılımları ve farklı gerilme bileşenleri yer almaktadır.



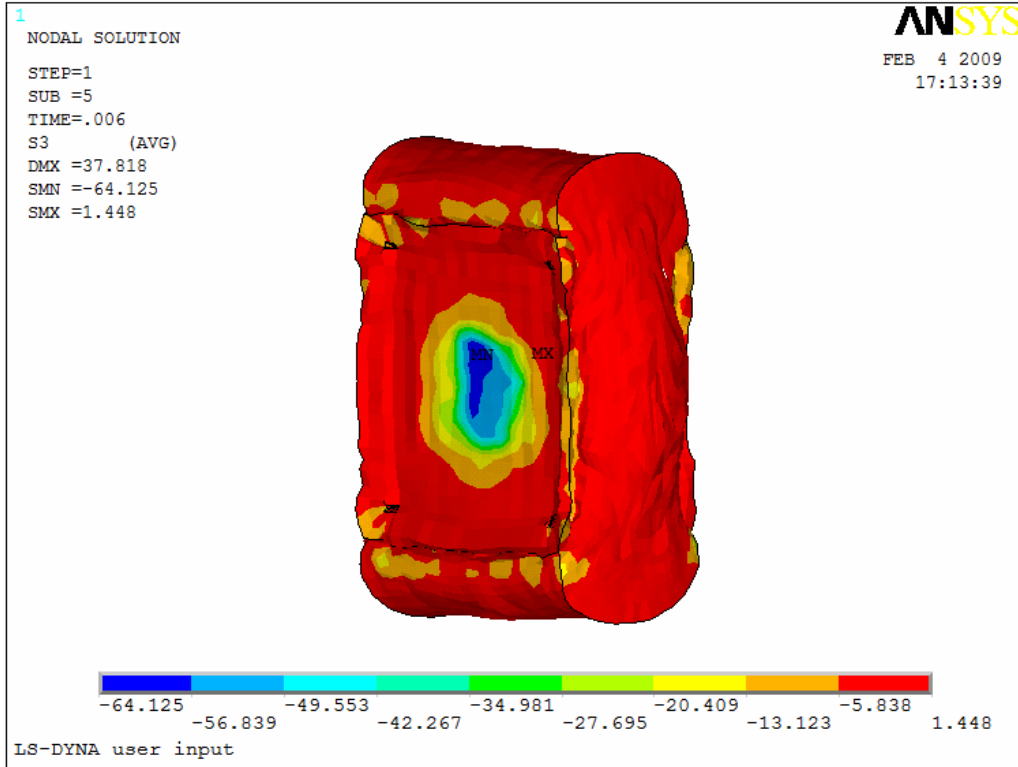
Şekil 4.66. ~19 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı



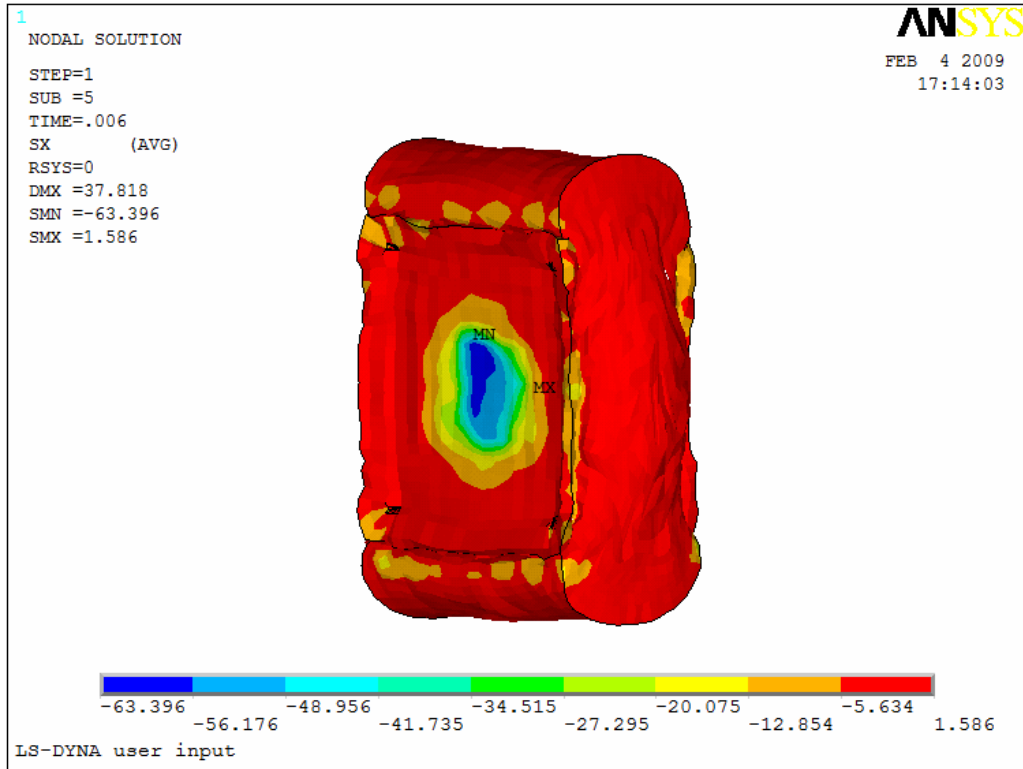
Şekil 4.67. ~19 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı



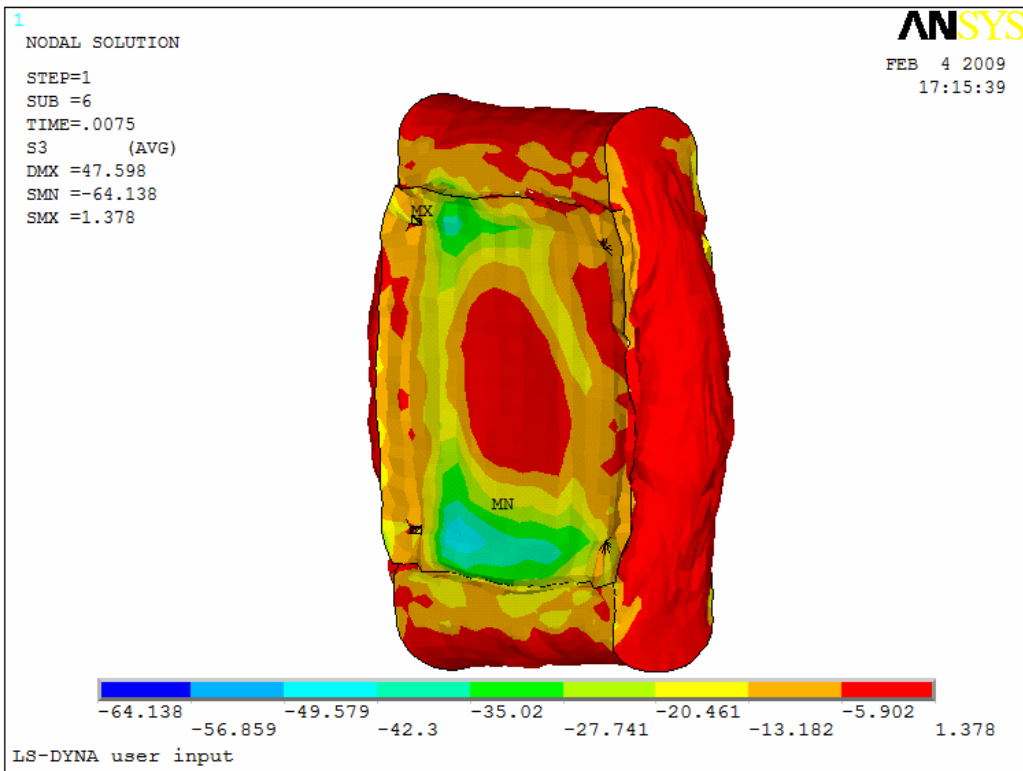
Şekil 4.68. 0.003. saniyedeki x yönündeki deformasyon



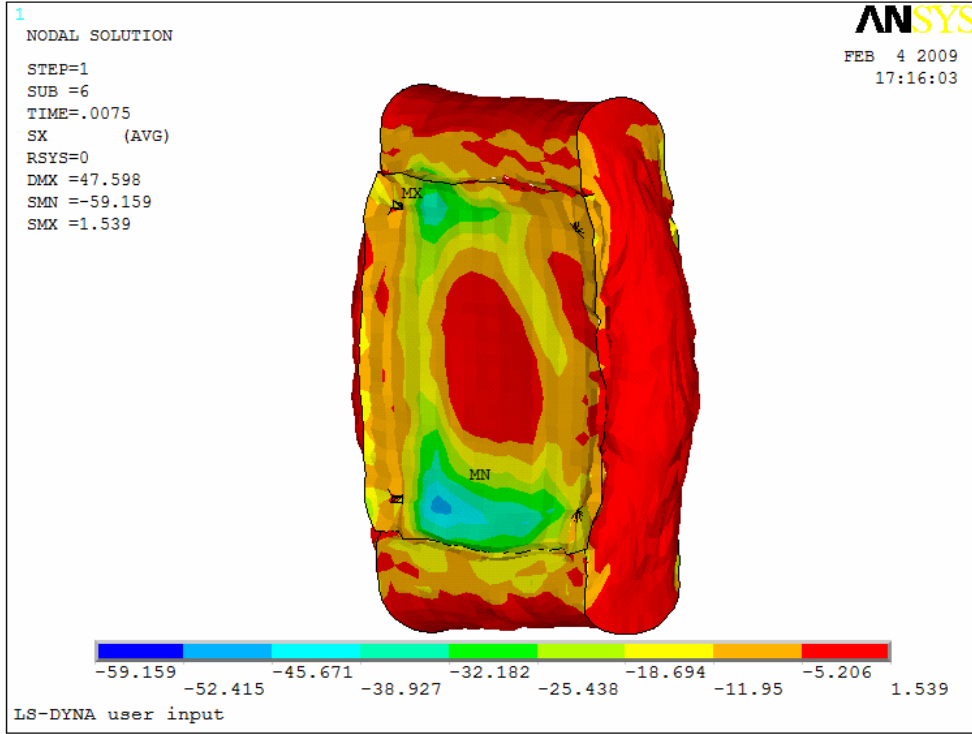
Şekil 4.69. ~37 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı



Şekil 4.70. ~37 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı



Şekil 4.71. ~47 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

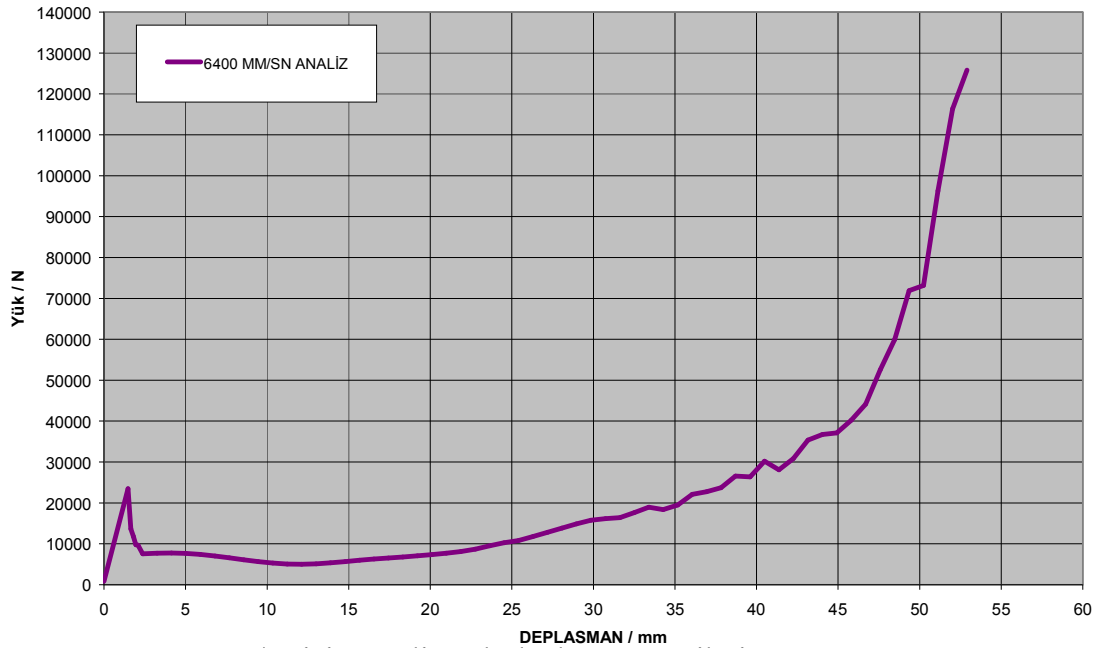


Şekil 4.72. ~47 mm deformasyon sırasındaki x yönündeki gerilme dağılımı

4.4.5.2. 6400 mm/sn için yük deplasman eğrileri

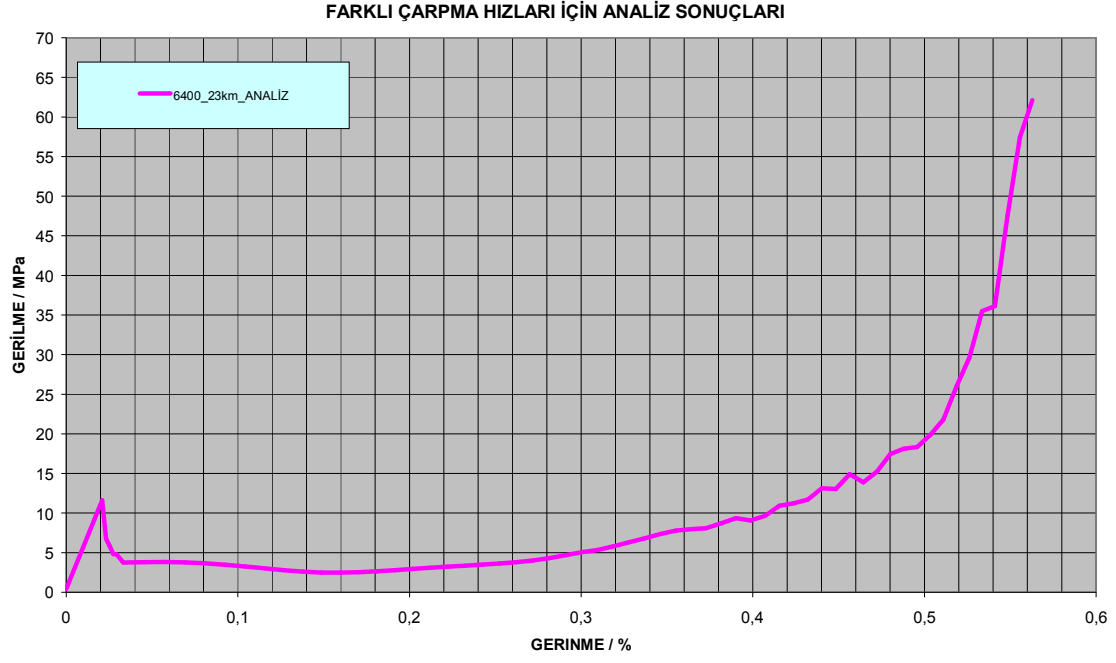
Şekil 4.73'de görülen yük deplasman eğrileri kullanılarak elde edilen şekil 4.74deki gerilme-gerinme eğrileri 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak gerçek gerilme-gerinme eğrilerine çevrilmişlerdir.

FARKLI HIZLAR İÇİN ANALİZ YÜK DEPLASMAN EĞRİLERİ



Şekil 4.73. 6400 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri

4.4.5.3. 6400 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri



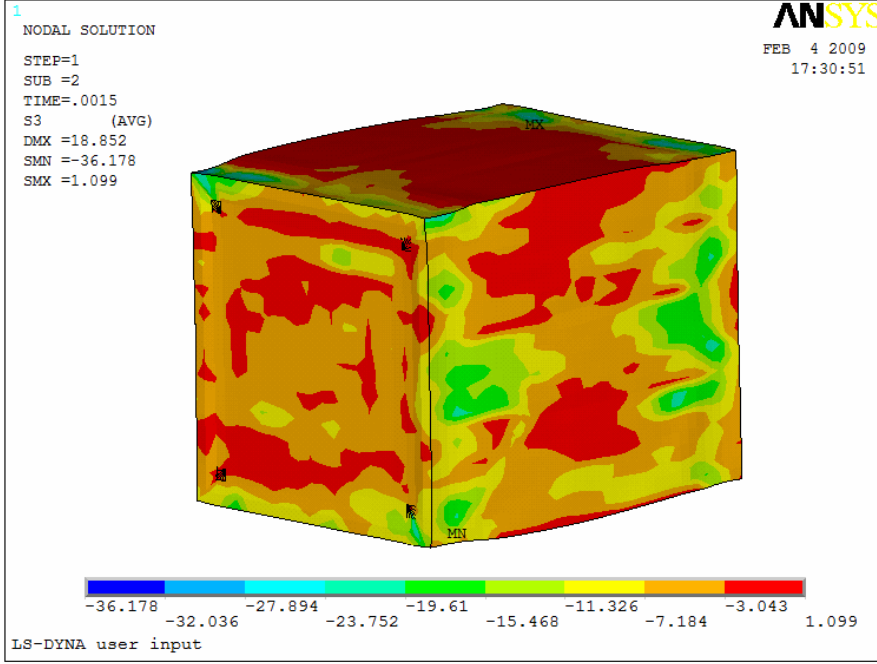
Şekil 4.74. 6400 mm/sn için analiz gerilme – gerinme eğrileri

4.4.6. 12800 mm/sn-(46,08km/saat) için benzetim sonuçları

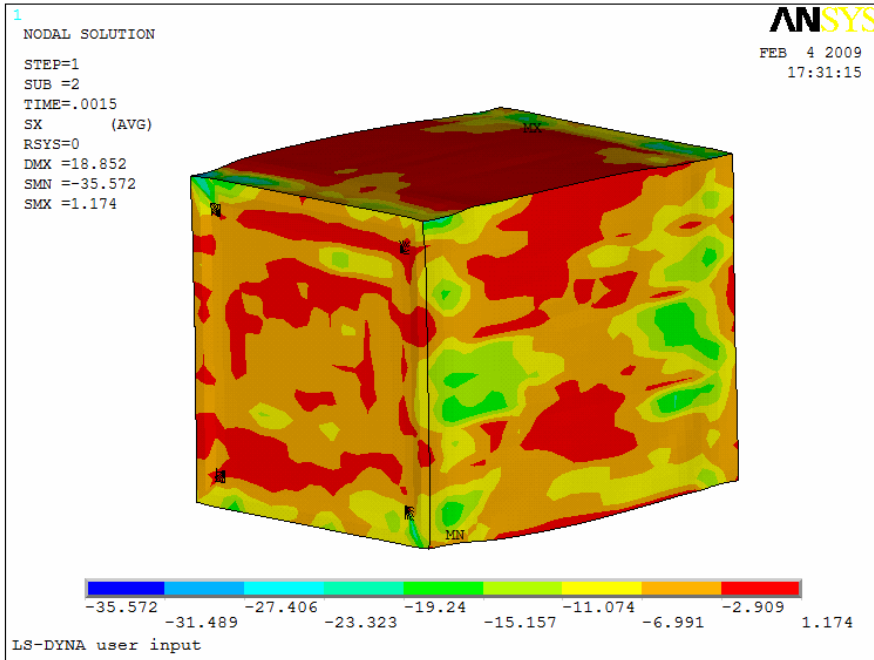
6400 mm/sn' lik hız ile yapılan çarpma benzetiminin farklı deformasyon değerleri için gerilme ve deformasyon dağılımları görülmektedir.

4.4.6.1 12800 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri

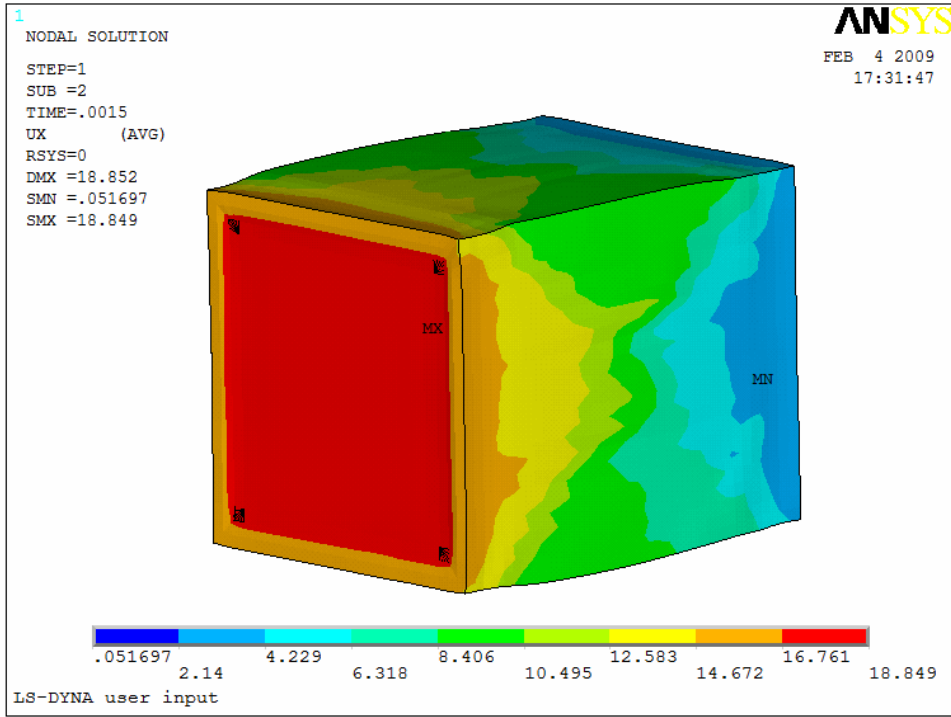
Sırası ile şekil 4.75'den şekil 4.82'ye kadar artan deformasyon oranlarına bağlı olarak deformasyon dağılımları ve farklı gerilme bileşenleri yer almaktadır.



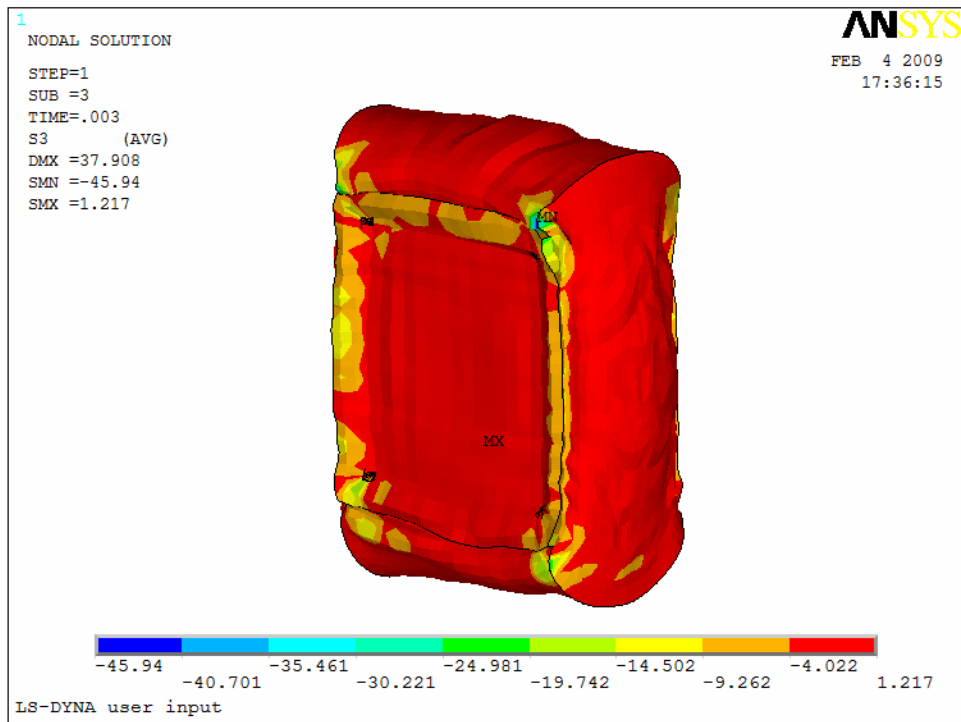
Şekil 4.75. ~19 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı



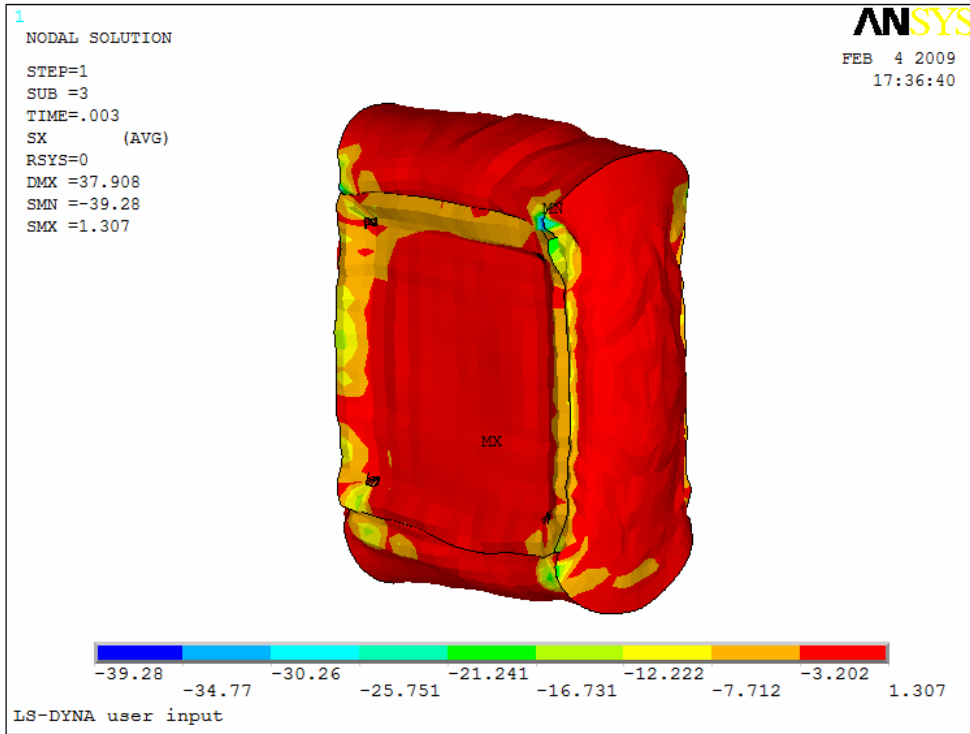
Şekil 4.76. ~19 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı



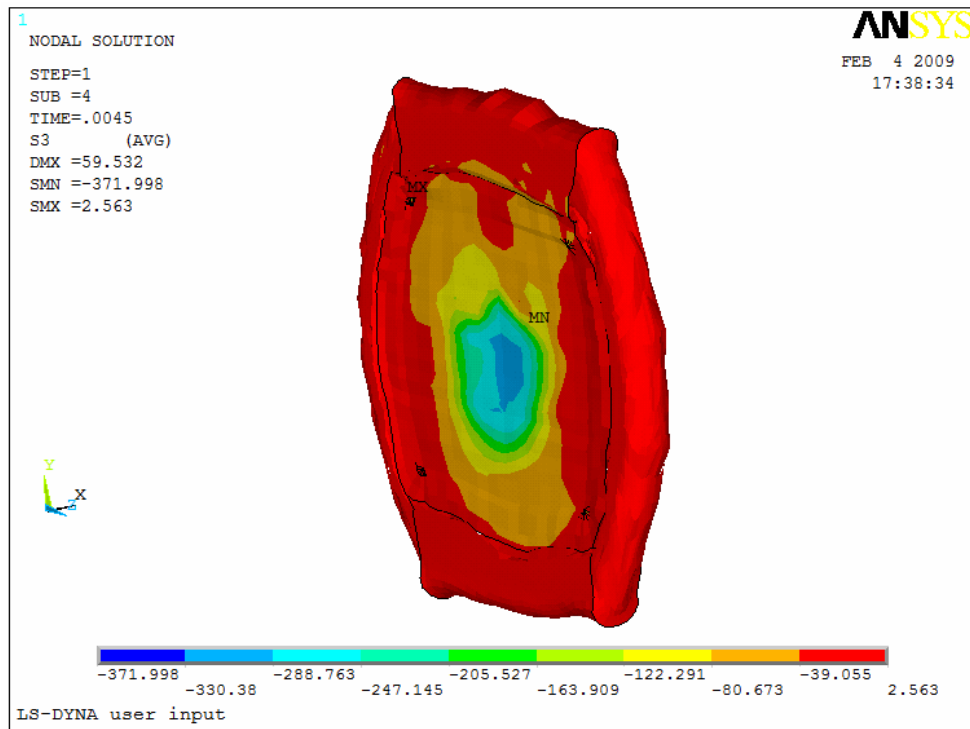
Şekil 4.77. 0,0015. saniyedeki x yönündeki deformasyon



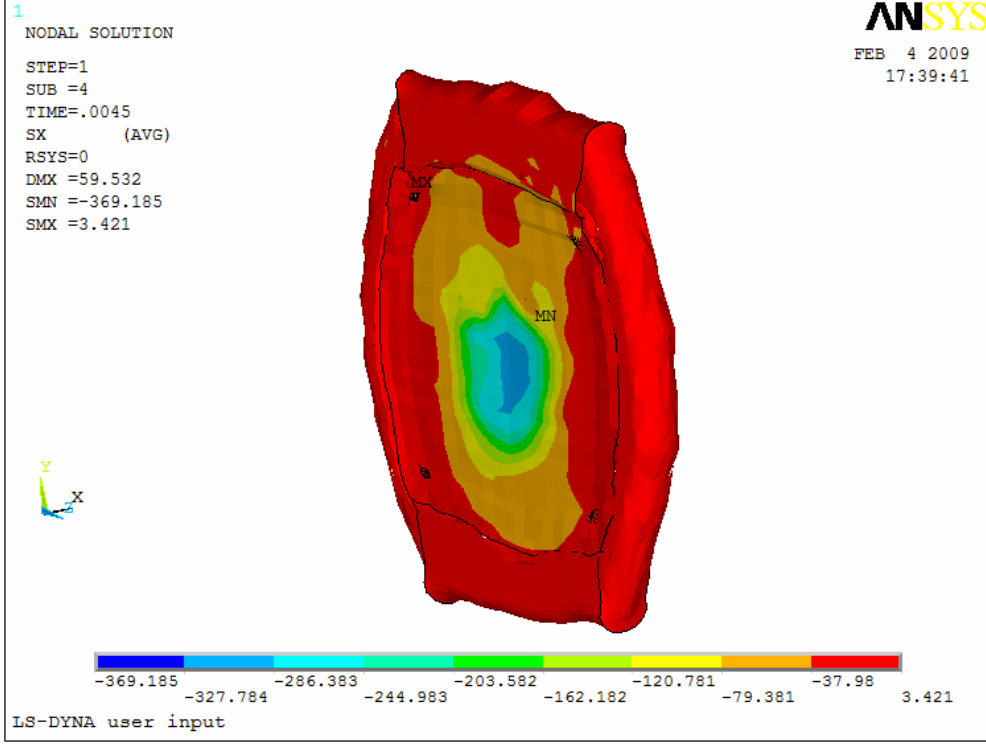
Şekil 4.78. ~38 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı



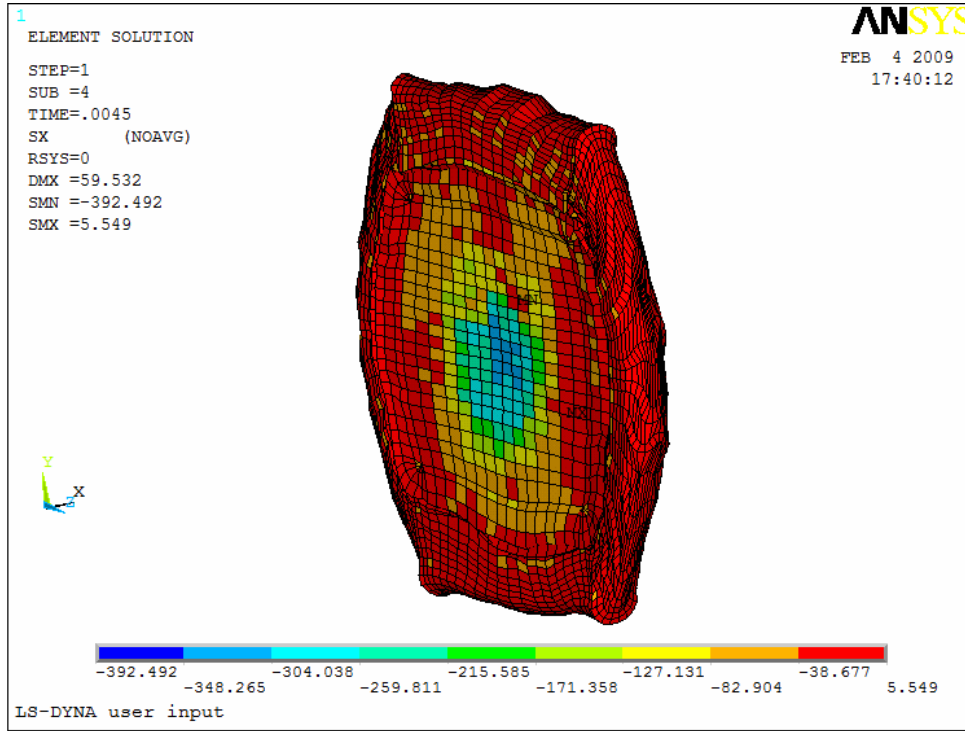
Şekil 4.79. ~47 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı



Şekil 4.80. ~60 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı



Şekil 4.81. ~59 mm deformasyon sırasındaki x yönündeki gerilme dağılımı

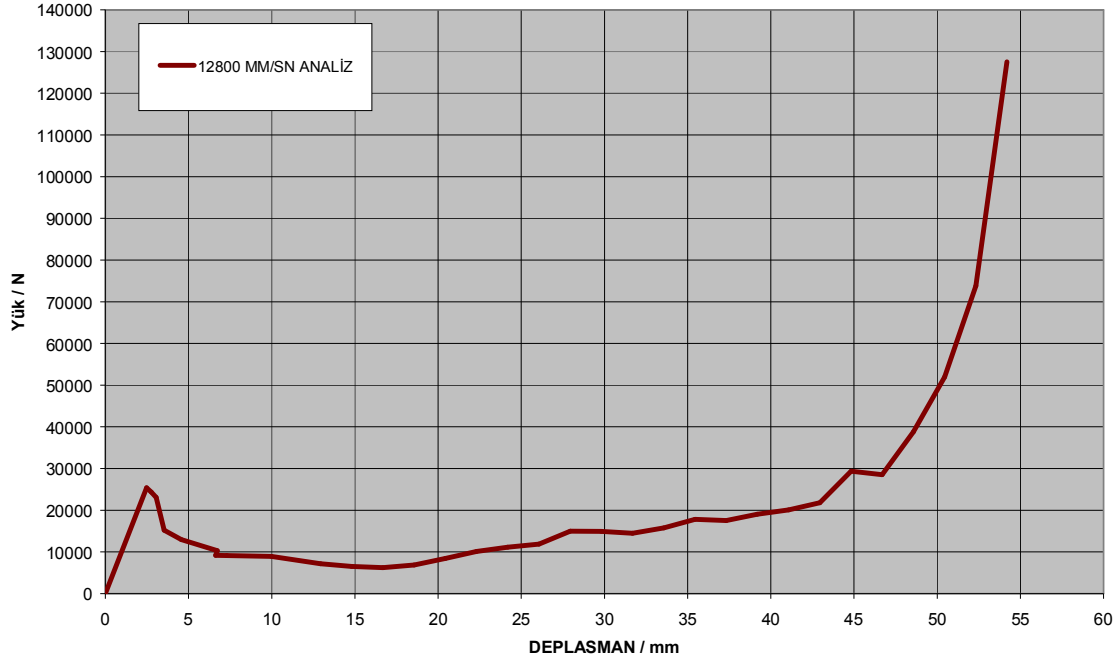


Şekil 4.82. ~59 mm deformasyon sırasındaki x yönündeki gerilme dağılımı (element gösterimi)

4.4.6.2. 12800 mm/sn için yük deplasman eğrileri

Şekil 4.83’de görülen yük deplasman eğrileri kullanılarak elde edilen şekil 4.84’deki gerilme-gerinme eğrileri 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak gerçek gerilme-gerinme eğrilerine çevrilmişlerdir.

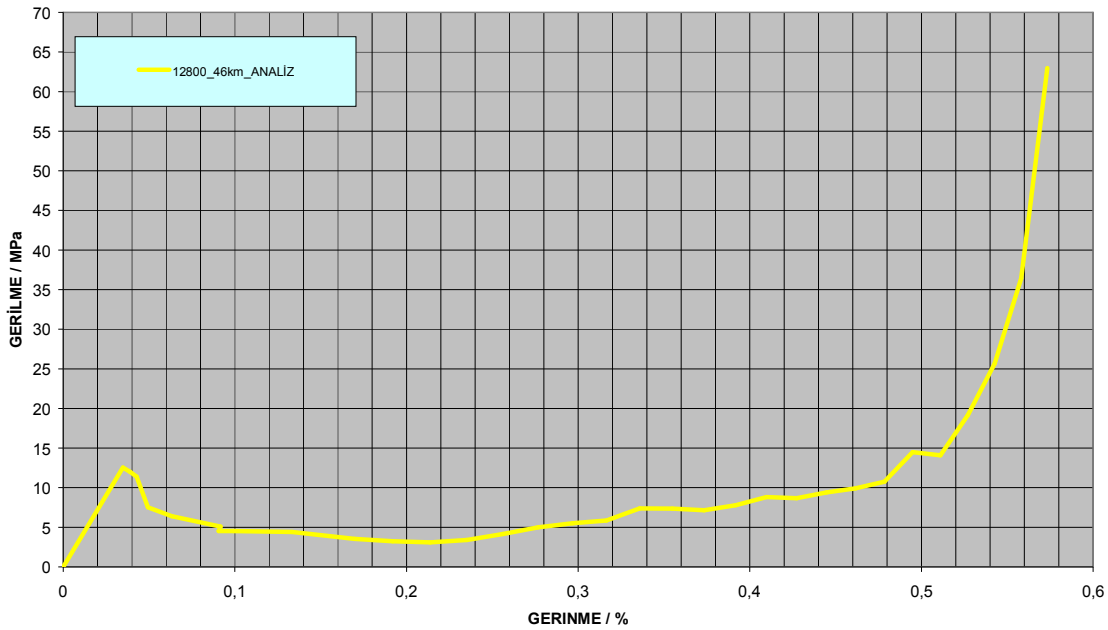
FARKLI HIZLAR İÇİN ANALİZ YÜK DEPLASMAN EĞRİLERİ



Şekil 4.83. 12800 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri

4.4.6.3. 12800 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri

FARKLI ÇARPMA HIZLARI İÇİN ANALİZ SONUÇLARI



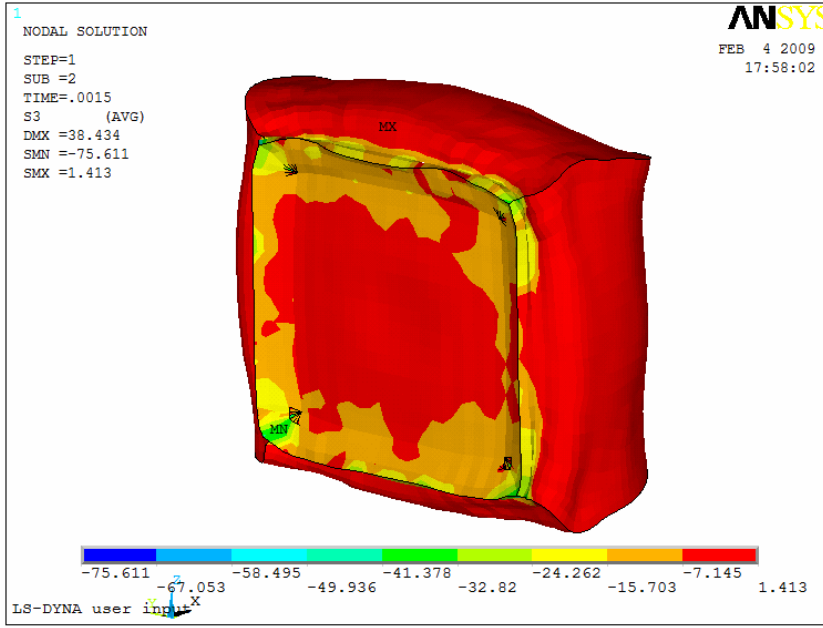
Şekil 4.84. 12800 mm/sn için analiz gerilme – gerinme eğrileri

4.4.7. 17500 mm/sn-(63km/saat) için benzetim sonuçları

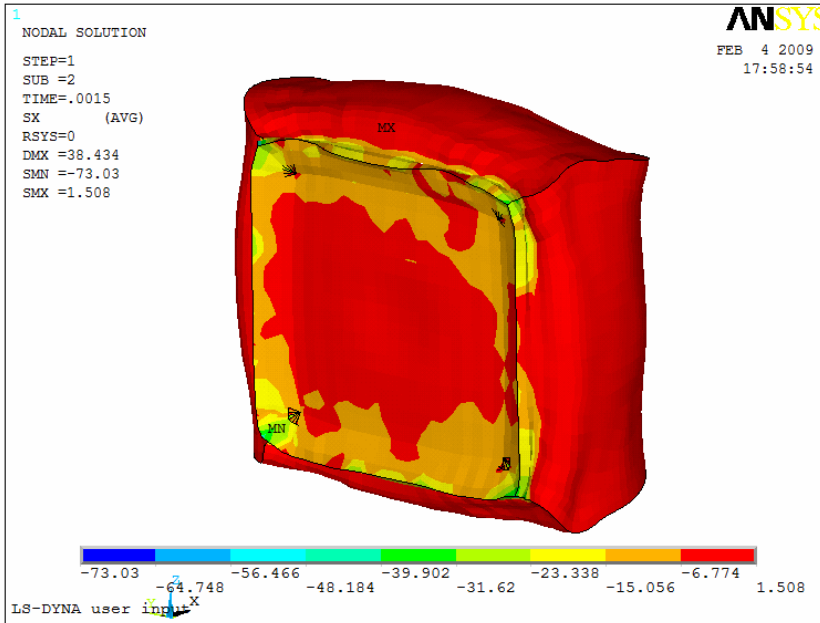
17500 mm/sn' lik hız ile yapılan çarpma benzetiminin farklı deformasyon değerleri için gerilme ve deformasyon dağılımları görülmektedir.

4.4.7.1 17500 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri

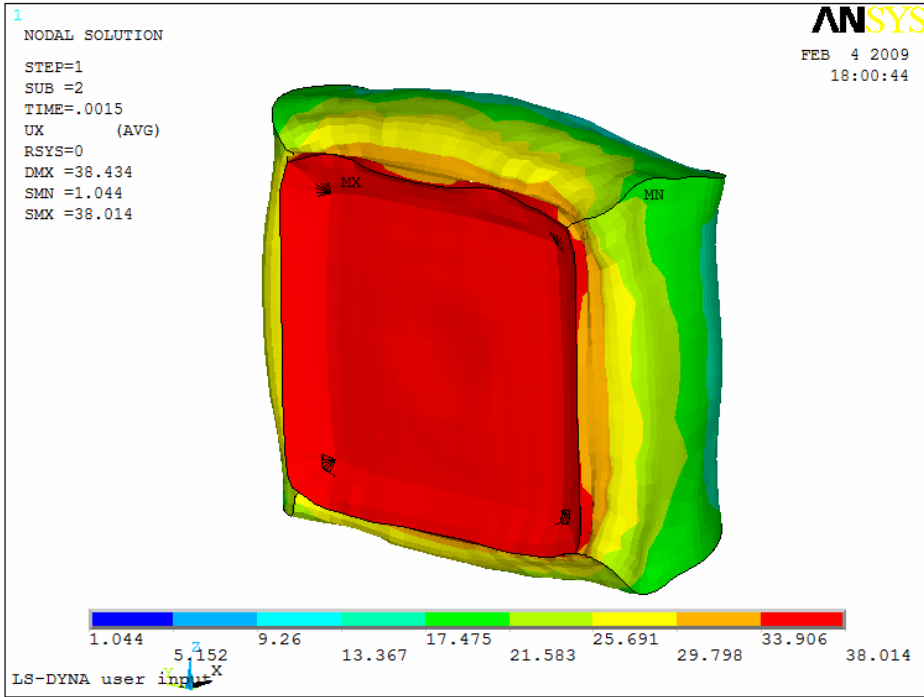
Sırası ile şekil 4.85'den şekil 4.90'a kadar artan deformasyon oranlarına bağlı olarak deformasyon dağılımları ve farklı gerilme bileşenleri yer almaktadır.



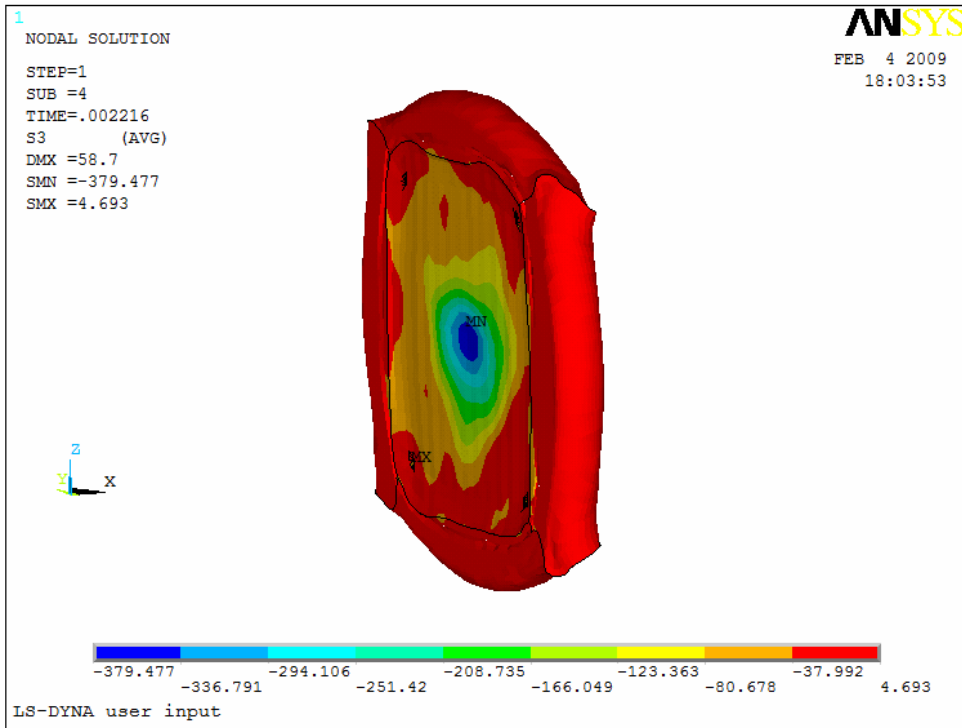
Şekil 4.85. ~38 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı



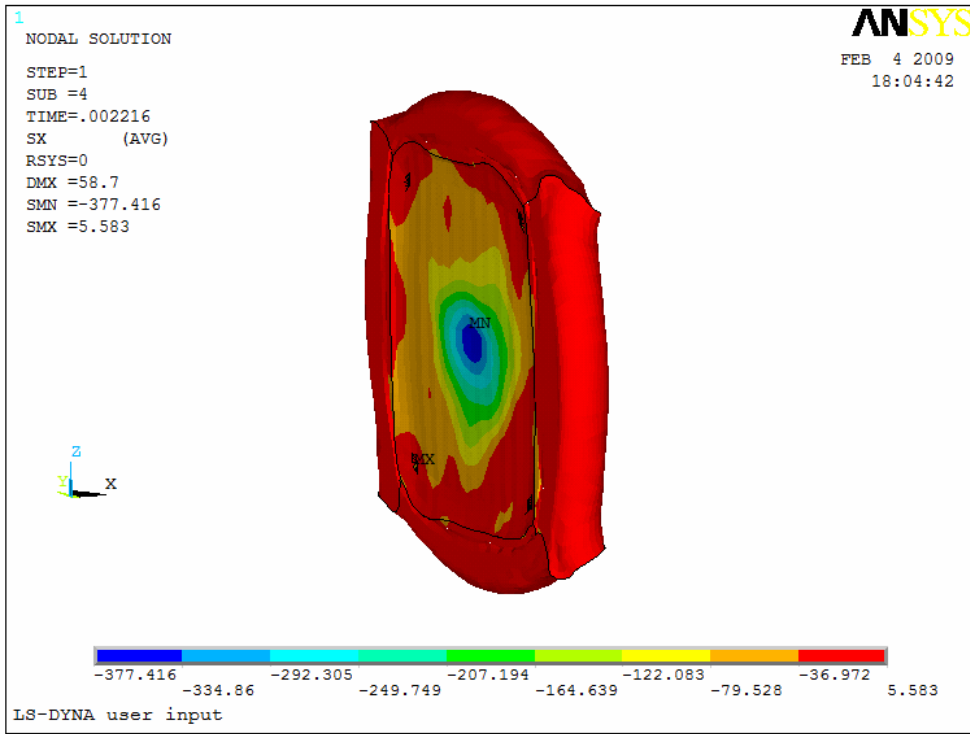
Şekil 4.86. ~38 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı



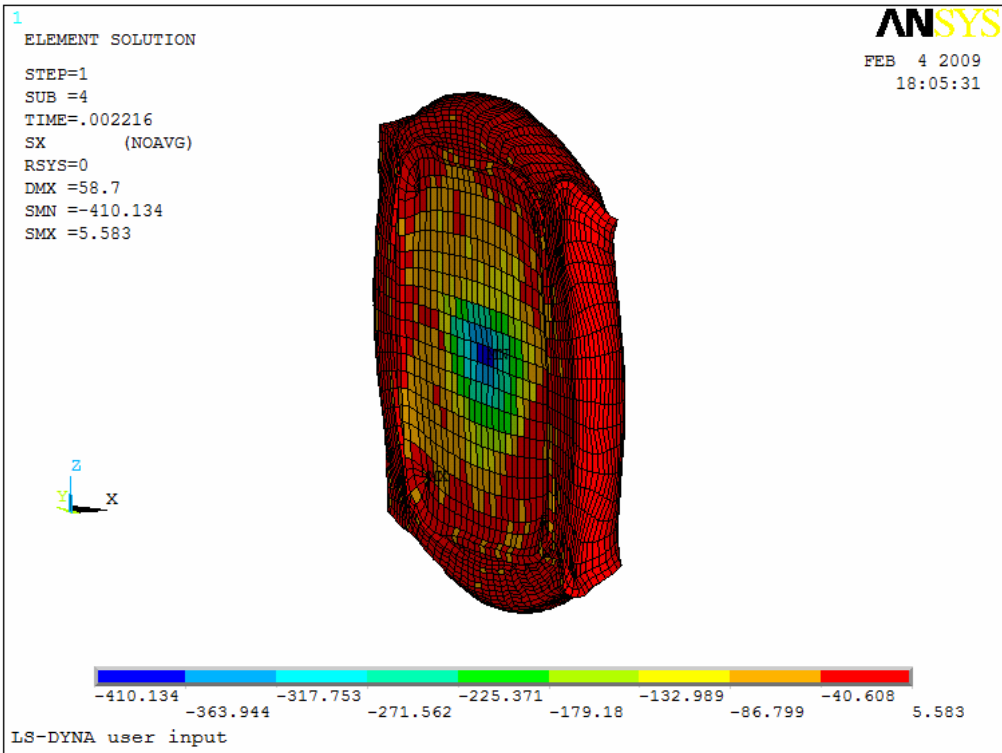
Şekil 4.87. 0,0015. saniyedeki x yönündeki deformasyon



Şekil 4.88. ~58 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı



Şekil 4.89. ~58 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı

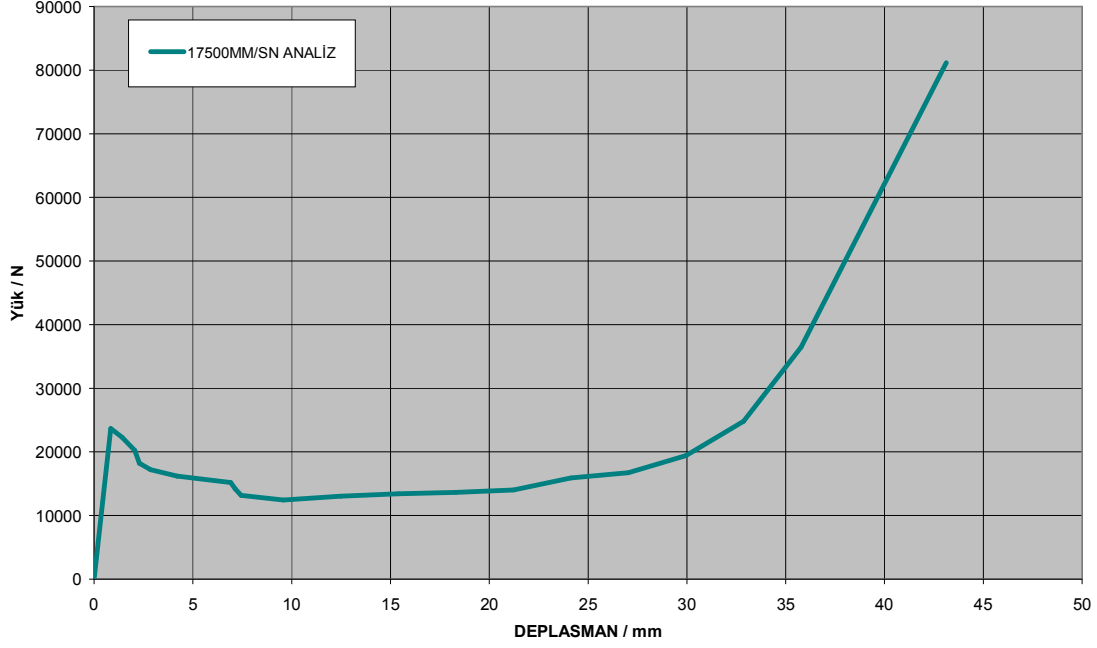


Şekil 4.90. ~58 mm deformasyon sırasındaki x yönündeki gerilme dağılımı (element gösterimi)

4.4.7.2. 17500 mm/sn için yük deplasman eğrileri

Şekil 4.91’de görülen yük deplasman eğrileri kullanılarak elde edilen şekil 4.92’deki gerilme-gerinme eğrileri 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak gerçek gerilme-gerinme eğrilerine çevrilmişlerdir.

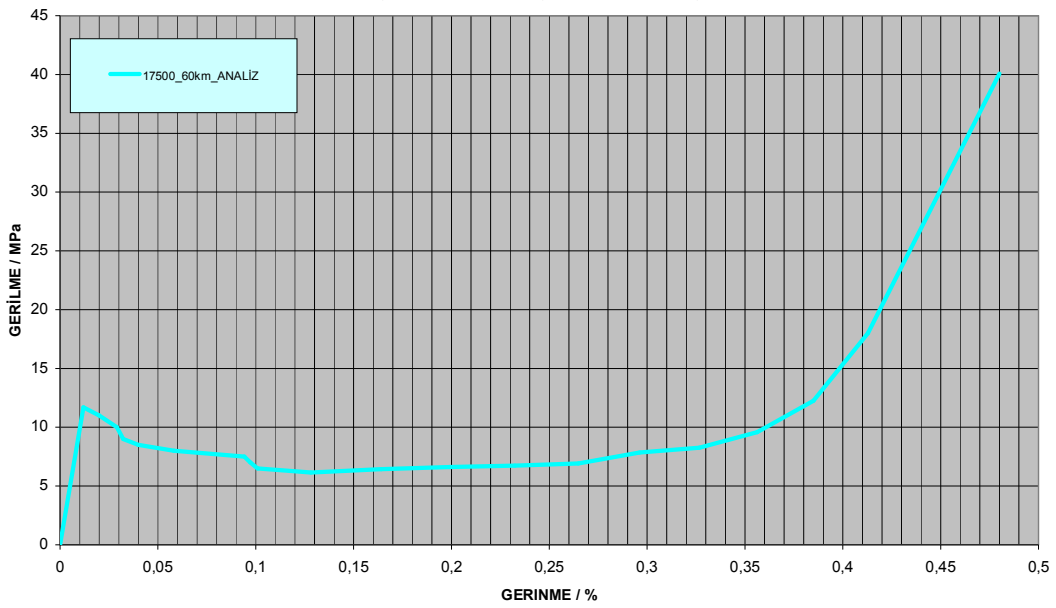
FARKLI HIZLAR İÇİN ANALİZ YÜK DEPLASMAN EĞRİLERİ



Şekil 4.91. 17500 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri

4.4.7.3. 17500 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri

FARKLI ÇARPMA HIZLARI İÇİN ANALİZ SONUÇLARI



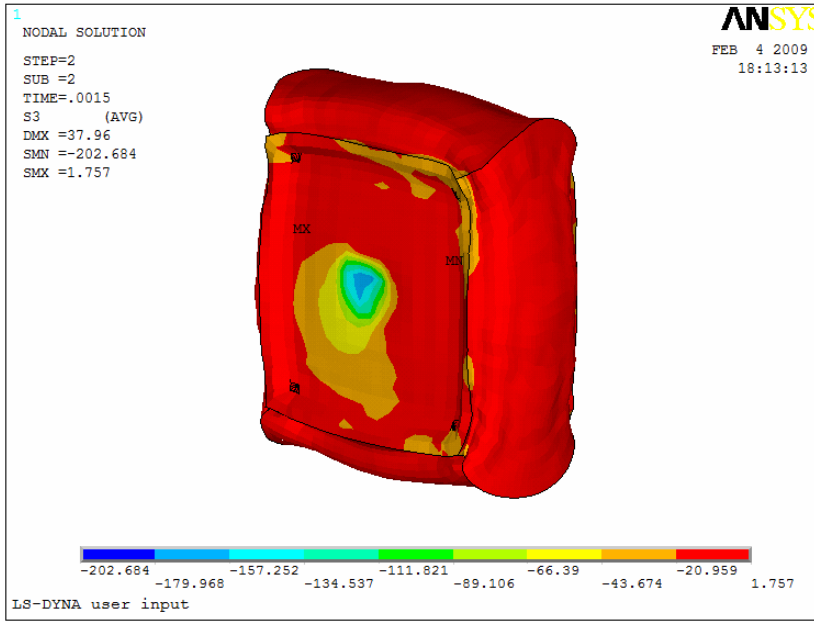
Şekil 4.92. 25000 mm/sn için Analiz yük-deplasman eğrileri

4.4.8. 25000 mm/sn-(90km/saat) için benzetim sonuçları

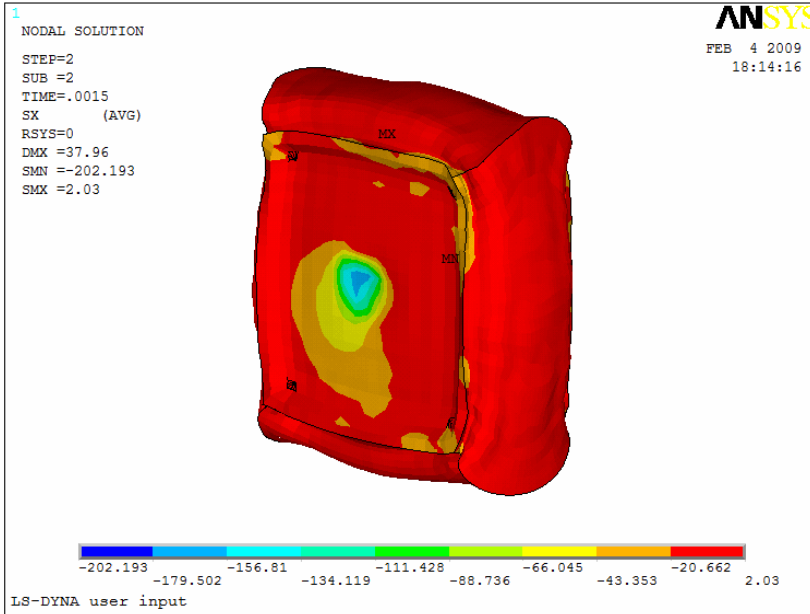
25000 mm/sn' lik hız ile yapılan çarpma benzetiminin farklı deformasyon değerleri için gerilme ve deformasyon dağılımları görülmektedir.

4.4.8.1 25000 mm/sn için gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri

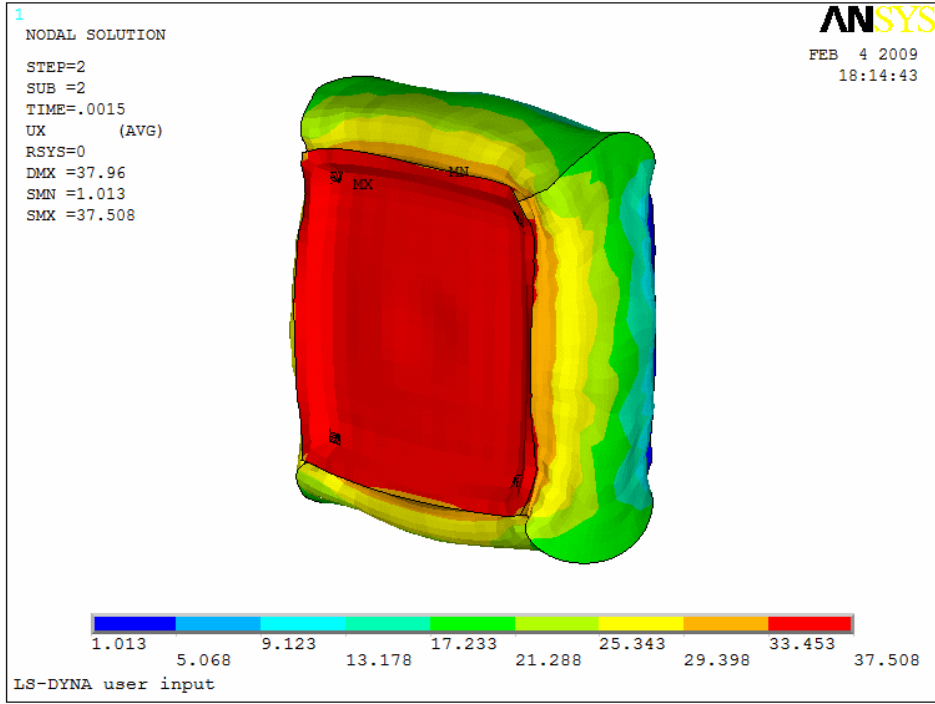
Sırası ile şekil 4.93'den şekil 4.97'ye kadar artan deformasyon oranlarına bağlı olarak deformasyon dağılımları ve farklı gerilme bileşenleri yer almaktadır.



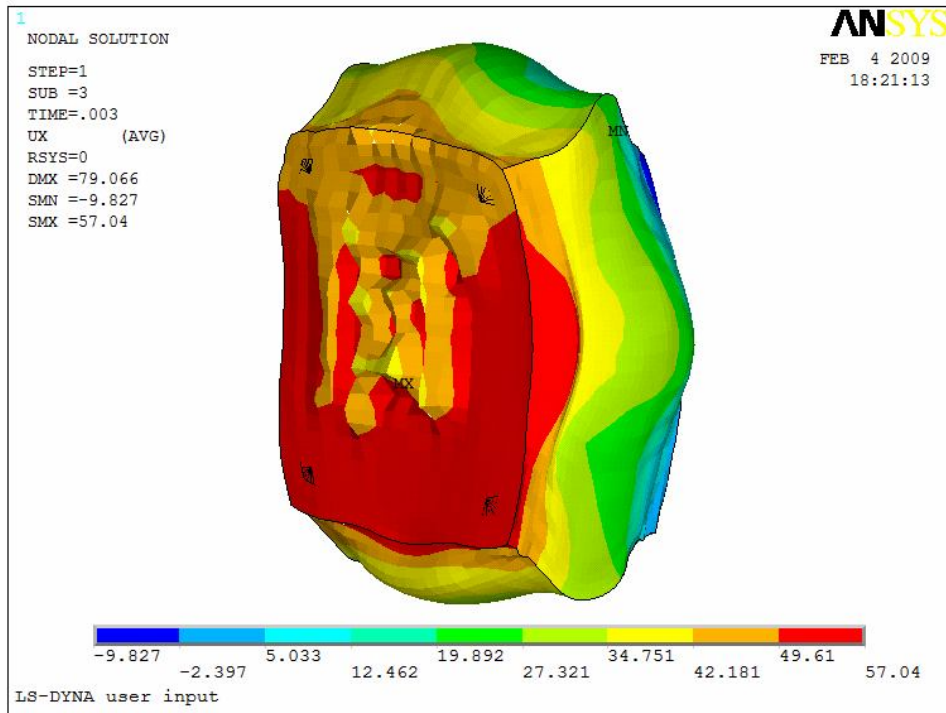
Şekil 4.93. ~38 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı



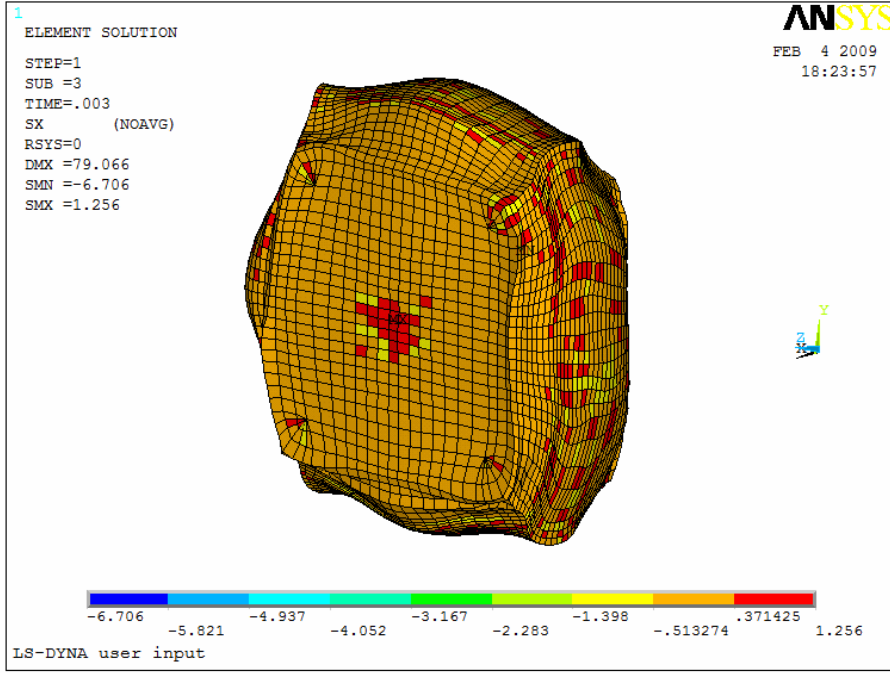
Şekil 4.94. ~38 mm deformasyon sırasındaki X yönündeki gerilme dağılımı



Şekil 4.95. 0,0015. saniyedeki x yönündeki deformasyon



Şekil 4.96. ~79 mm deformasyon sırasındaki Minimum asal gerilme dağılımı

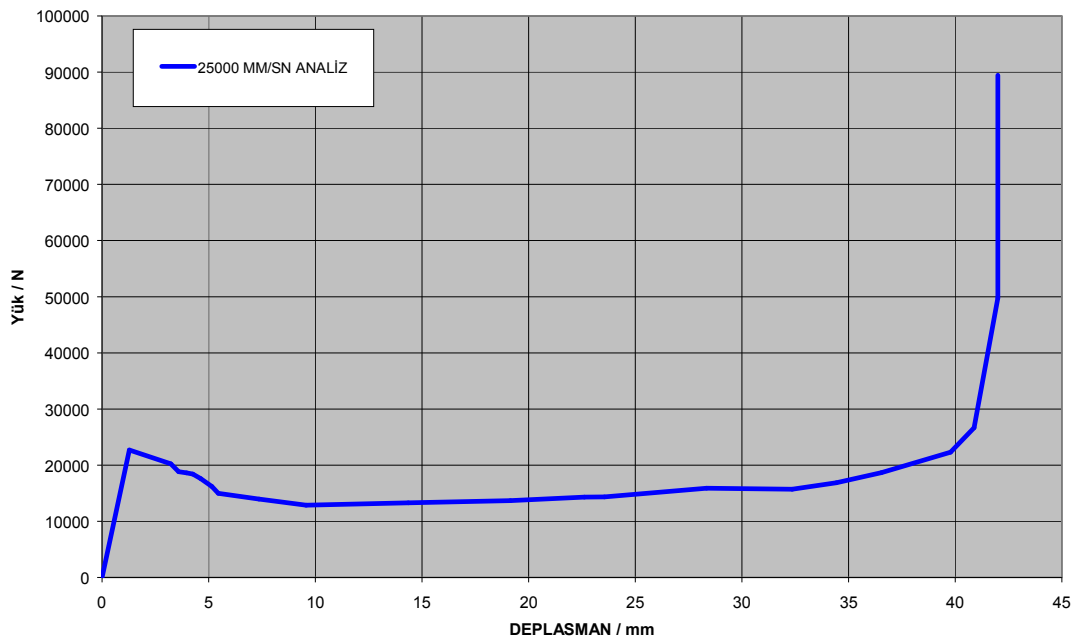


Şekil 4.97. ~79 mm deformasyon sırasındaki x yönündeki gerilme dağılımı (element gösterimi)

4.4.8.2. 25000 mm/sn için yük deplasman eğrileri

Şekil 4.98’de görülen yük deplasman eğrileri kullanılarak elde edilen şekil 4.99’daki gerilme-gerinme eğrileri 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak gerçek gerilme-gerinme eğrilerine çevrilmişlerdir.

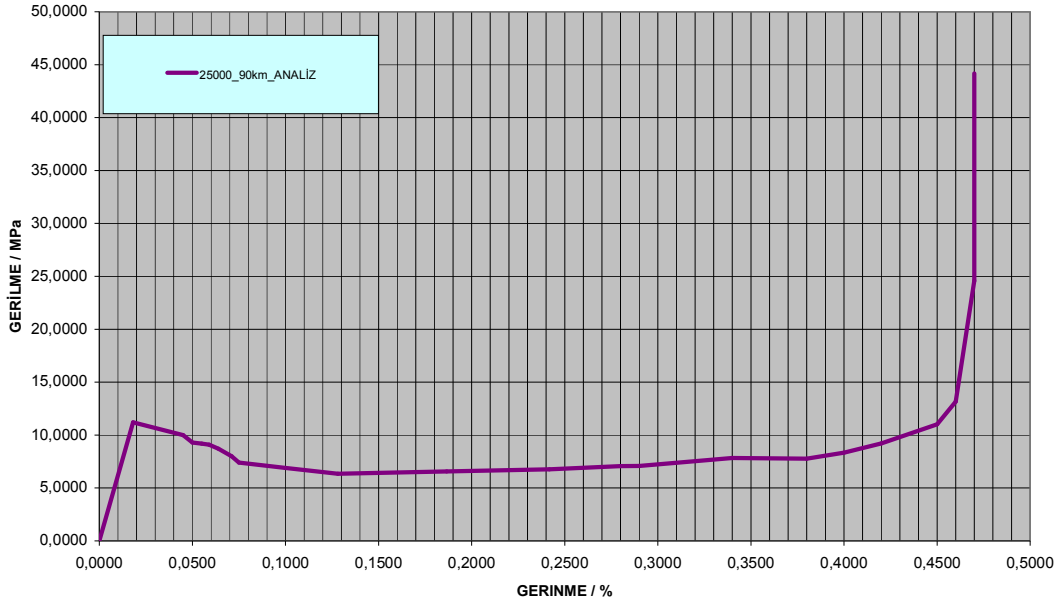
FARKLI HIZLAR İÇİN ANALİZ YÜK DEPLASMAN EĞRİLERİ



Şekil 4.98. 25000 mm/sn için analiz yük deplasman eğrileri

4.4.8.3. 25000 mm/sn için gerilme-gerinme eğrileri

FARKLI ÇARPMA HIZLARI İÇİN ANALİZ SONUÇLARI



Şekil 4.99. 25000 mm/sn için analiz gerilme – gerinme eğrileri

Hesaplama çalışması sonucunda elde edilen farklı hızlardaki yük deplasman eğrilerinin gerilme gerinme eğrilerine çevrilmesi sonucunda hız değerlerine bağlı olarak eğrilerin karakteristiklerindeki değişimler elde edilmiştir.

Çarpma analizi sırasında çeşitli deformasyon kademelerindeki gerilme dağılımları incelenmiştir. Burada önümüze çıkan önemli bir sonuç genel olarak gerinme değerlerinin malzemenin en çok sıkışan orta bandında olduğudur. McCullough ve ark. da (1999) yaptıkları çalışmada şekil 2.52’de görüldüğü üzere basma etkisi altındaki numune de Eksenel gerilme dağılımının orta bölgelerde olduğunu elde etmişlerdir. Şekil 4.42 ve şekil 4.51 incelendiğinde bu sonucun bu çalışmada elde edildiği görülmektedir.

Marraki ve Cylne de (2001) deneysel çalışmalarında aynı sonucu elde etmişlerdir. Şekil 2.39’da bu deformasyon bantları görülmektedir. Zeguid ve ark. (2002) şekil 2.63’de görüldüğü gibi basma altında aynı bölgeselleşme alanını elde etmişlerdir. Çalışmamızda elde edilen bu sonuçlar diğerlerinin birbirini desteklemesinden hareketle özellikle etrafı diğer hücrelerle sarılı gömülü hücrelerin hareket serbestliklerinin kenardaki hücrelere göre çok daha az olmasından dolayı plastik deformasyona çok daha çabuk uğradıkları ve bu sebeple ilgili çökmelerin öncelikle orta bölgelerde başladığı sonucu çıkartılabilir. Basma deneyi ve çarpma

deneyi çalışmamızda elde edilen deforme olmuş numune şekilleri de bu sonuçları desteklemektedir. Şekil 3.20’de basma için şekil.3.25’de ise çarpma için numune deformasyonları görülmektedir. Analizlerle de bu mekanizmaların elde edilmesi sonuçların doğruluğuna işaret etmektedir.

Zeguid ve ark.’nın 2002 yılında yaptıkları çalışmada köpük hücreler makro olarak modellenmiş ve gelişi güzel, sıralı opsiyonla dizilmiş hücre yapılarına göre benzetimler yapılmıştır. Bu mekanizmalarda da görüldüğü gibi (şekil 2.64. c) deformasyon mekanizması öncelikli olarak orta bölgelerde çalışmaktadır.

Evans ve ark. (1999) tarafından elde edilen gerinme haritası 2 boyutu yapılan çalışmada basma yükü altındaki kritik gerilme değerlerini göstermektedir. Sırası ile örneğin şekil 4.36 ve diğer hızlar için elde edilen eğriler incelenir ise bu kritik değerlerin orta bölgelerde yoğunlaştığı görülebilir.

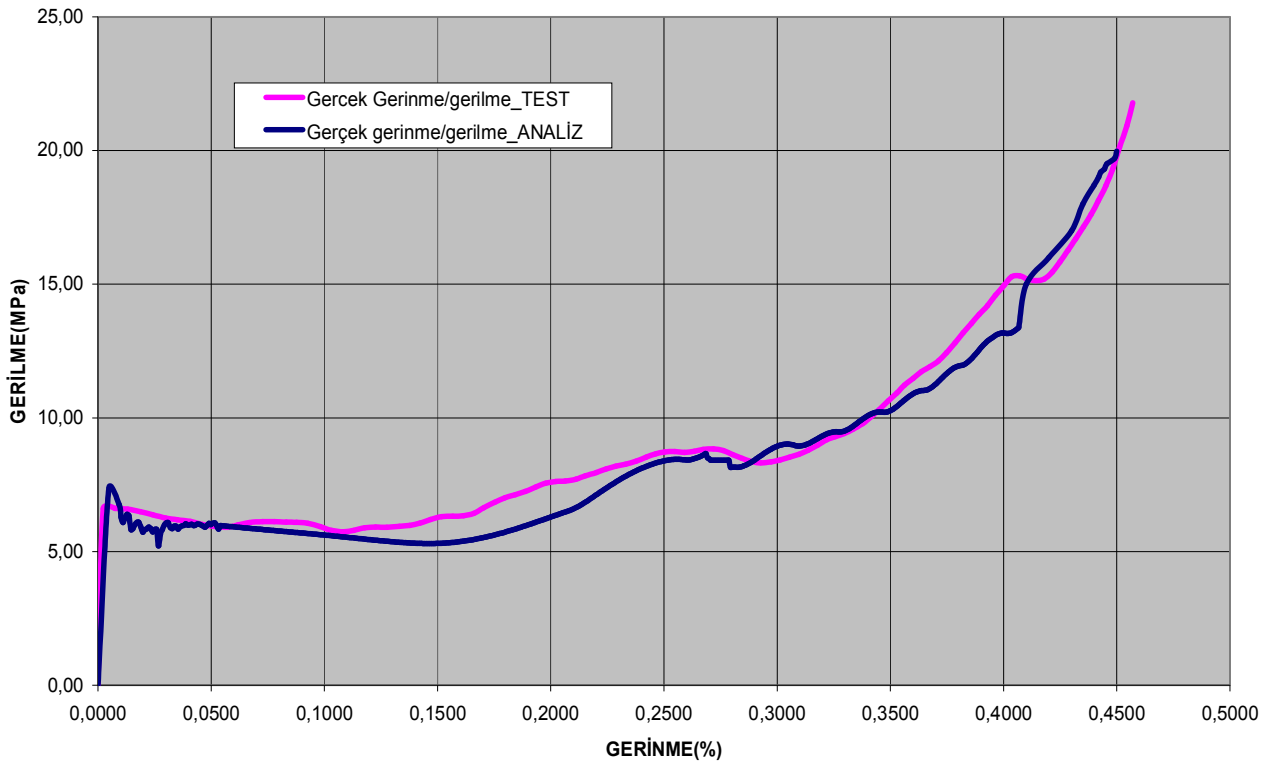
Zhoua ve ark. (2000) yaptıkları benzetim çalışmasında kurdukları 2 boyutu modelde farklı aşamalardaki gerinme dağılımlarını elde etmişlerdir. Bu çalışmadan ve Evans’ın çalışmasında görüleceği üzere 3 boyutlu model kurulması ve köpük metaller için analiz edilmesi daha zor olduğundan bazı araştırmacılar 2 boyutlu modeller kullanmaktadırlar. Bu eğilim yapılan çalışmanın kapsamına göre bazı durumlarda yeterli olmaktadır. Ancak bu çalışmalar neticesinde elde edilen değerler 3. boyutta meydana gelecek deformasyon mekanizmalarını içermedikleri için yanıltıcı sonuçlar verebilirler. Oka ve ark.’nın 2006 yılında yaptıkları çalışmada kurulan 2 boyutlu makro köpük modeli sonuçlarının elde ettikleri deneysel sonuçlardan yüksek deformasyon oranlarında farklı olmasının sebebi de bu mekanizmalardır. Buna ek olarak ilgili lineer olmayan mekanik özelliklerin doğru tespit edilip, uygun malzeme modelinin kullanılmaması da sonuçların farklı olmasına yol açmıştır. Bölüm 3.3’deki çizelge 3.8 ve 3.9’daki değerler bu bölümdeki sonuçların elde edilen test değerine çok yakın çıkması sonucu güvenilir değerler olarak belirtilebilirler. Şekil 4.100, şekil 4.101 ve şekil 4.102’de bu eğrilerin karşılaştırılmaları görülmektedir.

4.5 Çarpma Benzetimi ile Testlerin Karşılaştırılması ve Tartışma

4.4 bölümünde görülen farklı deformasyon kademelerindeki değerlerin test sonuçları ile karşılaştırılması 4.5 bölümünde yapılmıştır. Deneysel olarak gerçekleştirilebilen çarpma testlerini doğrulanması hesaplamalı çalışma ile gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırma grafikleri şekil 4.100, şekil 4.101 ve şekil 4.102’de görülmektedir.

4.5.1. 400 mm/sn için gerilme- gerinme eğrilerinin karşılaştırılması

400 mm/sn için TEST/ANALİZ GERİLME EĞRİLERİ



Şekil 4.100. 400 mm/sn için test ve analiz gerilme – gerinme eğrileri

Şekil 4.100’de 400 mm/sn çarpma hızı için elde edilen eğriler birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Özellikle düzlem gerilme bölgesindeki uyum sonuçların tutarlı olduğu sonucunu göstermektedir. Çarpma hızı arttıkça ilgili karşılaştırmalar daha fazla anlam kazanmaktadır. Şekil 4.101’deki 800 mm/sn ve şekil 4.102’deki 1600 mm/sn çarpma hızı değerlerindeki eğriler bu sonucu desteklemektedirler.

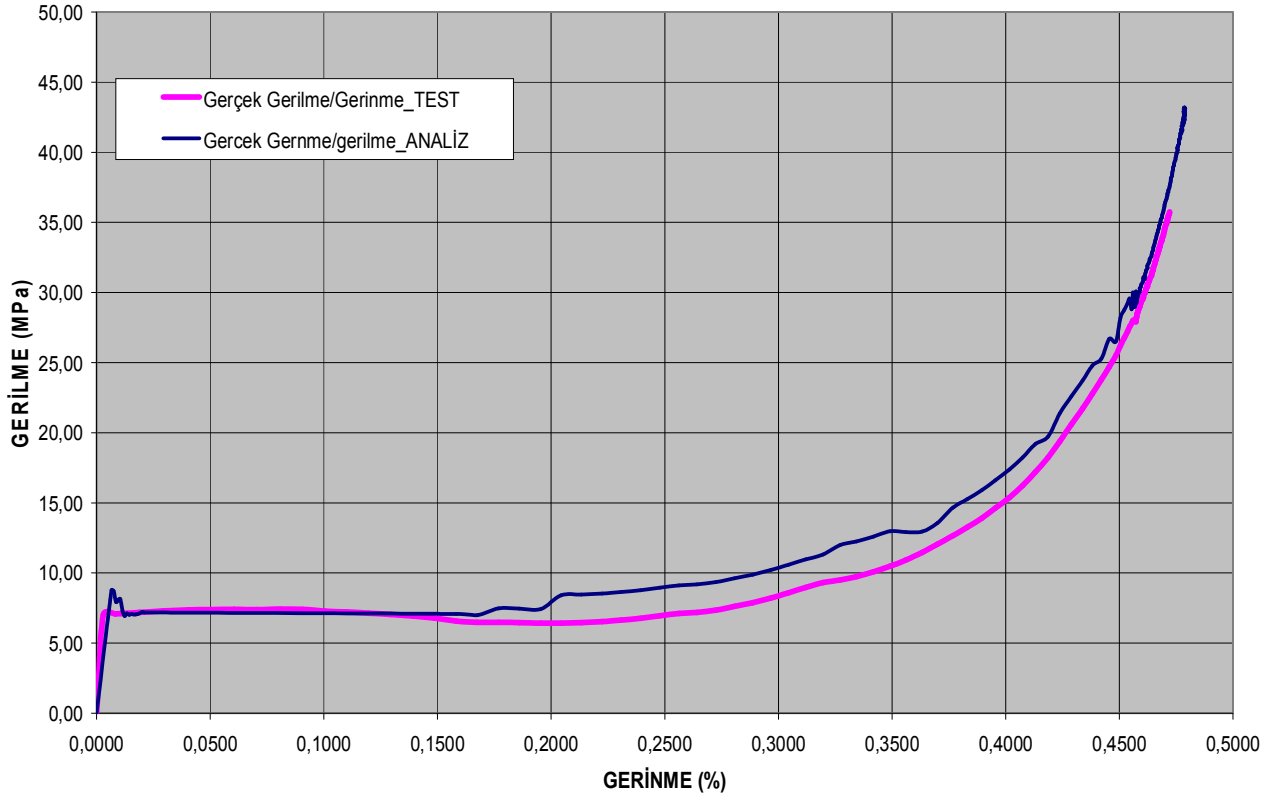
Öchsner ve Lamprecht (2003) yaptıkları deneysel ve benzetim çalışmasında basma davranışı altındaki Alüminyum köpük malzemenin gerilme gerinme eğrilerini çıkartmışlardır.

Bu eğrilerde deneysel ve benzetim çalışması arasında belirli bir miktar fark gözlenmektedir. Kullanılan malzeme modeli ve modelleme tekniği (1/8 model kullanılmıştır.) bunun sebepleri olabilir. Şekil 4.100, şekil 4.101 ve şekil 4.102’de bulunan değerler karşılaştırıldığında kullanılan malzeme modelinin doğruluğu açıkça görülmektedir.

Deneysel yöntem ve benzetim çalışmasıyla elde edilen bu eğrilerin karakteristikleri literatürdeki tipik gerilme gerilme eğrisi karakteristiğine uymaktadır. Şekil 2.60’da şematik gösterimi bulunan eğri buna örnek olarak verilebilir (Hayes ve ark. 2004)

4.5.2. 800 mm/sn için gerilme- gerilme eğrilerinin karşılaştırılması

800 mm/sn için TEST/ANALİZ GERİLME EĞRİLERİ



Şekil 4.101. 800 mm/sn için test ve analiz gerilme – gerilme eğrileri

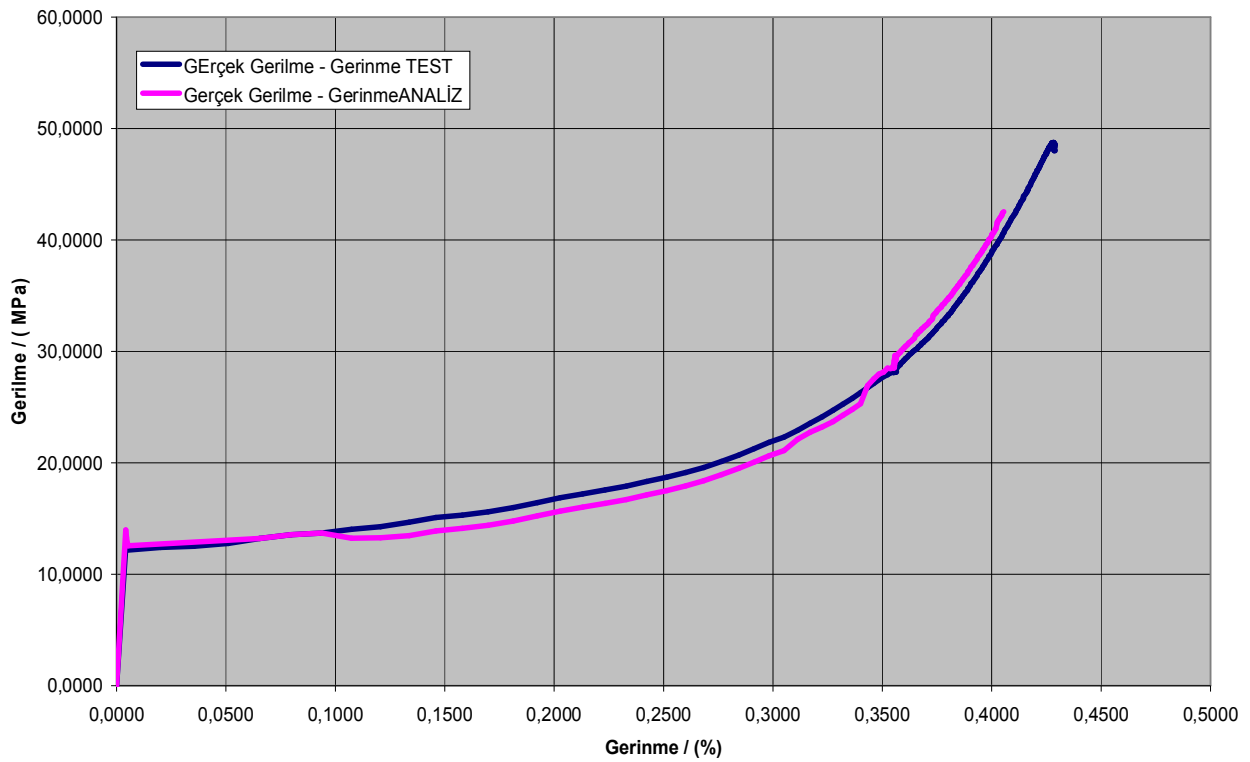
Elde edilmiş değerlerin birbirinden farklı çıkması için muhtemel sebepler aşağıda sıralanmıştır. Buna göre;

- Kullanılan malzeme modelinin gerçeği yansıtmaması
- Kullanılan malzeme modeli parametrelerinin yanlış ayarlanması
- Test ölçümlerinin yanlış yapılması

- Ölçülen değerlerin yanlış filtre edilmesi
- Ölçüm sıklığının doğru belirlenememesi ve hassasiyetin azalması
- Test ve benzetimdeki sınır şartlarının farklı olması
- Malzeme içindeki dağılımın aşırı düzensiz olması
- Benzetim çalışmasında yanlış temas algoritmalarının tanımlanması
- Benzetim çalışmasında yanlış zaman adımının seçimi

4.5.3. 1600 mm/sn için gerilme- gerinme eğrilerinin karşılaştırılması

1600mm/sn TEST /ANALİZ GERİLME EĞRİLERİ



Şekil 4.102. 1600 mm/sn için test ve analiz gerilme – gerinme eğrileri

Zeguid ve ark. 2002 yılında yaptıkları çalışmada test ile değişken yoğunlukta modellenen benzetim sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Kullanılan modelde makro olarak modellenmiş köpük yapısı için sabit yoğunluklu ve değişken yoğunluklu olmak üzere 2 farklı yapı karşılaştırılmıştır. Şekil 2.66'daki eğrilerde sabit yoğunluklu olarak kurulan makro modelin test sonuçlarından oldukça farklı olduğu görülmektedir. Bu modellemede dalgalanma oldukça fazladır. Dolayısı ile sönümlenen enerji dalgalanmalar sebebi ile yararlı şekilde kullanılamayacaktır. Gelişi güzel oluşturulmuş model ise test sonuçlarına daha yakın çıkmıştır. Analizlerimizde kullanılan mikro malzeme modeli gelişigüzel dağılım prensibine

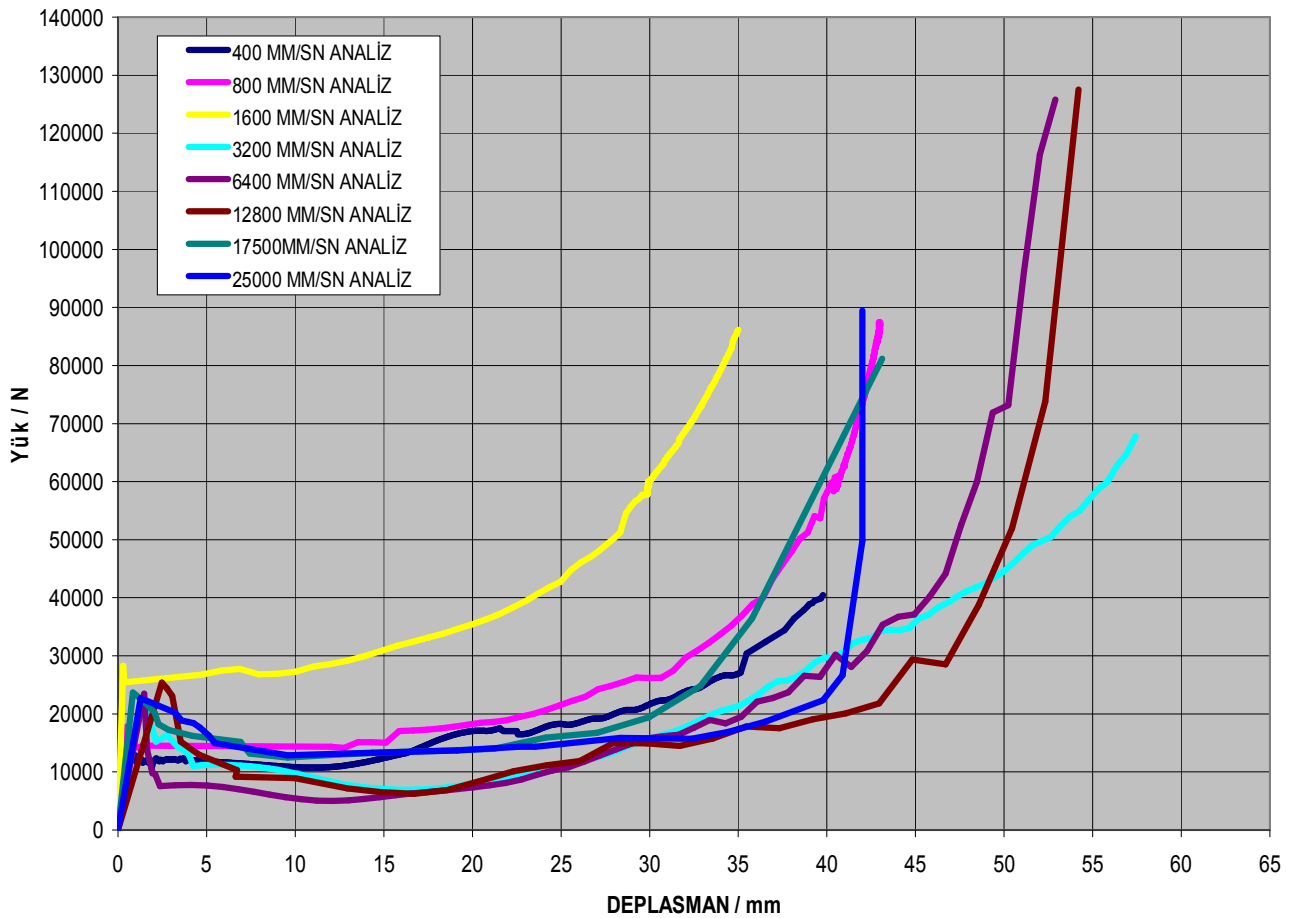
göre modellendiği için bu sonuçları kısmen Zeguid ve ark.'nın çalışması ile karşılaştırmak mümkündür. Ancak makro modellemenin aşağıda sıralanan dezavantajlarından dolayı sadece modele özel çözümlerde iyi sonuçlar verecektir. Buna göre;

- Elde edilen elektron mikroskobu görüntülerinden yaratılan hücre yapısının hatalı olma ihtimali
- Kapalı hücre yapısının bu teknikle modellenmesinin mümkün olmaması
- Makro model üzerinde kullanılacak olan malzeme modellerinin sınırlı olması
- Modelleme ve çözüm sürelerinin çok uzun olması

Sebepleri ile mikro model yöntemi çok daha hassas sonuçlar vermektedir. Benzer şekilde Oka ve ark.'nın (2006) yapmış oldukları deneysel ve hesaplamalı çalışmada da sonuçların özellikle ileri deformasyon bölgelerinde farklı çıkmasının sebepleri olarak ta yukarıdaki çıkarımlar kullanılabilir.

4.5.4 Hesaplanmış Sönümlenen enerji değerleri

FARKLI HIZLAR İÇİN ANALİZ YÜK DEPLASMAN EĞRİLERİ

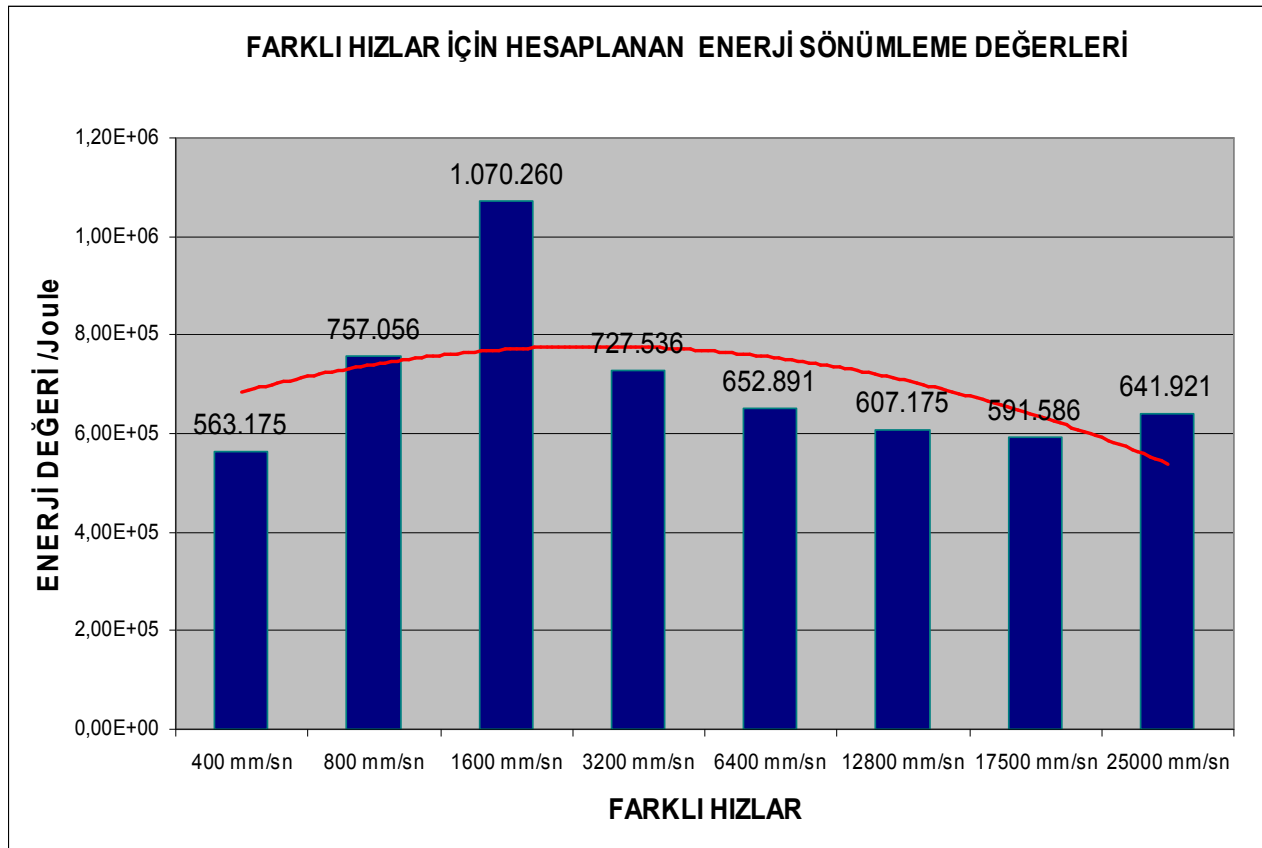


Şekil 4.103. Farklı için Analiz yük-deplasman eğrileri karşılaştırması

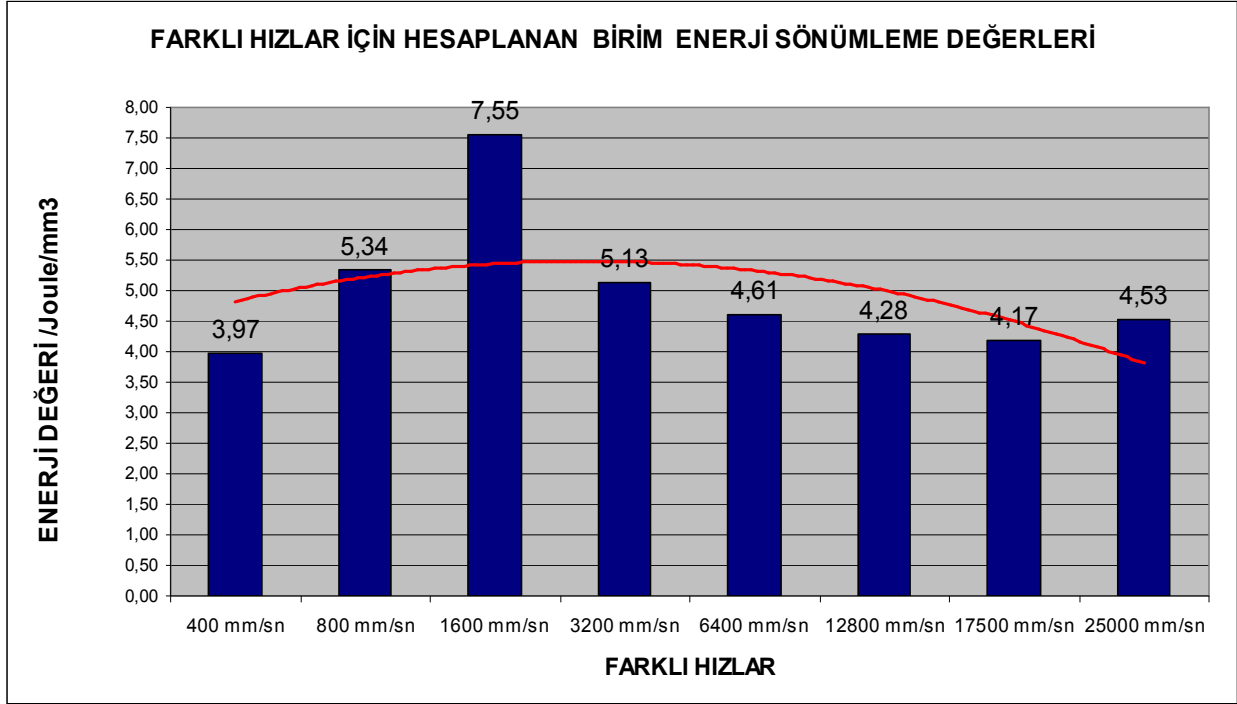
DeneySEL çalıma ve test verileri birbiri ile örtüştürüldükten sonra daha yüksek hızlar için elde edilen sonuçlara güvenilebilir. Şekil 4.103’de benzetim yöntemi ile elde edilen farklı hızlardaki yük deplasman eğrileri görülmektedir.

Eğrilerden anlaşıldığı ve beklendiği gibi belirli hızlara kadar çarpma enerjisinin sönümlenme kapasitesi artmaktadır. Bu değer 1600 mm/sn’lik hızda maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu hızın üzerine çıkıldığında değerler giderek azalmaktadır.

Bu eğrilerin altında kalan alan bölüm 3.5’de ve bölüm 4.2’de açıklanan yöntemler kullanılarak integre edilirse şekil 4.104’de görüldüğü gibi enerji sönümlenme kapasiteleri çarpma hızlarına bağlı olarak elde edilir. Bu elde edilen değerler m³ başına birim değerlere çevrildiğinde karşılaştırılabilir büyüklükler haline gelecektir (şekil 105).

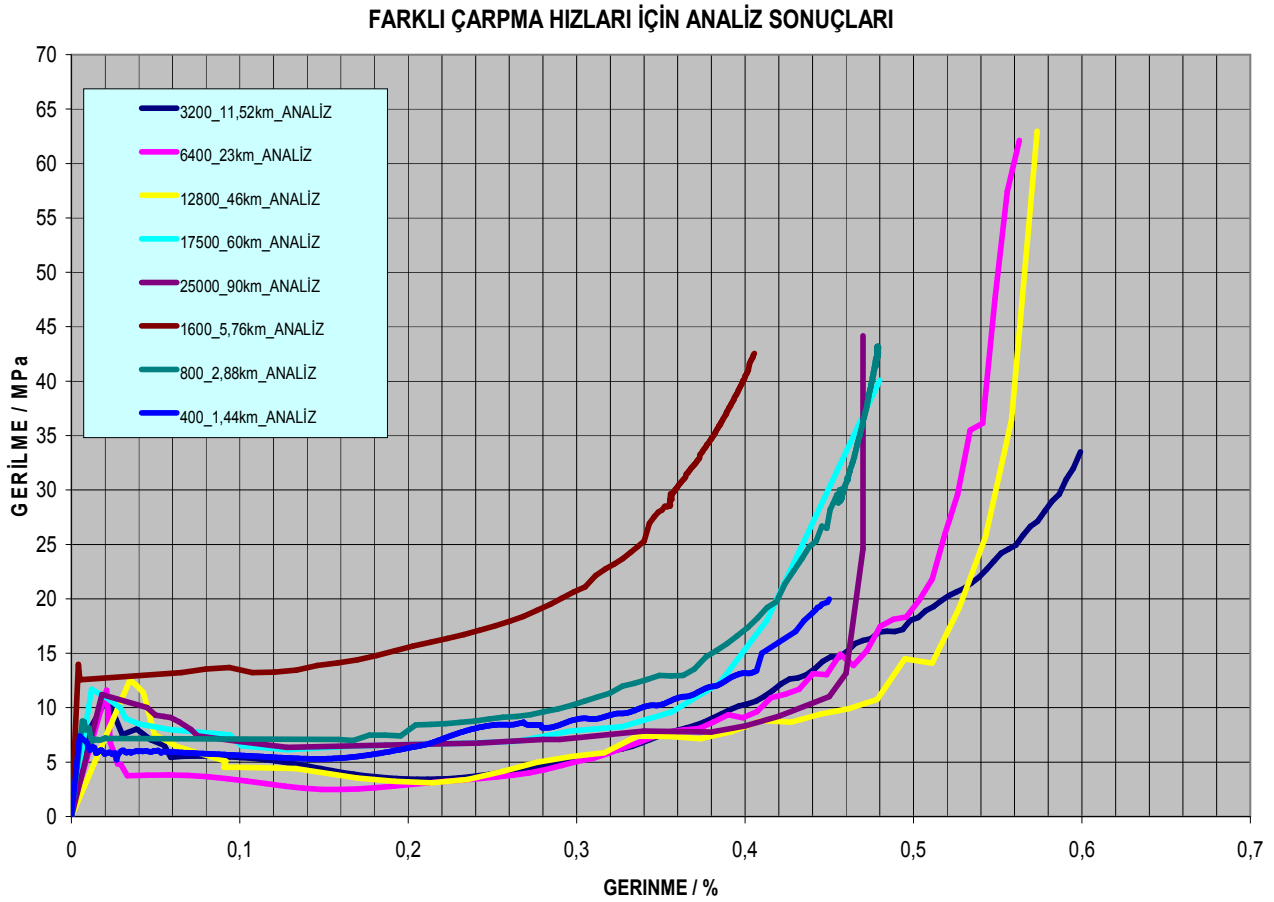


Şekil 4.104. Farklı için Sönümlenen enerji değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.105. Farklı için Sönümlenen birim enerji değerlerinin (m^3) karşılaştırılması

4.5.5. Hesaplanmış tokluk değerleri

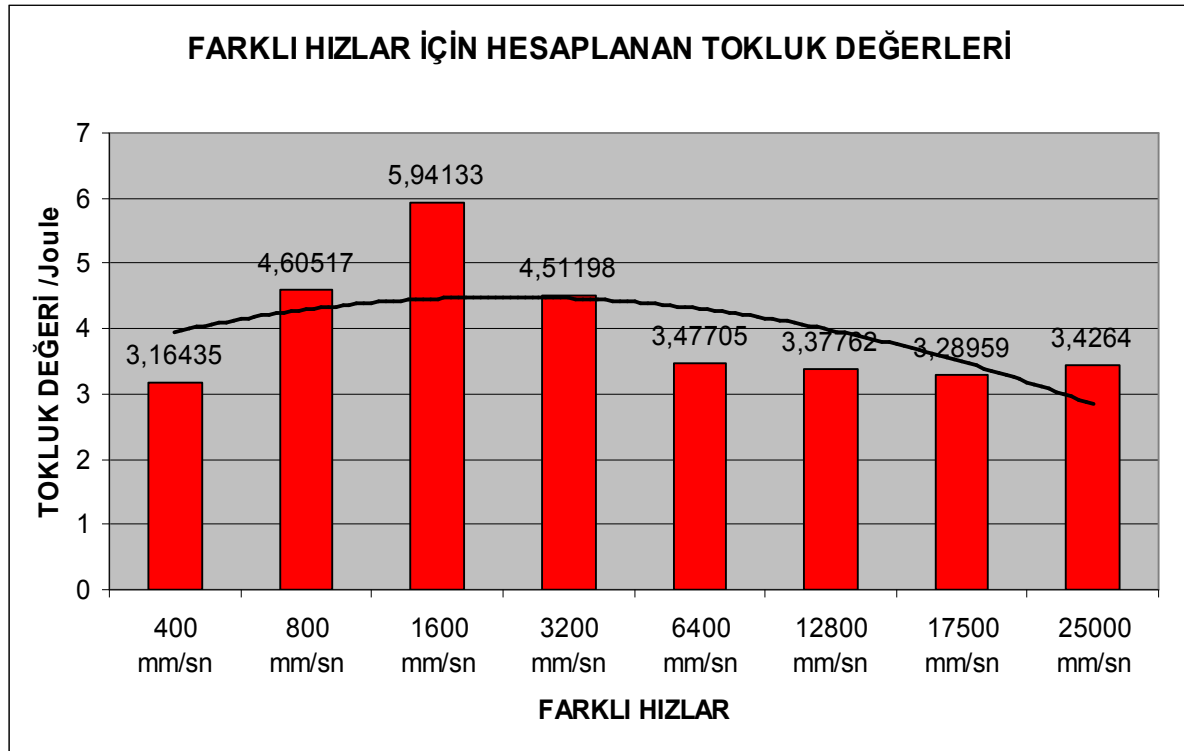


Şekil 4.106. Farklı hızlar için Analiz gerilme-gerinme eğrileri karşılaştırması

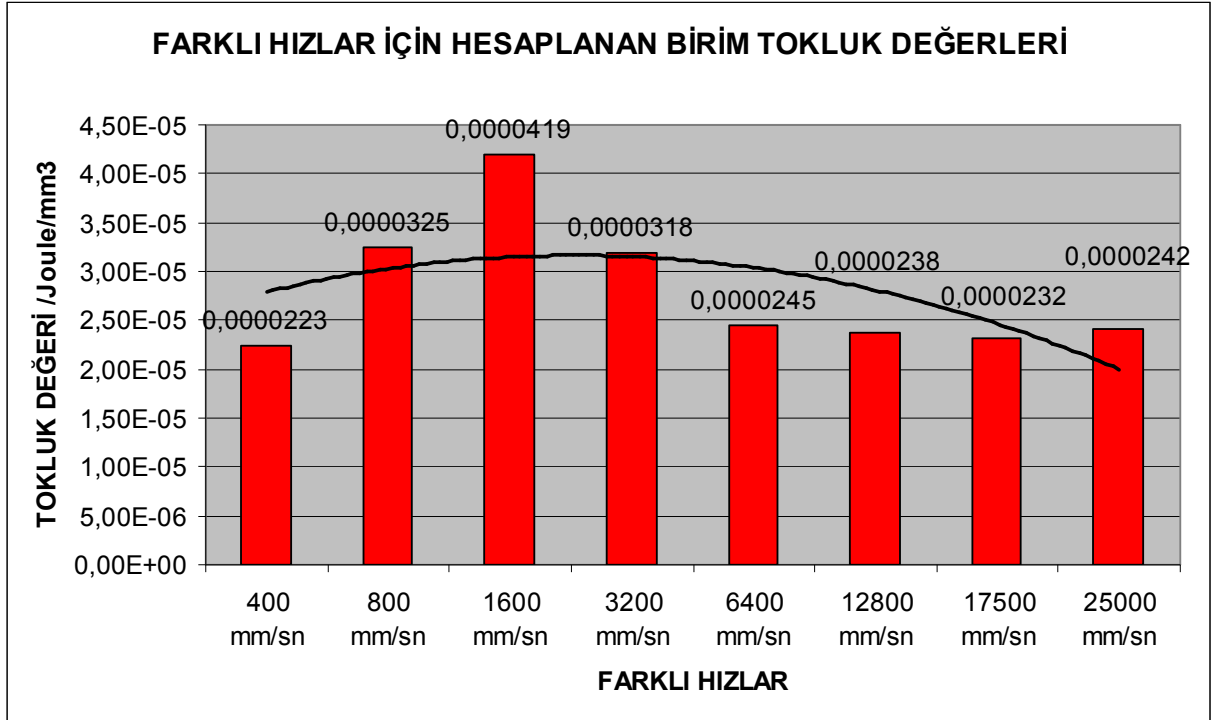
Şekil 4.103’de görülen karşılaştırmalı yük-deplasman eğrileri 2.2, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri kullanılarak gerilme gerilme eğrilerine çevrilerek, tokluğu farklı çarpma hızlarındaki değişimleri karşılaştırılmıştır.

Buradaki değerler şekil 4.105’deki değerler ile paralellik gösterecektir (Şekil 4.107). Şekil 4.105’deki gibi birim hacim başına tokluk değerleri birimine çevrilen karşılaştırma grafiği şekil 4.108’de görülmektedir.

Şekil 4.105 ve şekil 1.08’de elde edilen değerler genel olarak başka malzemelerin sönümleme değerleri ile tartışma bölümünde karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.107. Farklı hızlar için hesaplanan tokluk değerlerinin karşılaştırması



Şekil 4.108 Farklı hızlar için hesaplanan birim tokluk (m^3) değerlerinin karşılaştırması

4.5.6 Tartışma

Tez çalışması kapsamında elde edilen çıkarımların değerlendirmesi aşağıda görülmektedir;

- Basma testleri neticesinde elde edilen yük deplasman eğrilerinin gerçek gerilme gerinme eğrilerine çevrimi sırasında
- Yapılan çarpma sonucu enerji sönümlenme değerlerinin elde edilmesi sırasında 45mmX45mmX70 mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır. Birim hacim başına düşen enerji hesaplanırken, hacmin aynı kalması durumunda bile kesit alanının değişimi neticesinde elde edilecek sönümlenme değerlerinin farklı olacağı düşüncesi ile ilerleyen çalışmalar bu kapsamda yürütülebilir.
- Farklı alaşın elementlerinin bu sönümlenme değerlerine nasıl etki yapacağı ise diğer bir araştırma konusu olarak ele alınabilir.
- Tokluk eğrilerinden anlaşıldığı ve beklendiği gibi belirli hızlara kadar çarpma enerjisinin sönümlenme kapasitesi artmaktadır. Bu değer 1600 mm/sn'lik hızda maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu hızın üzerine çıkıldığında değerler giderek azalmaktadır. Bu değerlerin diğer alaşım elementlerinin katkısı ile göstereceği davranış ayrıca incelenebilmektedir.
- Özellikle pasif yolcu ve yaya güvenliğinde düşük hızlarda elde edilen enerji sönümlenme değerleri çalışma kapsamındaki hız aralığı içerisinde kalmaktadır. Buna bağlı olarak alüminyum köpük metallerin avantajları tekrar vurgulanmış olmaktadır.
- Tez çalışması neticesinde bu yöntemlerin nasıl kullanılacağı konusunda bir yol gösterici uygulama serisi bulunmaktadır.
- Elastisite modülünün tayininde kullanılan farklı test sistemlerinin hassasiyetlerinde zayıflık tez içinde önerilen yöntemler kullanılarak kapatılabilir ve aynı zamanda akademik çalışmalarda gerekli hassasiyet elde edilebilir.
- Elastisite modülünün tayininde sıcaklık etkisi de ele alınarak yeni çalışmalar yapılabilir.
- Elde edilen elastisite modülü içindeki plastik bileşenlerden ayrılmış, yalın elastik gerinme değerleri kullanılarak elde edilen değerler de sonrasında çalışmalara yol gösterecektir.

- Testlerin kıyaslanmasında ve test yapılmayacak durumlarda analiz yöntemlerinin kullanılması ve ilgili yöntemlerin tez içinde verilmesi diğer araştırmacılara da katılar sağlayacaktır.
- Benzetimler ve test çalışmaları arasında elde edilen veya muhtemel çalışmalar dikkat edilmesi gerekli hata kaynakları ise aşağıda sıralanmaktadır; ilerideki adımlar üzerinde çalışan araştırmacıların da bu hususlara dikkat etmeleri önerilmektedir.
 - Kullanılan malzeme modelinin gerçeği yansıtmaması
 - Kullanılan malzeme modeli parametrelerinin yanlış ayarlanması
 - Test ölçümlerinin yanlış yapılması
 - Ölçülen değerlerin yanlış filtre edilmesi
 - Ölçüm sıklığının doğru belirlenememesi ve hassasiyetin azalması
 - Test ve benzetimdeki sınır şartlarının farklı olması
 - Malzeme içindeki dağılımın aşırı düzensiz olması
 - Benzetim çalışmasında yanlış temas algoritmalarının tanımlanması
 - Benzetim çalışmasında yanlış zaman adımının seçimi

KAYNAKLAR

1. ANDREWS, E., SANDERS, W., GIBSON, L.J. 1999. Compressive and tensile behavior of aluminum foams. *Materials Science and Engineering A270*. p 113-124
2. ASHBY, M.F. , EVANS, A.G. , FLECK, N.A, GIBSON, L. J. , HUTCHINSON, J. W. , 2000, *Metal Foams: A Design Guide*.2000, Butterworth-Heinemann. p. 247
3. Anonim, 2006. Dynamic response,16th International ship and offshore structures congress,volume1
4. Anonim, 2006. MATLAB- Curve fitting toolbox 1,user's Guide, The Mathworks Inc. 7. baskı P- 2.9, 2.119
5. Anonim, 2007. MATLAB- Spline toolbox 3 ,user's Guide, The Mathworks Inc. 12. baskı
6. Anonim, 2007. BV 1040, Alman Deniz Kuvvetleri analiz şartnamesi, p,5-28
7. ANSYS Structural Analysis Guide. 1999. ANSYS Inc, Canonsburg, p950.
8. ANSYS Theory Manual. 1999. ANSYS Inc,Pitsburg.,6-1 – 6-3.
9. ANSYS Elements Manual. 1999. ANSYS Inc, Canonsburg. 3-21 – 4-50
10. ANSYS Elements Manual. 2007. ANSYS Inc, Canonsburg. 4-85 - 4-94
11. ANSYS Ls-DYNA Training Manual. 2003. ANSYS Inc, Chapter 1-14
12. ALULIGHT International GmbH, Outstanding Properties of Aluminium Metal Foams. www.alulight.com
13. "Boğaziçi Üniversitesi" İnternet Sitesi <http://www.mslab.boun.edu.tr/impactweb.pdf>, 2006
14. BANHART, J., 2001, , characterization and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, No, 46, p 559-632
15. BABALIK, F.C., 1997. Makina elemanları ve Konstrüksiyon örnekleri, Cilt 1., Uludağ Üniversitesi güçlendirme vakfı, Yayın no :17, s 29-33
16. BROTHERS, A.H., D.C. DUNAND. 2006. Amorphous metal foams. *Scriptica Materialia*, p.513-520
17. 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.
18. BEALS, J.T., THOMPSON, M.S. 1997. Denstiy gradient effects on aluminum foam compression behaviour, *Journal of Materials Science*. 32 p 3595-3600

19. BANHART, J. 2000. Metallic foams: challenges and opportunities. *Errofoam 2000*. p.13-20
20. BAKIOĞLU, M., KADIOĞLU, N., ENGİN, H. 2001. Mukavemet problemleri (Kısa teori ve problemler), Cilt 1, Beta Yayınevi, 5. baskı
21. 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
22. 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
23. CHANDRUPATLA, T.R., BELEGUNDU, A.D. 2002. Introduction to Finite Elements in Engineering. Prentice Hall. p.453
24. DEGISCHER, H.P., B. KRISZT. 2002. Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications. Wiley-Vch Verlag GmbH 69469 Weinheim. s 183-240
25. DEMİRCİ, H. 2004. Malzeme bilgisi ve muayenesi. Alfa yayınevi
26. DEMİRCİ, H. 2004. Mühendislik Malzemeleri. Alfa yayınevi
27. DEGISCHER, H.P. , 1997, Innovative light metals: metal matrix composites and foamed aluminum, *Materials and Design*, No,118, p, 221-226
28. EVANS, A.G, HUTCHINSON, J.W., ASHBY, M.F. 1999. Multi functionality of cellular metal systems. *Progress in Material science*. 43. p-171-221
29. FLECK, N.A., OLURIN, O.B., CHEN, C., ASHBY, M.F. 2001. The effect of hole size upon strength of metallic and polymeric foams. *Journal of the mechanics and Physics of Solids*. 49. p 2015-2030
30. FUGANTI, A., LORENZI, L., HANSSEN, G.A., LANGSETH, M. 2000. Aluminum Foam for Automotive Applications. *Advanced Engineering Materials*, No: 4. p 200-204
31. Fraunhofer Institute, 2007. FOAMINAL ‘Properties Overview and Design Guideline’ Version. 1.6
32. GIBSON, L.J. , ASHBY, M.F. , 1997, *Cellular Solids*, Second edition, Cambridge Universtiy Press, Cambridge, UK
33. GÜNAY, D.1993.Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri. Sakarya Üniversitesi Yayınları. s 236

34. HAN, F., CHENG, H., WANG, J., WANG, Q. 2004. Effect of pore combination on the mechanical properties of an open cell aluminum foam. *Scripta Materialia*. 50. p 13-17
35. 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
36. HAYES, M. A., WANG, A., DEMPSEY, M.B., Mc DOWELL, D.L. 2003. Mechanics of linear cellular alloys. *Mechanics of Materials*. P 01-23
37. http://www.instron.com.tr/wa/applications/test_types/impact/test_types.aspx
38. http://www.keramverband.de/brevier_engl/10/5/1/10_5_1_2.html
39. http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk71.html
40. “Instron Impact Testing Solutions” Internet Sitesi
41. “Instron, Malzeme Testi Çözümleri” İnternet Sayfası
http://www.instron.com.tr/wa/applications/test_types/flexure/default.aspx
42. KRETZ, R., HAUSBERGER, K. ve GÖTZİNGER, 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
43. KADAR, C., CHMEL, FRANTİSEK, RAJKOVITS, Z., LENDVAI, J., 2004, Acoustic emission measurements on metal foams, Elsevier, *Journal of Alloys and Compounds*, p 145-150
44. KENNEDY, A. R. , ASAVAVISITTCHAI., 2004, effect of ceramic particule additions of Foam expansion and stability in compacted Al-TiH₂ powder precursors, *Advanced Engineering Materials*, Vol.6, No.6, p 400 – 402
45. KUMAR, P., RAMACHANDRA, S., RAMAMURTY, U., 2003. Effect of Displacement-Rate on the Indentation Behavior of Aluminum Foam. *Materials Science and Engineering*, A347 330-337, p 333-334
46. LIU, P.Si 2004, Tensile fracture behavior of foamed metallic materials, *Materials Science and Engineering*, A 384, p 352-354
47. MARKAKI, A.E., CLYNE, T.W. 2001. The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminum-based foams. *Acta Materialia*. 49. p 1677-1686
48. MUKAI, T. 2005. Compressive Response of a Closed-Cell Aluminum Foam At High Strain Rate. *Scripta Materialia* 54 (2006) p. 533–537
49. McCULLOUGH, K.Y.G., FLECK, N.A, ASHBY, M.F. 1999. Uni axial stress-strain behavior of aluminum alloy foams. *Acto Mater*. 47. No.8. p 2323-2330

50. MONTANINI, R. 2005. Measurement of strain rate sensitivity of aluminum foams for energy dissipation. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 47, pp. 26–42, 2005
51. MORAIS, W. A., D'ALMEDIA, J.R.M., GODEFROID, B. 2005. Effect of the Fiber Reinforcement on the Low Energy Impact Behavior of Fabric Reinforced Resin Matrix Composite Materials. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. vol. 25. no. 4. pp. 325-328
52. MUNOZ, D. 2005. Design and Manufacture of A Cost Effective Instrumented Drop-Weight Impact Tester For Damage Assessment Of Composites. Florida State University (Engineering - Industrial & Manufacturing Engineering), Makale 153,
53. MATIJASEVIC, B. , BANHART, J., 2005, Improvement of Aluminum foam technology by tailoring of Blowing Agent, *Scripta Materialia*, Vol. 54, p 503 – 508
54. MUKAI, T. , KANAHASHI, H. , YAMADA, Y. , SHIMOJİMA, K. , MABUCHI, M. , NIEH, T.G. , HIGASHI, K. 1999, Dynamic Compressive behavior of an ultra light weight Magnesium Foam, Pergamon, S1359-6462 (99) 00186-4
55. MEGUID, S.A., CHEON, S.S., EI-ABBASI, N., 2002, FE modeling of deformation localization in metallic foams, Elsevier, *Finite Elements in Analysis and design*, No,38, p -631-643
56. O'NEILL, A.T. 2004. Development Of Closed Cell Metallic Foam Using Casting Techniques. Ph. D. Thesis, North Carolina State University, s1–88
57. OKA, S.H. , AVARİSLİ, O. , UĞUZ. A. 2006. Alüminyum Köpük Metalinin Basma Yükleri Altındaki Mekanik Davranışının İncelenmesi, OTEKON'06 3. Otomotiv Teknolojileri Kongresi. Bursa, 26–28 Haziran 2006, s. 269–274
58. OKA, S.H. , UĞUZ. A. 2008. Alüminyum Köpük Metalinin Darbe Karakteristikleri, OTEKON'08 4. Otomotiv Teknolojileri Kongresi. Bursa, 01-04 Haziran 2008, s. 317-323
59. OKA, S.H. , AVARİSLİ, O. , UĞUZ. A. 2004. Alüminyum Köpük Metalinin Basma Yükleri Altındaki Mekanik Davranışının İncelenmesi, OTEKON'04 2. Otomotiv Teknolojileri Kongresi. Bursa, 21-23 Haziran, 2004, s. 345–351
60. ONCK, P.R. , ANDREWS, E.W. , GIBSON, L.J. , 2001, Size effects in ductile cellular solids: Part I. Modeling, , *International Journal of Mechanical Sciences*, No, 43, p 681–699.
61. ÖCHSNER, A., LAMPRECHT, K., 2003. On the uni axial compression behavior of regular shaped cellular metals. *Mechanics Research Communications*. 30. p 573-579
62. PAPADOPOULOS, D.P. , KONSTANTINIDIS, I. Ch. PAPANASTASIOU, N. , SKOLLIANOS, S. , LEFAKIS, H. , TSIPAS, D.N. 2004, Mechanical properties of Al metal foams, *Materials Letters*, No. 58, p 2574 – 2578

63. POPOV, E.P. 1990. Engineering Mechanics of Solids. Prentice-Hall Inc., A division of Simon & Shuster Englewood Clifs, New Jersey 07632. p 61-66
64. RUAN, D., LU, G., CHEN, F.L ve SIORES, E., 2002. Compressive Behavior 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
65. SCHULTZ, O., DES LIGNERIS, A., HAIDER, O. ve STARKE, P., 1999. Fatigue Behavior, Strength and Failure of Aluminum Foam. Proceedings of the 1st International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam'99). Bremen (Germany), p379
66. SURESH, S. 1991. Fatigue of Materials. Cambridge University Pres.
67. SAN MARCHI. C., A. MORTENSEN. 2001. Deformation of open-cell aluminum foam. Pergamon. P.3959 – 3969
68. SHIGLEY, J.E, MISCHKE. 2001. Mechanical Engineering Design. Mc Graw Hill. Sixth Edition. P 1247
69. SAN MARCHI. C., A. MORTENSEN. 2001. Deformation of open-cell aluminum foam. Pergamon. P.3959 – 3969
70. SANDERS, W.S., GIBSON, L.J. 2003. Mechanics of hollow sphere foams. Materials science & Engineering A337. p 70 – 85
71. “The A to Z of Materials” Internet Sitesi
<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=2763>
72. “TWI-World Centre for Materials Joining Technology” İnternet Sitesi
73. T MIYOSHI. M. ITOH. 1999. Enhancement of Energy absorption in a closed-cell Aluminum by the modification of cellular structures. 41 (1999) p 1055-1060
74. THORNTON, B.H, C. L. Magee, Metall. Trans. A. 6A, 1253 (1975).
75. “The A to Z of Materials” Internet Sitesi
<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=2765>
76. TAUSCHER, H. 1983. Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı. MBEAE, Gebze.
77. “Technische Keramik” İnternet Sayfası
http://www.keramverband.de/brevier_engl/10/5/1/10_5_1_1.htm
78. “Technische Keramik” İnternet Sayfası

79. THOMSON, W.T, 1997. Theory of Vibration with applications, Chapman & Hill, 5. baskı
80. UÇAK, T. , MAHMUTYAZICIOĞLU, N. , ALTINTAŞ, S. 2006. Alüminyum köpük üretimi ve otomotiv endüstrisinde kullanım alanları, OTEKON'06 3. Otomotiv Teknolojileri Kongresi. Bursa, 26–28 Haziran 2006, s. 253–261
81. “Wikipedia, The Free Encyclopedia” İnternet Sayfası
http://en.wikipedia.org/wiki/Three_point_flexural_test
82. “Welcome to About.com” İnternet Sitesi
<http://composite.about.com/library/glossary/d/bldef-d1797.htm>
83. 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
84. ZHOU, J. , GAO, Z. , CUITINOB, A. M. , SOBOYEJOA, W.O. 2004, Effects of heat treatment on the compressive deformation behavior of open cell aluminum foams, Materials Science and Engineering, A 386, p 118 – 128
85. ZHIHUA, W. 2005.Studies On The Dynamic Compressive Properties Of Open-Cell Aluminum Alloy Foams. Scripta Materialia 54 (2006) p 83–87
86. ZHOU, J., SHROTRIYA, P., SOBOYEJO, W.O. 2004. Mechanisms and mechanics of compressive deformation in open-cell AL foams. Mechanics of materials. 36. p 781-797
87. 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, p5-7

ÖZGEÇMİŞ

S. Hakan OKA 11.04.1977 tarihinde Eskişehir’de doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini Eskişehir’de tamamladıktan sonra 1994 senesinde Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümünü kazanmıştır. 1 sene İngilizce hazırlık okuduktan sonra 1999 senesinde bu bölümden mezun olmuştur. 2000 senesinde aynı bölümde yüksek lisans eğitime başlamış olup, 2002 senesinde bu eğitimini tamamlamıştır. 2002 senesi eylül ayında aynı fakültede doktora öğrenimine başlayan S. Hakan OKA, Evli ve 1 kız çocuk babasıdır.