İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSTRÜZYON YÖNTEMİ İLE İMAL EDİLMİŞ Al / %15 SiCp MATRİSLİ KARMA MALZEMENİN DEFORMASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Alpay VARDAR

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : MALZEME ve İMALAT

HAZİRAN 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSTRÜZYON YÖNTEMİ İLE İMAL EDİLMİŞ Al / %15 SiCp MATRİSLİ KARMA MALZEMENİN DEFORMASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Alpay VARDAR

503051301

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 4 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 2007

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Şafak YILMAZ

Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Halit S. TÜRKMEN (İTÜ)

Yrd.Doç.Dr. Celaletdin ERGÜN (İTÜ)

HAZİRAN 2007

Öncelikle, bütün yaşamım boyunca yanımda oldukları ve verdikleri sonsuz destek için aileme teşekkürü zevkli bir borç bilirim.

Bu çalışmayı gerçekleştirme fikrini bana veren ve çalışma sırasındaki desteklerinden dolayı danışmanım Doç. Dr. Şafak YILMAZ'a, çalışmamda laboratuarlarından yararlanmama izin veren ve beni destekleyen İTÜ Malzeme Bilimleri ve Üretim Teknolojileri Uygulama Araştırma Merkezi Müdürü Prof. Dr. Onuralp YÜCEL'e, çalışmamın deneysel kısmını gerçekleştirdiğim TÜBİTAK UME'den Dr. Bülent AYDEMİR'e ve Dr. Sinan FANK'a, kimyasal analizlerimi hızla yapan İkitelli Organize Sanayi Bölgesi KOSGEB Laboratuar Müdürlüğü'ne ve yüksek lisans eğitimine başladığım ilk günden bu yana yanımda olan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mayıs 2007 Alpay VARDAR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
SEMBOL LİSTESİ xi
ÖZET xii
SUMMARY xiii

1. GİRİŞ VE AMAÇ 1

2. METAL MATRİSLİ KARMA MALZEMELER HAKKINDA BİLGİLER 3

2.1 . Karma Malzemelerin Tanımı ve Sınıflandırılması 3
2.1.1 . Metal Matrisli Karma Malzemelerde Takviye Malzemeleri 4
2.1.2 . Metal Matrisli Karma Malzemelerde Matris Malzemeleri 7
2.1.3 . Alüminyum Matrisli Karma malzemelerin Kullanım Alanları 10
2.1.3.1 . Uzay-Havacılık /Askeri Uygulamalar 11
2.1.3.2 . Otomotiv Uygulamaları 11
2.2 . Metal Matris Karma Malzemelerin Mekanik Özellikleri 12
2.2.1 . Matris Malzemesinin Etkisi 13
2.2.2 . Takviye Hacim Oranının Etkisi 15
2.2.3 . Takviye Boyutunun Etkisi 16
2.2.4 . Takviye Tipinin Etkisi 17
2.2.5 . Sıcaklığın Etkisi 18

3. SÜREKSİZ İKİNCİ FAZLAR İÇEREN MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN HESAPLANMASI 20

3.1 . Analitik Yöntemler 20
3.2 . Ampirik Yöntemler 20
3.3 . Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Katı Modeller 21
3.3.1 . Basit Kübik Dağılım (BK) 21
3.3.2 . Hacim Merkezli Kübik Dağılım (HMK) 21
3.3.3 . Yüzey Merkezli Kübik Dağılım (YMK) 22
3.3.4 . Sıkı Düzen Hekzagonal Dağılım (SDH) 23
3.4 . Voronoi Temsili Hacim Elemanları 23
3.4.1 . Basit Kübik Dağılım İçin Temsili Hacim Elemanı 23
3.4.2 . Hacim Merkezli Kübik Dağılım İçin Temsili Hacim Elemanı 24
3.4.3 . Yüzey Merkezli Kübik Dağılım İçin Temsili Hacim Elemanı 25
3.4.4 . Sıkı Düzen Hekzagonal Yapı İçin Temsili Hacim Elemanı 26

4. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA 28

4.1 . Malzeme 28
4.2 . İç Yapı 29
4.3 . Çekme Deneyi 31

5. SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ SONUÇLARI ve İRDELENMESİ 34

5.1 . Modelin Oluşturulması 34
5.1.1 . Küresel Elemanlar Kullanılan Model 36
5.1.1.1 . Sınır Şartları 36
5.1.2 . Voronoi Temsili Hacim Elemanları İçeren Birim Hücre Modelleri 37
5.2 . Analiz Sonrası Elde Edilen Değerler 39
5.2.1 . Elastik Analizlerin Sonuçları 39
5.2.2 . Plastik Analizlerin Sonuçları 58

6. SONUÇLAR 62

KAYNAKÇA 63

EKLER 66

ÖZGEÇMİŞ 78

KISALTMALAR

BK	:	Basit kübik
HMK	:	Hacim merkezli kübik
EY	:	En yüksek
HS	:	Hashin Shtrikman
HT	:	Haplin Tsai
MMK	:	Metal matrisli karma malzeme
ORT	:	Ortalama
UYG	:	Uygulanan gerilme
SDH	:	Sıkı düzen hekzagonal
STD	:	Standart
TEPS	:	Temas eden parçacık sayısı
YMK	:	Yüzey merkezli kübik

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1	Alüminyum matrisli karma malzemelerde kullanılan bazı takviyeler ve boyları……..	7
Tablo 2.2	Al alaşımlarının kimyasal kompozisyonları ve uygulamaları……..	9
Tablo 4.1	Karma malzemenin hacimce element yüzdeleri……..	28
Tablo 4.2	Karma malzemeye takviye eklenmeden önceki ağırlıkça yüzdeler……..	27
Tablo 4.3	Al 2024 ağırlıkça element yüzdeleri……..	27
Tablo 4.4	Al 2024 numunenin kimyasal analiz sonuçları……..	28
Tablo 4.5	Al 2024 ısıl işlemleri ve özellikleri……...	28
Tablo 4.6	Çizgi numarası ve çizgiye temas eden parçacık sayısı……..	29
Tablo 5.1	Al 2024 için elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri…….	33
Tablo 5.2	Analizlerde kullanılan düğüm noktası ve eleman sayıları….	38
Tablo 5.3	Elastik analiz sonuçları……..	39
Tablo 5.4	SDH için elastik analiz sonuçları……...	39
Tablo 5.5	Modellerinin 300 MPa gerilme için von Mises gerilmeleri ile ilgili değerleri…….....	54
Tablo 5.6	Modellerinin 300 MPa gerilme için hidrostatik gerilmeler ile ilgili değerleri……	55
Tablo 5.7	Voronoi temsili hacim elemanı modellerinin matris/toplam elastik enerji ve hacim oranları…….....	55
Tablo 5.8	Analiz edilen dağılımların parçacıkların şekil değişimi enerjisin hücrenin şekil değişimi enerjisine oranı……	56
Tablo 5.9	Analiz edilen dağılımlarda uygulanandan daha az gerilme taşıyan matris elemanların hacminin toplam matris hacmine oranı…….....	56
Tablo 5.10	Voronoi temsili hacim elemanları için elde edilen sonuçları…….. …….	52
Tablo B.1	Karma malzeme deney sonuçları……...	69
Tablo B.2	İncelenen dağılımların $d\sigma/d\Sigma$ – birim şekil değişimi grafiklerinin çizilmesinde kullanılabilinecek noktalar……..	70
Tablo B.3	İncelenen dağılımların $\sigma/\sigma_{0.2}$ – birim şekil değişimi grafiklerinin çizilmesinde kullanılabilinecek noktalar……..	71

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	Karma malzemelerini meydana getiren malzeme sınıfları…….	3
Şekil 2.2	Karma malzemelerin mekanik özelliğine matris alaşımının etkisi. %20 SiC kılcal kristal takviyeli (a) 7075 Al (b) 2124 Al (c) 6061 Al ve (d) 5083 Al matrisli karma malzemelerin gerilme şekil değişim eğrisi……...	13
Şekil 2.3	Takviyesiz (A) ve SiC kılcal kristal takviyeli (•) 2124 Al alaşımının havada yaşlanma davranışı……...	14
Şekil 2.4	Takviye hacim oranı ile (a) SiCp/2124 A1-T6 karma malzemenin elastiklik modülünün ve (b) $A1_2O_3$/A332 T5 karma malzemenin 250 °C'deki çekme özelliklerinin değişimi.	15
Şekil 2.5	Parçacık hacim oranı ile 6061 Al alaşımının çekme uzamasının değişimi……..	16
Şekil 2.6	Ekstrüze edilmiş farklı parçacık boyutuna ve temper koşuluna sahip takviyesiz A 356 ve % 15 SiC takviyeli A 356 alaşımının gerilme-şekil değişimi eğrileri…….	17
Şekil 2.7	Takviyesiz ve farklı tipte parçacık ile takviye edilmiş Al matrisli karma malzeme için oda sıcaklığı gerilme-gerçek deformasyon eğrileri……..	18
Şekil 2.8	(a) % 12-24 Al_2O_3 fiber/$A1_9Si_3Cu$ ve (b) %20 SiCp/A 356 karma malzemelerin elastiklik modülüne sıcaklığın etkisi…...	19
Şekil 2.9	Sıcaklığın fonksiyonu olarak özgül mukavemetin değişimi…..	19
Şekil 3.1	Hacim merkezli kübik dağılım……...	22
Şekil 3.2	Yüzey merkezli kübik dağılım……...	22
Şekil 3.3	Sıkı düzen hekzagonal dağılım……..	23
Şekil 3.4	a) Birim kübik dağılım b) Birim kübik için Voronoi temsili hacim elemanı……	24
Şekil 3.5	a) HMK hücre b) HMK hücre için Voronoi temsili hacim elemanı……..	25
Şekil 3.6	a) YMK hücre b) YMK hücrenin farklı dizilimi c) YMK hücre için Voronoi temsili hacim elemanı…….	26
Şekil 3.7	a) SDH hücre b) SDH hücre için Voronoi temsili hacim elemanı……..	27
Şekil 4.1	Karma malzemenin mikroyapı fotoğrafları a)500 büyütme b)1500 büyütme……	29
Şekil 4.2	Ekstrüzyona paralel çizgisel yoğunluk hesaplanmasında kullanılan çizgiler ve çizgilere temas eden parçacıklar……..	30
Şekil 4.3	Ekstrüzyona dik çizgisel yoğunluk hesaplanmasında kullanılan çizgiler ve çizgilere temas eden parçacıklar…….	30
Şekil 4.4	Ekstrüzyona 45^0 çizgisel yoğunluk hesaplanmasında kullanılan çizgiler ve çizgilere temas eden parçacıklar…….	31

Sayfa No

Şekil 4.5	Çekme numuneleri a)Al 2024 b)Karma malzeme c)Deney tertibatı ……..	32
Şekil 4.6	Al 2024-T351 Gerilme- Şekil Değişimi Diyagramı……...	32
Şekil 4.7	Karma malzemenin gerilme şekil değişimi eğrisi……..	33
Şekil 5.1	Malzeme özelliklerinin tanımlandığı pencere……	35
Şekil 5.2	Modelin ağ yapısı ile kaplandıktan sonraki görüntüsü……..	36
Şekil 5.3	Analiz edilecek birim hücreler ve yönleri a) BK, b) YMK, c) HMK…….....	36
Şekil 5.4	Hareketleri belirli bir yönde çift olarak tanımlanmış düğüm noktaları…….	37
Şekil 5.5	Hareketi belirli bir yönde sınırlandırılan yüzeyler……	37
Şekil 5.6	Analizlerde kullanılan Voronoi temsili hacim elemanı a)HMK b)YMK c)SDH……..	38
Şekil 5.7	Voronoi temsili hacim elemanlarının hücre içerisindeki yerleşimleri a) HMK b)YMK c) SDH……..	38
Şekil 5.8	SDH model oluşturulması……..	38
Şekil 5.9	Sonlu elemanlar analizinde kullanılan Voronoi hücre modelleri a) YMK [100] b) YMK [110] c) HMK [100] d) HMK [110] e) SDH [100]……..	39
Şekil 5.10	Modellerin için elastiklik modüllerinin kendi aralarındaki değişimi ile analitik ve ampirik yöntemleri ile elde edilen değerler ile karşılaştırılması……...	41
Şekil 5.11	BK takviye malzemesinin [100] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……..	42
Şekil 5.12	BK matris malzemesinin [100] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……..	42
Şekil 5.13	BK takviye malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……..……	43
Şekil 5.14	BK matris malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……..	43
Şekil 5.15	HMK matris malzemesinin [100] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……...	44
Şekil 5.16	HMK takviye malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……..	44
Şekil 5.17	HMK matris malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……..	45
Şekil 5.18	HMK takviye malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……..	45
Şekil 5.19	YMK takviye malzemesinin [100] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……..	46
Şekil 5.20	YMK matris malzemesinin [100] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……..	46
Şekil 5.21	YMK takviye malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……...	47

Sayfa No

Şekil 5.22	YMK matris malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……...	47
Şekil 5.23	SDH takviye malzemesinin von Mises gerilmesi dağılımı……	48
Şekil 5.24	SDH matris malzemesinin von Mises gerilmesi dağılımı…….	48
Şekil 5.25	SDH takviye malzemesinin [010] von Mises gerilmesi dağılımı……...	49
Şekil 5.26	SDH matris malzemesinin [010] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı……...	49
Şekil 5.27	SDH takviye malzemesinin [100] von Mises gerilmesi dağılımı……..	50
Şekil 5.28	SDH matris malzemesinin [100] von Mises gerilmesi dağılımı	50
Şekil 5.29	BK matris malzemesinin [100] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı……...	51
Şekil 5.30	BK matris malzemesinin [110] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı……...	51
Şekil 5.31	HMK matris malzemesinin [100] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı…….	52
Şekil 5.32	HMK matris malzemesinin [110] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı…….	52
Şekil 5.33	YMK matris malzemesinin [100] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı…….	53
Şekil 5.34	YMK matris malzemesinin [110] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı…….	53
Şekil 5.35	SDH matris malzemesinin [001] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı…….	54
Şekil 5.36	SDH matris malzemesinin [010] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı…….	54
Şekil 5.37	SDH matris malzemesinin [100] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı…….	55
Şekil 5.38	Küresel dağılımlı modellerin ve matris malzemesinin gerilme şekil değişimi grafiği……... ..……...	59
Şekil 5.39	Küresel dağılımlı modellerin ve matris malzemesinin gerilme şekil değişimi grafiği plastik alan 400-500 MPa arası……..	59
Şekil 5.40	İncelenen dağılımların $\sigma/\sigma_{0.2}$ – birim şekil değişimi grafikleri..	60
Şekil 5.41	İncelenen dağılımların $d\sigma/d\Sigma$ – birim şekil değişimi grafikleri.	60
Şekil 5.42	HMK Dağılım için anahtar noktaların konum ve koordinatları	66
Şekil 5.43	YMK Dağılım için anahtar noktaların konum ve koordinatları	67
Şekil 5.44	SDH Dağılım için anahtar noktaların konum ve koordinatları	68
Şekil C.1	Literatür ile Al numunelerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri……	72
Şekil C.2	Karma malzemenin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri…….	73

Sayfa No

Şekil C.3 İncelenen dağılımların ve karma malzemenin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri……. 74

Şekil C.4 İncelenen dağılımların ve karma malzemenin 400-500 MPa arası gerilme-birim şekil değişimi eğrileri……. 75

Şekil C.5 İncelenen dağılımların ve karma malzemenin $d\sigma/d\Sigma$ – birim şekil değişimi grafikleri…….. 76

Şekil C.6 İncelenen dağılımların ve karma malzemenin $\sigma/\sigma_{0.2}$ – birim şekil değişimi grafikleri…….. 77

SEMBOL LİSTESİ

b	:	Karakteristik yarıçap
E	:	Elastiklik modülü
E_C	:	Karma malzemenin elastiklik modülü
E_M	:	Matris malzemesinin elastiklik modülü
E_P	:	Takviye malzemesinin elastiklik modülü
G	:	Kayma modülü
K	:	Hacim modülü
q	:	Haplin Tsai yönteminde hesaplanan değer
r	:	Yarıçap
s	:	Takviye parçacığın en boy oranı
V_M	:	Matris malzemesinin hacım oranı
V_P	:	Takviye malzemesinin hacım oranı
υ	:	Poisson oranı
μ	:	Mikro

EKSTRÜZYON YÖNTEMİ İLE İMAL EDİLMİŞ Al / %15 SiCp MATRİSLİ KARMA MALZEMENİN DEFORMASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, %15.58 SiCp takviyeli karma malzemenin deformasyon davranışı, analitik, ampirik ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiş ve sonuçlar deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır.

Analitik olarak Hashin ve Shtrikman tarafından önerilen alt ve üst sınırlar yöntemi, ampirik olarak ise Haplin ve Tsai tarafından önerilen denklem elastiklik modülünü hesaplamada kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar çalışmasında ise ANSYS programı kullanılarak önce; basit kübik, hacim merkezli kübik ve yüzey merkezli kübik dağılımlar için [100] ve [110] olmak üzere iki doğrultuda elastik ve plastik analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Sıkı düzen hekzagonal dağılım için de [001], [010] ve [100] doğrultularında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucu %15.58 SiCp takviyeli karma malzemenin elastiklik modülü ve Poisson oranı değerleri saptanmış ve bu değerlerin bahsedilen doğrultulardaki değişimleri incelenmiştir. Hücrelerin içerisine Voronoi temsili hacim elemanları da yerleştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde birim hücreler için elde edilen sonuçlar yardımı ile hacimsel olarak ağırlıklandırılmış von Mises ve hidrostatik gerilme diyagramlar çizilmiştir. Bu grafikler kullanılarak anılan dağılımların karakteristikleri saptanmaya çalışılmıştır.

Deneysel çalışmada ise Al 2024 ve bahsedilen karma malzemeden çekme numuneleri ilgili TSE standardlarına uygun olarak hazırlanmıştır

Analitik, ampirik ve sonlu elemanlar yöntemleri ile elde edilen sonuçlar deneysek çalışma ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve ekstrüzyon yöntemi ile imal edilen karma malzemenin deformasyon davranışı incelenmiştir.

DEFORMATION BEHAVIOUR INVESTIGATION OF EXTRUDED Al/ 15 % SiCp METAL MATRIX COMPOSITE

SUMMARY

In this study, in order to investigate the deformation behaviour of 15 % SiCp metal matrix composite; analytical & empirical methods, finite element method and experimantal method are used.

Analytically the upper and lower bounds method by Hashin and Shtrikman is used and empirically Haplin and Tsai method is used to calculate elascitity modulus of the composite.

In the first, finite element analysisses, using the ANSYS software; elastical and plastical analysises of spherically particulated simple cell, face centered cubic and body centered cubic packings at [100] and [110] directions were performed firstly. With the results of these analysisses elasticity moduluses and poisson ratios of two different directions were calculated. Using the Voronoi representetive volume elements, elastical and plastical analysises of face centered cubic, body centered cubic packings at [100] and [110] directions and closed packed hexagonal packing at [100] direction were also performed. After these analysisses elasticity moduluses and poisson ratios of two different directions are calculated too. The aim of analysisses of Voronoi representetive volume elements were to investigate the convenience of them in mentioned packings. Weighted diagrams of von Mises and hydrodinamical stresses by the volume of the elements were drawn by the results obtained in finite element analysisses of mentioned packings. With these diagrams the characteristics of these packings were calculated.

In experimental investigation, tensile specimens of Al 2024 and 15% SiCp composite were prepared obeying the related TSE standarts.

1.GİRİŞ VE AMAÇ

Enerji, iletişim, ulaşım, havacılık, uzay gibi sivil ve askeri amaçlı sektörlerde güvenirlik ve ekonomik zorunluluklar ile kısmen de olsa çevresel kaygılar, mevcut özelliklerinin ötesinde daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelere olan gereksinimi artırmaktadır. Geleneksel malzemelerin doğal özellikleri ile gelecekte ileri teknoloji sistemlerin gereksinimlerini karşılamak gittikçe zorlaşmaktadır. Çözüm için ortaya çıkan yeni malzemeler karma yapılı olmaktadır. Bu tür karma malzemeler hem düşük hacimli üretimi olan uzay-havacılık, askeri alanlar gibi mühendislik uygulamaları hem de ticari uygulamalarda yaygın hale gelmektedir. Karma malzemeler arasında metal matrisli karma malzemelerin kullanımları özellikle son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır.

Metal matris karma malzemeler, tek bileşenli malzemelerle başarılamayan gerekli özellikleri sağlamak üzere en az biri metal (genelde metal alaşımı) diğeri takviye malzemesi (sürekli elyaf, kılcal kristal ve parçacık şeklinde genel olarak metaller arası bileşik, oksit, karbür veya nitrür bileşikleri) olan iki veya daha fazla farklı sistemin birleşimi ile elde edilen malzeme grubudur.

Bilindiği üzere, karma malzemelerin özellikleri sadece bileşenlerinin davranış özelliklerinden etkilenmemekte; bileşenlerin hacim oranı, biçimi, dağılımı ve boyutu gibi geometrik özelliklerinden de etkilenmektedir. Karma malzemelerin davranışı ancak iç yapının geometrik özellikleri de dikkate alındığında doğru olarak tahmin edilebilir. Geometrik özelliklerden takviye hacim oranı, takviye biçimi, takviye boyutu malzeme hazırlanırken kontrol edilebildiğinden kolaylıkla bilinebilmektedir. Takviye fazının dağılım geometrisi ise özellikle karma malzemenin imalatı sırasında oluşan malzeme akışından (ekstrüzyon, enjeksiyon vb. yöntemlerin uygulanması sonucu ortaya çıkan malzeme akışı) etkilenmekte, takviye akış doğrultusunda yönlenmekte ve dizilmektedir.

Bu çalışmada, ekstrüzyon yöntemi ile 15 mm çapında imal edilmiş hacim oranı %15.58 olan Al/SiC çubuğun deformasyon davranışı incelenmiştir. Karma

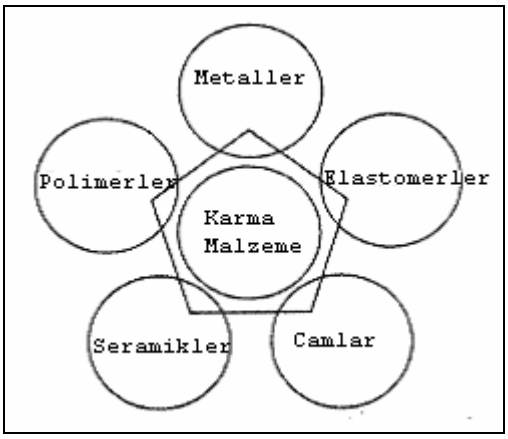
malzemenin gerilme-birim şekil değişimi davranışı çekme deneyi ile belirlenmiştir. Gerilme-birim şekil değişimi davranışının tahmin edilmesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bilindiği gibi sonlu elemanlar modelinde karma malzemenin takviye biçimi, dağılımı, hacim oranı kolaylıkla dikkate alınabilmektedir. Takviyenin dağılım geometrisinin etkisi değişik dağılımları temsil eden birim hücreler aracılığı ile takip edilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması yolu ile karma malzemenin imalatından etkilenen takviye dağılım geometrisinin karakteri analiz edilmiştir.

İncelenen konu ve yapılan çalışma devam ettirilmeye müsaittir, ileriki araştırmacılara yön gösterici olabilmek amacı ile modellerin oluşturulması, kullanılan sınır şartları ve analiz hakkında bilgiler detaylı olarak verilmiştir.

2. METAL MATRİSLİ KARMA MALZEMELER HAKKINDA BİLGİLER

2.1. Karma Malzemelerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Karma malzeme terimi, mekanik ve fiziksel özellikleri yönünden kendisini oluşturan bileşeninlerin üstün özelliklerini bir araya getiren malzemeler için kullanılmaktadır [1]. Karma malzemelerin, genel olarak kabul edilmiş tanımı olmamakla birlikte en geniş anlamda Karma malzeme; birden fazla farklı metal ve metal olmayan bileşenlerin bir arada toplanmış hali olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Karma malzemelerini meydana getiren malzeme sınıfları [2].

Karma malzemeyi oluşturan bileşenler, birbirleri içerisinde çözünmeyen farklı kimyasal bileşime sahiptirler. Karma malzeme, kendisini oluşturan bileşenlerin zayıf özelliklerini diğer bileşenin üstün özellikleri ile kapatırlar [3]. Bileşenlerin kimyasal ve yapısal özelliklerinin her ikisini de göz önünde bulunduran bir tanımlama şu şekilde yapılmaktadır; "Bir karma malzeme, birbiri içersinde çözünmeyen ve birbirlerinden farklı şekil ve/veya malzeme kompozisyonuna sahip iki veya daha fazla bileşenin karışımından veya birleşmesinden oluşan bir malzeme sistemidir" [3].

Karma malzemelerin üretiminde çok değişik takviye malzemeler kullanılmaktadır.

Takviye malzemesi şekline göre beş alt gruba ayrılmaktadır [1,4];

i. Sürekli elyaflar

ii. Süreksiz (Kısa) elyaflar

iii. Kılcal kristal (Whiskerler)

iv. Parçacıklar

v. Teller (metal)

Karma malzemeler, yapısal bileşenlerin şekline ve matris yapısına göre;

A. Takviye edildikleri yapısal bileşenlerine göre

- Elyaflı karma malzemeler: Lifler ile takviye edilmiş karma malzemeler,
- Levhasal karma malzemeler: Düz plakaların birleştirilmesiyle elde edilmiş karma malzemeler,
- Parçacıklı karma malzemeler: Parçacıklarla takviye edilmiş karma malzemeler,
- Doldurulmuş (veya iskelet) karma malzemeler: Sürekli bir iskelet matrisin ikinci bir malzemeyle doldurulması,
- Tabakalı karma malzemeler: Farklı bileşen tabakalarından oluşmuş karma malzemeler.

B. Matris malzemesine göre

- Seramik Matrisli Karma malzemeler
- Polimer Matrisli Karma malzemeler
- Metal Matrisli Karma malzemeler şeklinde sınıflandırılmaktadır [3];

2.1.1. Metal Matrisli Karma Malzemelerde Takviye Malzemeleri

Karma malzemeler üzerine yapılan ilk çalışmalar, sürekli elyaflarle takviye edilmiş (Al-Ti matrisli) malzemelerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Ancak (a) takviye malzemesinin pahalı olması (660 $/kg borkarbür elyaf), (b) karma malzemenin mikroyapısal homojensizliği ve elyaf yönlenmesine bağlı olarak özelliklerin anizotropikliği (c) yapıda elyaf/elyaf teması (d) aşırı ara yüzey reaksiyonları ve (e) üretim proseslerinin laboratuar koşullarına gereksinimi gibi üretim ile ilişkili problemlerden dolayı elyaf takviyeli metal matrisli karma malzemelerin geniş endüstriyel kullanımı engellenmektedir ve bu malzemelerin etkin kullanımı, askeri ve diğer oldukça özel uygulamalarla sınırlıdır [3,4]. Kılcal kristal takviyesinin ise (a) yine üretimi ile ilişkili olarak yüksek fiyatı, (b) düzensiz yüzey ve kusurlu iç yapılarının gözlenmesi ve (c) maksimum/minimum çaplan arasındaki oranın

minimum olması nedeniyle asbestosa benzer sağlık sorununa sebep olmasından dolayı ticari kullanımı azalmaktadır [5].

Ancak parçacık takviyeli karma malzemeler (a) takviye malzemelerin kolay üretilebilmesi ve uygun maliyette (SiC parçacık fiyatı 4.85 $/kg) çeşitli takviye parçacıklarının mevcudiyeti (b) tekrarlanabilir mikroyapı ve dolayısı ile aynı özelliklerde karma malzeme üretimini sağlayan proseslerin gelişimi (c) süreksiz takviyelerle üretilen karma malzemelerin dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi standart veya standarda yakın metalurjik proseslerle şekillendirilebilmeleri ve (e) hemen hemen izotropik özellikler göstermelerinden dolayı günümüzde önemli oranda ilgi çekmektedir. Sürekli elyaf yerine parçacık şeklinde takviye malzemesinin seçiminin temel sebebi karma malzemenin imalat maliyetini azaltmaktır [5]. Ancak elyaf takviyeli karma malzemelere kıyasla, parçacık takviyeli karma malzemelerde mukavemetteki iyileşme azdır [5]. Parçacık takviyeli karma malzemelerin mukavemeti (i) parçacık ve takviyenin dayanımına, (ii) parçacıklar arası mesafeye ve dolayısı ile parçacık boyutuna (iii) takviyenin hacim oranına ve (iv) matris/takviye ara yüzeyindeki bağın dayanımına bağlıdır [6]. Takviye malzemelerin seçimini etkileyen kriterler şunlardır [3,4,5];

i. Elastiklik modülü
ii. Çekme mukavemeti
iii. Yoğunluk
iv. Takviye parçacığın şekli ve boyutu
v. Isıl kararlılık
vi. Isıl genleşme katsayısı
vii. Kimyasal kararlılık
viii. Maliyet

Karma malzeme yapısal amaçlı uygulamalar için kullanılacaksa, yüksek mukavemetli, yüksek elastiklik modülüne sahip ve düşük yoğunluklu takviye malzemelerine gereksinim artar. Sivri köşeli parçacıklar yerel gerilme yığılmasını artırdığı ve sünekliği düşürdüğü için parçacık şekli önemlidir. Eğer karma malzeme ısıl uygulamalarda kullanılacaksa ısıl genleşme katsayısı ve ısıl iletkenlik katsayısı da önemli olmaktadır.

Karma malzeme üretimi açısından takviye seçiminde bazı zorluklarla karşılaşılmaktadır. Örneğin; karma malzeme üretim yönteminde iki temel yöntem

vardır; toz metalürjisi ve döküm yöntemleri. Toz metalürjisi yönteminde, matris alaşım tozu, homojen karışım elde etmek için takviye parçacıkları ile karıştırılır. Karıştırmadan sonra topaklanma kalmaması için metal ve seramik tozlarının boyutları dikkatle seçilmelidir. Döküm parçacık dağılımını sağlamak için uygun boyut oranı, kullanılan karıştırma işlemine bağlıdır. Döküm karma malzeme üretim yöntemleri için farklı değişkenler söz konusudur. Bu işlemlerin bazısında, seramik parçacıklar, sıvı alaşım matrisle oldukça uzun süre temas halinde kalırlar. Bu durum iki bileşen arasında reaksiyonun oluşumuna yol açar. Takviye malzemelerinin reaksiyona girmesi karma malzemenin özelliklerini önemli bir şekilde etkilediğinden takviye malzemesinin seçimi, matris alaşımı ve üretim değişkenleri (süre ve sıcaklık gibi) göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Büyük parçacıklar sıvı içerisine kolaylıkla ilave edilebilmelerine rağmen özgül ağırlıklarına bağlı olarak çökme eğilimi gösterirse, segregasyona uğramış döküm yapısına sebep olabilir. Öte yandan, ince parçacıklar sıvının viskozitesini artırarak üretimi zorlaştırırlar [5].

Belirli bir uygulama alanında kullanılmak üzere en uygun karma malzemeyi elde edebilmek için karma malzeme bileşenleri hakkında tam ve ayrıntılı bilgiye sahip olmak gerekmektedir. Takviye malzemesinin cinsi, şekli, boyutu ve boyut dağılımı, yüzey özellikleri, kimyasal bileşimi ve homojenliği gibi yapısal özellikleri çok önemlidir. Takviye malzemesi olarak kullanılan metalik teller, seramik elyaflardan daha sünektir. Metalik tellerin matris alaşımına takviye edilmesinin amacı, sünek, aynı zamanda yüksek mukavemetli ve yük taşıyabilen karma malzemelerin üretilmesidir. Günümüzde, çelik tel, üzerinde en çok çalışılan takviye malzemesidir. Ancak metalik tellerin en büyük dezavantajı, yoğunluklarının seramik takviye malzemesinden (berilyum teli hariç) yüksek olmasıdır [1]. Teller dışında takviye malzemeleri, genelde elyaf, kılcal kristal ve parçacık şeklindeki oksit, karbür ve nitrür bileşimindeki seramik malzemelerdir. Çok sık kullanılan takviye malzemesi SiC ve Al_2O_3 tür [5].

İri seramik malzemeler, yüksek sıcaklık ve/veya aşırı korozif ortamlara çok uygun olmalarına karşın, yük altında gevrek davranış göstermeleri bu malzemelerin kullanım alanlarını sınırlamaktadır [7,8]. Son yıllarda iri seramik malzemelerin mekanik özelliklerini ve özellikle tokluğunu iyileştirmek için seramik matrisli karma malzemelerin kullanımı gündeme gelmiştir [11]. Bunlarda takviye malzemesi olarak genelde elyaf şeklindeki malzemeler kullanılmıştır. Seramik matrisli karma

malzemelerin tokluğunun artmasındaki en önemli etken, takviye malzemesi olarak kullanılan elyafın çatlak ilerlemesini engellemesi ve geciktirmesidir [7,8].

Tablo 2.1. Alüminyum matrisli karma malzemelerde kullanılan bazı takviyeler ve boyları [6]

Takviye	Tane Boyutu (μm)	Takviye	Tane Boyutu (μm)
Alümina parçacıkler	3-200	Magnezya	40
SiC parçacıkleri	6-120	Kum	75-120
SiC viskerleri	5-10	TiC parçacıkları	46
Grafit lameller	20-60	Boron nitrit parçacıkları	46
Grafit lameller	15-100	Silisyum nitrit parçacıkları	40
Mika	40-180	Çil demir	75-120
Silika	5-53	Zirkonya	5-80
Zirkon	40	Titan	5-80
Cam parçacıkları	100-150	Kurşun	-
Cam boncuk	100		

2.1.2. Metal Matrisli Karma Malzemelerde Matris Malzemeleri

Metal matris karma malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak çok değişik metal ve metal alaşımları kullanılmaktadır. Matris olarak kullanılan metal, takviye elemanını bir arada tutmaya yarayan bir bağlayıcı gibi davranır ve işlevi takviye malzemesine yükü iletmektir. Yükün iletilmesi, matris ve takviye elemanı arasındaki ara yüzeye bağlıdır ve iyi bir ara yüzey bağı oluşumu da matris, takviye tipi ve üretim tekniği ile ilişkilidir. Takviye malzemelerinin seçim kriteri olarak kimyasal bileşim, geometrik düzen, mikroyapı, fazların fiziksel/mekanik özellikleri ve maliyet gibi karakteristikler dikkate alınırken, matris için oksidasyon direnci, korozyon direnci, yoğunluk, mukavemet, süneklik/tokluk önemli olmaktadır [1]. Genel olarak Al, Ti, Mg, Ni, Cu, Pb, Fe, Ag, Zn, Sn ve süper alaşımlar matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bunlardan Al, Ti ve Mg alaşımları daha geniş kullanım alanına sahiptir [1,4,6].

Son yıllarda üstün mekanik özelliklere, düşük elektrik iletkenliğe, düşük yoğunluğa, yüksek korozyon direncine ve diğer hafif metallere (Mg gibi) göre düşük maliyete

sahip olmalarından dolayı (1.5$/kg) matris alaşımı olarak Al alaşımlarının kullanımı hızla artmaktadır [1,3]. 2xxx , 5xxx, 6xxx, 7xxx ve ayrıca ıslatılabilirlik karakteristiğinden dolayı 8xxx Al alaşımları çok yaygın bir şekilde karma malzeme üretiminde kullanılmaktadır. 7xxx Al alaşımı havacılık uygulamaları için istenen düzeyde mukavemet ve tokluk kombinasyonları sergilemektedir. 7xxx Al alaşımı ve takviye elemanı arasında gelişen ara yüzey reaksiyonları karma malzemenin mukavemetini azaltmaktadır, 6xxx alaşımı ise orta mukavemet değerleri göstermesine rağmen karma malzeme üretiminde kolaylık sağladığı ve diğer alaşımlara göre daha yüksek korozyon direncine sahip olduğu için matris alaşımı olarak tercih edilmektedir fakat buna rağmen 2xxx alüminyum alaşımları havacılık uygulamaları için yaygın olarak tercih edilmektedir [1,3]. Mg ve Li gibi reaktif alaşım elementleri içeren Al alaşımları takviye fazı ile iyi bir bağlanma oluşturduğu için ideal bir matris malzemesi olmaktadır [1].

Titanyum ve titanyum alaşımları, yüksek sıcaklık mukavemetini koruyabilme özelliğinden dolayı uçak motorlarında, kompresörlerin kanat ve disklerinde kullanılmaktadır [1]. Titanyum alaşımlarının metal matrisli karma malzeme üretiminde matris malzemesi olarak tercih edilmesi üretilen karma malzemenin yüksek sıcaklıklarda kullanımını sağlamaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılacak metal matrisli karma malzemelerin üretiminde çoğunlukla titanyum ve titanyum alaşımları tercih edilmektedir.

Tablo 2.2. Al alaşımlarının kimyasal kompozisyonları ve uygulamaları [4].

Metal	Kimyasal Kompozisyon	Özellik
1000 Serisi Alaşımsız Al	>99.00 Al (ağırlıkça)	Yüksek süneklik ve iletkenlik
2000 Serisi Ana ilave Cu	Al + 4 Cu + Mg, Si, Mn	Kuvvetli yaşlanma sertleşmesi alaşımı
3000 Serisi Ana ilave Mn	Al + 1 Mn	Orta mukavemet ve yüksek süneklik, mükemmel korozyon direnci
4000 Serisi Ana ilave Si	Al + 11 Si	Döküm alaşımı : Kum ve kalıba döküm
5000 Serisi Ana ilaveler Mg+Si	Al + 3 Mg 0.5 Mn	Kuvvetli iş sertleşmesi, kaynaklanabilir alaşım
6000 Serisi Ana ilaveler Mg+Si	Al + 0.5 Mg 0.5 Si	Orta dayanım, yaşlanma sertleşmesi,
7000 Serisi Ana ilaveler Zn+Mg	Al + 6 Zn + Mg, Cu, Mn	Kuvvetli yaşlanma sertleşmesi alaşımı
8000 Serisi Diğer elementler; örn Li	Al + 3 Li	Düşük yoğunluk ve iyi mukavemet

Metal matrisli karma malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılmakta olan diğer bir matris malzemesi de Mg ve alaşımlarıdır. Mg matrisli karma malzemeler piston malzemesi ve motor parçalarında kullanılmaktadır. Mg alaşımları, düşük genleşme katsayısı, yüksek mukavemet özellikleri ve düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle havacılık uygulamalarında da kullanılmaktadır [1,4]. Tablo 2.2, karma malzemelerin üretiminde kullanılan bazı matris alaşımları ve bu alaşımların mekanik özelliklerini göstermektedir.

Metal matrisli karma malzemeler;

- **i.** Yüksek elastiklik modülü
- **ii.** Yüksek mukavemet (çekme ve basma)
- **iii.** Yüksek sürünme direnci
- **iv.** Yüksek aşınma direnci
- **v.** Metallerin süneklik ve tokluk, seramiklerin mukavemet ve aşınma direnci özelliklerini bir araya getirme
- **vi.** Düşük yoğunluk
- **vii.** Tekrar üretilebilir mikroyapı ve özelliklere sahip olma

viii. Yüksek sıcaklık mukavemeti

ix. Sıcaklık değişiklikleri ve ısıl şoka karşı düşük hassasiyet (Düşük ısıl genleşme katsayısı) gibi

olumlu özelliklerinden dolayı ticari olarak geniş kullanım alanı bulmuştur. Bunların yanında metal matris karma malzemelerin dezavantajları ise;

i. Düşük süneklik

ii. Düşük yorulma direnci

iii. Çok karmaşık ve pahalı üretim metotları

olarak sınıflandırılabilir.

2.1.3. Alüminyum Matrisli Karma malzemelerin Kullanım Alanları

Al metal matrisli karma malzemelerin başlıca kullanım alanları uzay-havacılık/askeri uygulamalar ve otomotiv endüstrisidir. Son yıllarda ayrıca elektronik sanayinde süper iletken kabloların yapımında ve spor malzemelerinde MMK'ler kullanılmaktadır.

MMK malzemeler matris alaşımlarından daha pahalı olduklarından genelde mukavemet ve elastik modül kazanımının yüksek maliyete üstün geldiği uygulamalarda kullanılır. Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte, kullanılan malzemelerden beklenilen özellikler artmış ve bu nedenle MMK'lerin kullanım alanları da genişlemiştir. Son zamanlarda gerek uzay ve havacılık, gerekse otomotiv sanayinde yüksek sıcaklığa dayanıklı, yüksek mukavemetli, yüksek aşınma dirençli ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda koruyabilen MMK malzeme kullanımı ve üretimi büyük oranda artmıştır [3].

NASA ve Amerikan Savunma Bakanlığı 1960 ve 1970'lerde, sürekli karbon ve bor elyaflarının geliştirilmesi ve üretilmesi ile, sürekli bor elyaf takviyeli Al-B karma malzemeleri üzerinde araştırma geliştirme faaliyetleri yürütmeye başlamıştır. MMK'lerin kullanımlarındaki en önemli artış, 1982 yılında Toyota'nın piston bileziklerinde Al_2O_3 kısa elyaf takviyeli alüminyum karma malzemelerini kullanması ile gerçekleşmiştir.

Teknolojik uygulamalardaki çalışma ve yakıt masraflarım düşürmek için, malzeme ağırlığının düşürülmesi ve bu yolla mukavemet/yoğunluk oranlarının arttırılması önemlidir [3].

2.1.3.1. Uzay-Havacılık /Askeri Uygulamalar

Uzay-havacılık uygulamalarının karakteristiği, az miktarlarda üretimin olmasıdır. Bu uygulamalarda ağırlıktan elde edilen tasarruf, yakıt ekonomisinde iyileşme sağlamaktadır. Sürekli elyaf takviyeli metal matrisli karma malzemeler yüksek mukavemet ve sıcaklık direnci gerektiren, ancak maliyetin önemli olmadığı havacılık, uzay endüstrisinde ve askeri uygulamalarda daha çok uygulama alanına sahiptir. Sürekli elyaf takviyeli Al MMK'ler güdümlü mermi sistemleri, kompresör pervaneleri, füze başlık sistemlerinde kullanılmaktadır. Pervanelere ve kompresör bıçaklarına bakıldığında, hafifliğe ek olarak malzemenin sünme özellikleri, yüksek elastiklik modülü ve mukavemeti önemlidir. Uzay mekiğinin gövdesini taşıması için bor elyaf takviyeli alüminyum matrisli karma malzemeler üretilmiştir. Farklı kompozisyonlardaki elyaf takviyeli karma malzemeler, jet motoru fan pervanelerinde kullanılmaktadır. Üstün yüksek sıcaklık özellikleri nedeniyle, sürekli grafit elyaflarla takviyeli alüminyum alaşımları çeşitli askeri uygulamalarda ilgi çekmektedir [3,4]. Grafit elyaf takviyeli Al metal matrisli karma malzemeler roket ve helikopter parçalarında, Al_2O_3 elyaf takviyeli Al metal matrisli karma malzemeler, helikopter dişli kutularının yapımında kullanılmaktadır. Kısa elyaf veya visker takviyeli karma malzemeler genellikle taşıyıcı sistemlerde ve teleskoplarda kullanım alanı bulmuştur. Parçacık takviyeli karma malzemeler ise kanat panellerinde, uydu güneş yansıtıcılarında v.b. kullanılmaktadır. Parçacık takviyeli karma malzemelerin uzay-havacılık endüstrisinde diğer takviyelere oranla daha çok tercih edilmesinin nedeni, özelliklerinin izotrop olması ve ağırlıktan daha çok tasarruf sağlamasıdır [3].

2.1.3.2. Otomotiv Uygulamaları

Ağırlık kazancının ve aşınma özelliklerinin yüksek olmasının istendiği otomotiv endüstrisinde, metal matrisli karma malzemelerin kullanılması son zamanlarda oldukça yaygınlaşmıştır [4,5]. Otomobil parçalarında metal matrisli karma malzeme kullanılmasının avantajları şunlardır:

- **i.** Özellikle motor parçalarında ağırlık tasarrufu,
- **ii.** Yüksek aşınma direnci,
- **iii.** İyileştirilmiş malzeme özellikleri,
- **iv.** Düşük ısıl genleşme katsayısı [9].

Otomobilin ağırlığının azalmasıyla yakıt tasarrufu da artmaktadır. Otomobillerde ve büyük araçlarda, ağırlıktan tasarruf 0.5-2 $/kg olabilmektedir [3]. Araçlarda çelik şaftların yerine %20 Al_2O_3 elyaf takviyeli Al metal matrisli karma malzemelerin kullanımıyla, ağırlık tasarrufunun yanında, titreşimlerin azalması ve kritik şaft dönme hızının artması sağlanmıştır [9]. Grafit- Al_2O_3 parçacık takviyeli Al metal matrisli karma malzemelerden üretilen motor bloğu silindir gömlekleri ısı iletimini arttırmış, karma malzemenin ısıl genleşme katsayısı düşük olduğundan piston ile gömlek arasındaki boyut toleranslarını en aza indirmiş ve dolayısıyla motor verimi arttırarak yakıttan tasarruf sağlamıştır. Otomobil pistonlarında Al-SiCp karma malzemelerin kullanılması ağırlık kazancı, aşınma dayanımı sağlamış ve dolayısıyla piston ömrünü arttırmıştır [8].

2.2. Metal Matris Karma Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemeler, monolitik alaşımlarla ulaşılamayan, fiziksel ve mekanik özelliklerin kombinasyonuna sahip olup, ileri teknolojik gelişimi için fırsat sunmaktadır. Geniş yelpazede, uygun matris ve takviye malzemesinin seçimi ile yoğunluğu ve ısıl genleşme katsayısı düşük karma malzemelerin geliştirilmesine izin verilmektedir. Parçacık takviyeli karma malzemeler, yüksek çekme mukavemeti, elastiklik modülü, aşınma ve yorulma direnci gibi mekanik özellikler sergilerken süneklik ve tokluğun düşük olması bu malzemelerin kullanımını sınırlamaktadır [5].

Takviye elemanının ilavesi ile önemli oranda artan ve özellikle mühendislik parçaları tasarımında önemli olan mekanik özelliklerden biri elastiklik modülüdür. Elastiklik modülü artarsa, genellikle kesiti azaltmak ve dolayısıyla ağırlıktan kazanmak mümkündür. Al matrisli karma malzemelerin yoğunluğu düşük ve elastiklik modülü yüksektir [2,3].

Elyaf takviyeli karma malzemede süneklik düşüktür ve süneklik takviyenin yönlenmesine doğrudan bağlıdır. Parçacık takviyeli karma malzemeler ise yapısal uygulamalar için beklenen özellikleri veren izotropik malzemelerdir. Alaşım tipine, matris alaşımının ısıl işlem koşuluna, parçacık hacim oranına bağlı olarak akma ve çekme mukavemetinde % 60'a kadar artış belirlenmiştir [3].

Metal matris karma malzemelerde mukavemet artışı, bileşenlerin farklı ısıl büzülme davranışına sahip olması, geometrik zorlanma ve üretim sırasında plastik deformasyon etkisiyle matristeki dislokasyon yoğunluğundaki değişim ile ilişkilidir

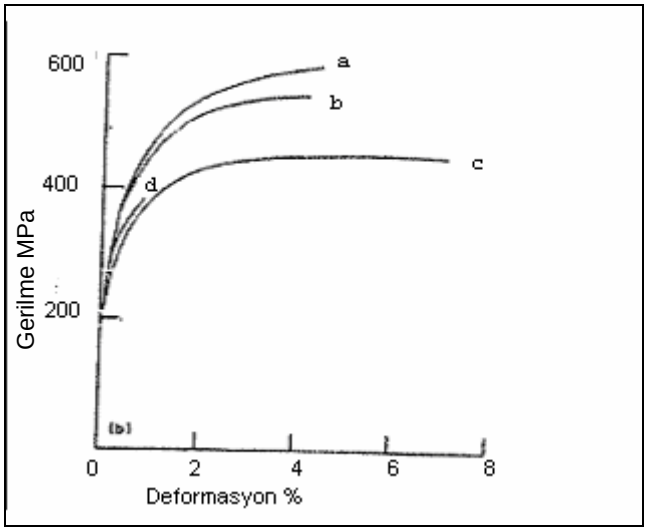
[4]. Takviye ile matris arasındaki ısıl genleşme katsayısındaki farktan dolayı soğuma sırasında matris ve takviye malzemesi arasında ısıl büzülmeden kaynaklanan deformasyon, dislokasyon üreterek mukavemet artışı sağlamaktadır [3,4].

Üretim sırasında meydana gelen plastik deformasyon, dislokasyon yoğunluğunu artırırken dislokasyon hareketine sebep olan plastik deformasyon, dislokasyon kilitlenmesi ile mukavemet artışına sebep olmaktadır [4].

Çekme deneyi ile elde edilen kopma uzaması değeri takviye malzemesi ilavesi ile hızla azalmaktadır [5]. Bu, özellikle düzensiz şekilli takviye fazının, yerel gerilme yığılmasından dolayı çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin meydana geldiği bir bölge gibi davranmasından kaynaklanmaktadır [10]. Karma malzemelerde çekme deneyi sonrasında hasarın taneciklerin kırılması ve matriste boşluk oluşumu şeklinde olduğu gözlemlenmiştir.

2.2.1. Matris Malzemesinin Etkisi

Parçacık takviyeli karma malzemelerde çekme ve akma mukavemetim etkileyen birçok faktör vardır. Metal matrisli karma malzemelerin mekanik davranışlarını etkileyen faktörlerden ilki matris (Şekil 2.2) alaşımıdır [4]. Takviye boyutu ve takviye hacim oram sabit tutulduğunda en yüksek mekanik özellik 7xxx Al serisi alaşım (7075 Al) matrisli karma malzemelerde sergilenirken onu 2xxx Al serisi (2124 Al) ve 6xxx Al serisi alaşım (6061 Al) matrisli karma malzemeler takip etmektedir. En düşük mekanik özellik, 5xxx Al serisi (5083 Al) alaşım matrisli karma malzemeler göstermektedir [11];

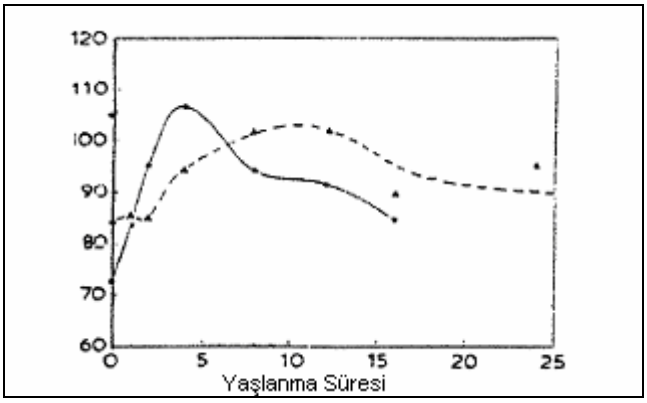


Şekil 2.2. Karma malzemelerin mekanik özelliğine matris alaşımının etkisi. % 20 SiC kılcal kristal takviyeli (a) 7075 Al (b) 2124 Al (c) 6061 Al ve (d) 5083 Al matrisli karma malzemelerin gerilme şekil değişim eğrisi [4]

SiCp/Al karma malzemelerde, matris mukavemetinin artması ile karma malzemenin mukavemeti, ıslatılabilirlik derecesinin artması ile de ara yüzey bağ mukavemeti artmaktadır. Al matrisli karma malzemelerde sık kullanılan diğer alaşım elementi Si'dur. Al alaşımlarına Si ilavesi alaşımın akıcılığını olumlu yönde etkilemekte ve sıvı sıcaklığını düşürmektedir.

Karma malzemenin mukavemetindeki artış, matrisin takviye elemanına yükü iletme kabiliyetine ve ara yüzey bağ mukavemetine bağlıdır. Ara yüzey bağ mukavemeti zayıfsa, parçacığa gerilme aktarımının meydana gelmesinden önce ara yüzey hasara uğrayacak ve mukavemet artışı elde edilemeyecektir. Ara yüzeyin yanında, ısıl iç gerilmelerin bulunması ve takviye parçacık dağılımının homojensizliği, çok düşük deformasyon oranlarında plastik akmanın başlamasına ve deformasyona karşı direnç gösterilmemesine sebep olacaktır [5].

Takviyesiz malzemelerle karşılaştırıldığında seramik takviye parçacığının bulunması metal matris karma malzemelerin yaşlanma davranışını etkilemektedir; takviye içeren alaşımlarda çökelti oluşum kinetiği hızlanmakta yani maksimum sertlik koşuluna daha kısa sürede ulaşılmaktadır. Bu davranış, matris ve takviye arasındaki (sahip oldukları farklı ısıl büzülme katsayılarından dolayı) uyumsuzluğun teşvik ettiği yüksek dislokasyon yoğunluğundan dolayı artan çekirdekleşme ve büyüme kinetiği ile açıklanmıştır [4,12]. İlave olarak parçacık hacim oranı, parçacık şekli, tipi ve boyutundaki değişim, maksimum sertliğe ulaşmada farklı süreler gerektirmektedir. Şekil 2.3'te SiCp kılcal kristal takviyeli ve takviyesiz karma malzemeye 2124 Al alaşımlarının yaşlanma grafiği verilmektedir. Takviye içeren 2124 Al alaşımı 3 saatte maksimum sertliğe sahip olurken takviyesiz 2124 Al alaşımı 10 saatte maksimum sertliğe ulaşmıştır.



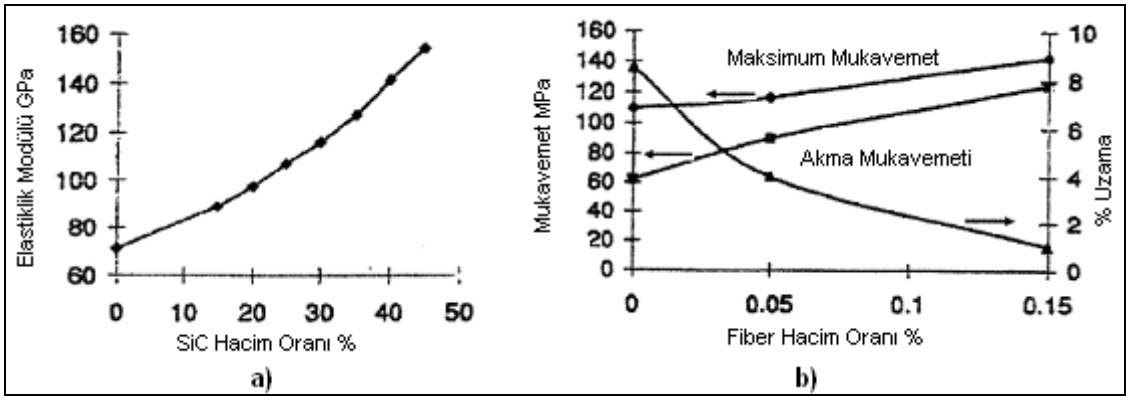
Şekil 2.3. Takviyesiz (A) ve SiC kılcal kristal takviyeli (•) 2124 Al alaşımının havada yaşlanma davranışı [4]

Dislokasyon yoğunluğunun, SiCp takviyesinin kenarında daha fazla, matris içinde daha az olduğu bulunmuştur [13].

2.2.2. Takviye Hacim Oranının Etkisi

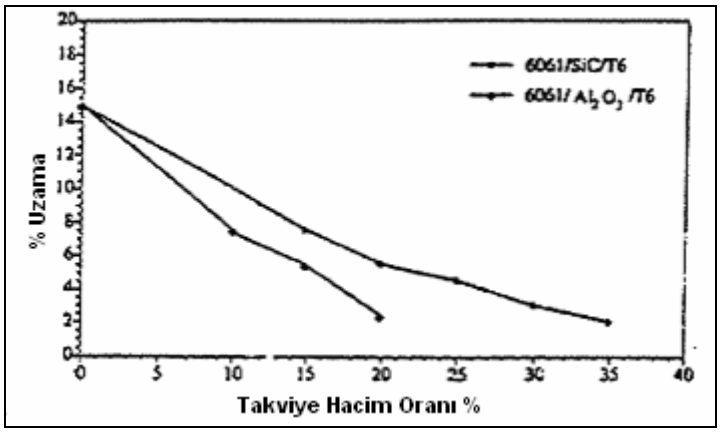
SiC/Al karma malzemelerde takviye elemanının hacim oranının artması ile akma mukavemeti, maksimum mukavemet (basmada ve çekmede), elastiklik modülü artmakta ve süneklik düşmektedir [3]. Şekil 2.4a , T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş 2124 Al (Al-Cu) alaşımının elastiklik modülüne SiC parçacık hacim oranının etkisini göstermektedir [3]. Takviye hacim oranının artması ile mukavemetindeki artış, SiCp takviye miktarının artması ve dislokasyon yoğunluğundaki artıştan kaynaklanmıştır.

Şekil 2.4b'de T5 koşulunda ısıl işlem görmüş Al_2O_3 elyaf takviyeli A 332 (Al 9.5 Si 3 Cu) alaşım matrisli karma malzemenin 250 °C'deki çekme özellikleri verilmektedir [5]. Seramik takviye parçacık ve/veya elyaf hacim oranının artması ile mukavemet artmıştır [3,4]. Bununla birlikte, Lloyd [5], mukavemetteki artışın, oldukça yüksek parçacık hacim oranlarında azaldığını gözlemiştir. Bunun sebebi, yüksek hacim oranlarında uniform parçacık dağılımının kolay olmamasıdır [5].



Şekil 2.4. Takviye hacim oranı ile (a) SiCp/2124 A1-T6 karma malzemenin elastiklik modülünün ve (b) A12O3/A332 T5 karma malzemenin 250 °C'deki çekme özelliklerinin değişimi [7]

Takviye hacim oranı arttıkça süneklik azalmaktadır (Şekil 2.5). Süneklik, mühendislik tasarımlarda sık sık göz önünde bulundurulan değişkenlerden biridir; özellikle süneklik düşükse, düşük deformasyonlarda çatlak ortaya çıkabilir [7].

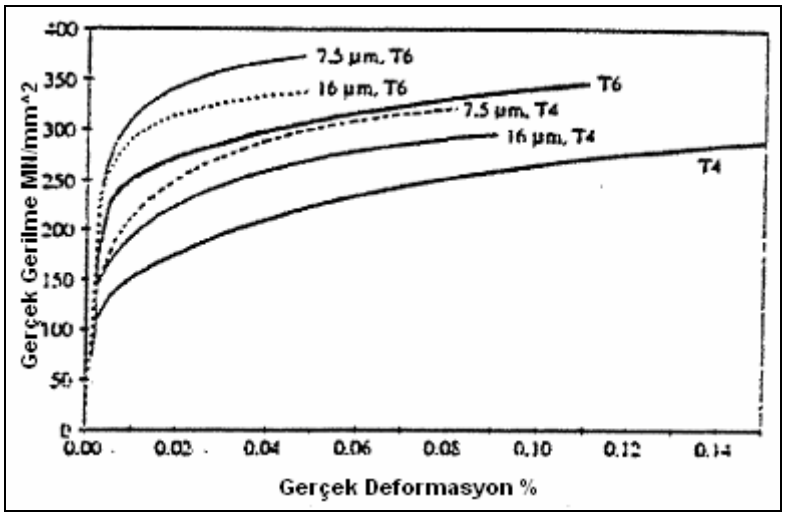


Şekil 2.5. Parçacık hacim oranı ile 6061 Al alaşımının çekme uzamasının değişimi [7]

Karma malzemelere uygulanan ısıl işlemle kırılma tokluğu artarken, toz metalürjisinde karma malzemelere gaz giderme amacıyla uygulanan sinterleme ısıl işlemi ile kırılma tokluğu azalmıştır. Matris sistemleri arasında 6061 Al en yüksek kırılma tokluğu değerine sahiptir [1]. Karma malzemelerin kırılma tokluğu, takviye boyutunun artması ile azalmaktadır [5,14].

2.2.3. Takviye Boyutunun Etkisi

Şekil 2.6, ekstrüze edilmiş iki farklı parçacık boyutu ve ısıl işlem koşulu için, SiCp takviyeli (% 15 SiCp) ve takviyesiz A 356 malzemelerin gerilme-deformasyon eğrilerini vermektedir [5]. Düşük deformasyonlarda soğuk işlem sertleşmesi azalan SiC parçacık boyutu ile artmıştır. Bu durum, ısıl genleşme katsayısındaki farklılıktan kaynaklanmıştır [5]. Takviye boyutunun artması ile takviye kırılmasının gözlenmesinden dolayı mukavemet ve süneklik düşmektedir. Takviye boyutunun azalması ile mukavemetteki artış, bileşenler arasındaki ısıl genleşme katsayılarındaki farklılıktan dolayı soğuma sırasında dislokasyon yoğunluğundaki artıştan kaynaklanmıştır [8].



Şekil 2.6. Ekstrüze edilmiş farklı parçacık boyutuna ve temper koşuluna sahip takviyesiz A 356 ve % 15 SiC takviyeli A 356 alaşımının gerilme-birim şekil değişimi eğrileri [7]

Parçacık kırılması, genellikle büyük parçacıklarda gözlenmektedir. Büyük seramik parçacıkların, hasarı başlatan çatlakları içerme ihtimali yüksektir. Takviye parçacıkları arasındaki matriste boşluk şeklinde hasar oluşumu meydan gelir [5]. Mekanik deneylerde, hasarın ara yüzey yerine takviye çevresindeki matrisin plastik akışı ile meydana gelmesi, takviye ile matris arasında bağ oluşumunun güçlü olduğunu ortaya koymaktadır.

Ara yüzey boyunca kırılmayı minimuma indirmek için yüksek ara yüzey mukavemetine gereksinim duyulmaktadır. Bununla birlikte, matrisin mikroyapısı da önemlidir; çünkü bölgesel matris hasarının kırılmayı kontrol ettiği açıktır. Ayrıca parçacık dağılımı karma malzemenin sünekliğini etkiler. Belirli hacim oranı için karma malzemenin sünekliğini etkileyen faktörler şunlardır [5];

i. Uniform parçacık dağılımı

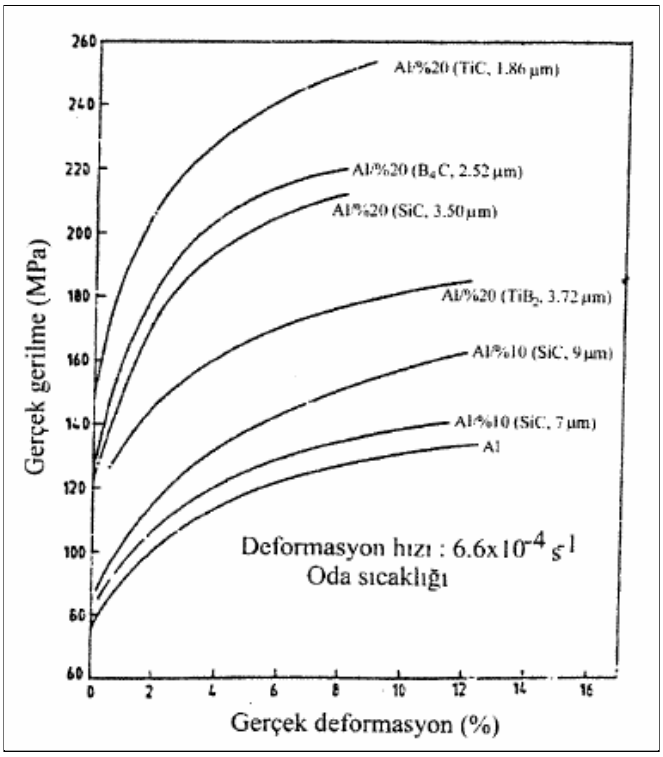
ii. Yüksek ara yüzey mukavemeti

iii. Parçacık şekli

iv. Sünek matris

2.2.4. Takviye Tipinin Etkisi

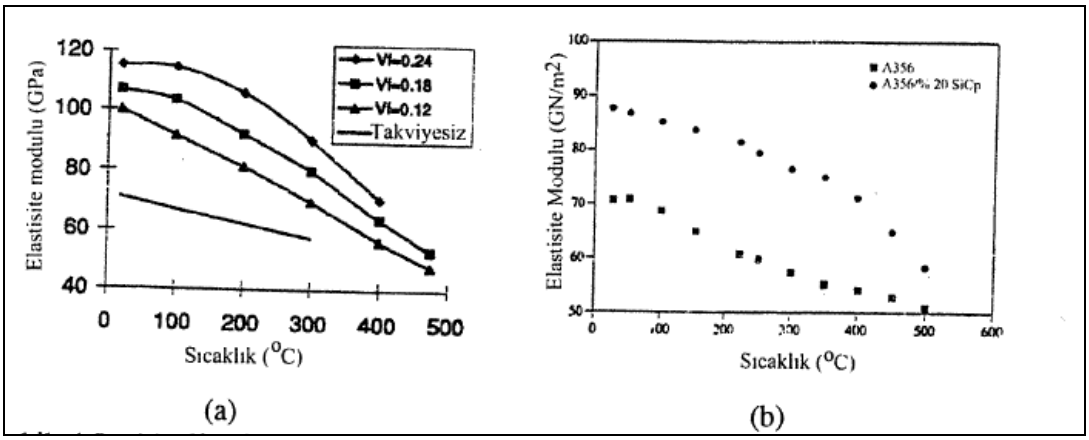
Roy ve arkadaşları [15], SiC, TiC, B_4C ve TiB_2 parçacıkları ile takviye edilmiş saf Al matrisli karma malzemelerin mekanik özelliklerine takviye tipinin etkisini Şekil 2.7'de vermişlerdir. Şekilde görüldüğü gibi % 20 TiC ile takviye edilmiş karma malzeme en iyi çekme ve süneklik kombinasyonları sergilemiştir.



Şekil 2.7. Takviyesiz ve farklı tipte parçacık ile takviye edilmiş Al matrisli karma malzeme için oda sıcaklığı gerilme-gerçek deformasyon eğrileri [15]

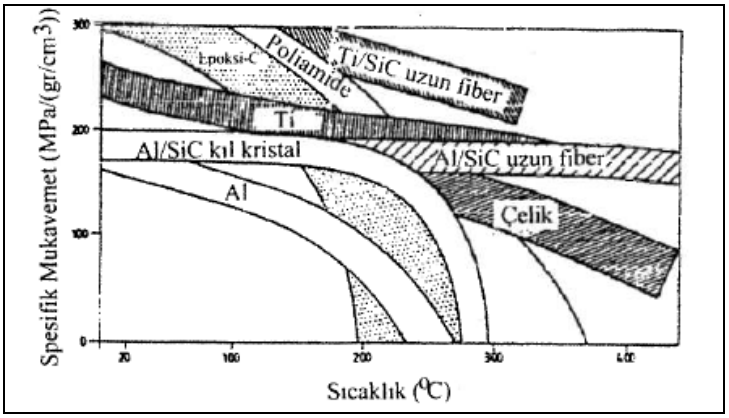
2.2.5. Sıcaklığın Etkisi

Seramik takviyeli karma malzemelerin en büyük özelliği yüksek sıcaklık mukavemetleridir. Karma malzemeler, belirli sıcaklığa (200 °C) kadar kullanılabilir mukavemet değerlerine sahiptirler [4,5,7]. Şekil 2.8, takviyesiz ve % 12-24 hacim oranında Al_2O_3 elyaf takviyeli Al_9Si_3Cu alaşım matrisli [7] ve %20 SiC parçacık takviyeli A356 matrisli [5] karma malzemelerin elastiklik modülüne sıcaklığın etkisini göstermektedir. Karma malzemeler, takviyesiz malzemelerle karşılaştırıldığında, her bir sıcaklıkta yüksek elastiklik modülüne sahip [5,7] olmalarının yanında, yüksek elyaf hacim oranına sahip karma malzeme elastiklik modülü değerini daha geniş sıcaklık aralığında koruyabilmektedir [3].



Şekil 2.8. (a) % 12-24 Al_2O_3 fiber/A19Si3Cu [3] ve (b) %20 SiCp/A 356 [7] karma malzemelerin elastiklik modülüne sıcaklığın etkisi

Şekil 2.9'da sıcaklığın fonksiyonu olarak özgül mukavemet değerleri gösterilmektedir. Sürekli elyaf takviyeli karma malzemeler 250°C'ye kadar mukavemetlerini koruyabilirken, süreksiz parçacık takviyeli karma malzemeler 20-150 °C arasına kadar mukavemetlerini korumaktadırlar.



Şekil 2.9. Sıcaklığın fonksiyonu olarak özgül mukavemetin (çekme mukavemeti/ yoğunluk) değişimi [3]

Parçacık takviyeli karma malzemelerin düşük sıcaklıklarda ve düşük deformasyon oranlarında takviyesiz matristen daha yüksek mukavemet göstermesi deformasyon sertleşmesi hızının bir sonucudur.

3. SÜREKSİZ İKİNCİ FAZLAR İÇEREN MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN HESAPLANMASI

3.1. Analitik Yöntemler

Analitik olarak Hashin-Shtrikman (HS) tarafından tanımlanan $HS_{üst}$, HS_{alt} sınır yöntemleri kullanılarak %15.58 takviyeli karma malzemenin elastiklik modülü tahmin edilmiştir. Hashin-Shtrikman (HS) yöntemi [17];

$$K_{üst} = K_P + (1 - V_P)\left[\frac{1}{K_M - K_P} - \frac{3V_P}{3K_P + 4G_P}\right]^{-1} \tag{3.1}$$

$$K_{alt} = K_M + V_P\left[\frac{1}{K_P - K_M} + \frac{3(1 - V_P)}{3K_M + 4G_M}\right]^{-1} \tag{3.2}$$

$$G_{üst} = G_P + (1 - V_P)\left[\frac{1}{G_M - G_P} - \frac{3V_P(K_P + 2G_P)}{5G_P(3K_P + 4G_P)}\right]^{-1} \tag{3.3}$$

$$G_{alt} = G_M + V_P\left[\frac{1}{G_P - G_M} - \frac{6(1 - V_P)(K_M + 2G_M)}{5G_M(3K_M + 4G_M)}\right]^{-1} \tag{3.4}$$

$$E_{HT-ÜST} = \frac{9K_{üst}}{1 + (3K_{üst}/G_{üst})} \tag{3.5}$$

$$E_{HT-ALT} = \frac{9K_{alt}}{1 + (3K_{alt}/G_{alt})} \tag{3.6}$$

olarak tanımlanmıştır. Bu yöntemde parçacık küresel olarak kabul edilmektedir.

3.2. Ampirik Yöntemler

Halpin Tsai (HT)yöntemi ise [17];

$$q = \frac{\frac{E_P}{E_M} - 1}{\frac{E_P}{E_M} + 2s} \tag{3.7}$$

$$E_{HS} = \frac{E_M(1+2sqV_P)}{1-qV_P} \tag{3.8}$$

Bu yöntemde s, parçacıkların şekil (en/boy) oranıdır.

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Katı Modeller

Sonlu elemanlar yöntemi, fiziksel ve mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal bir çözüm yöntemidir. 1950 'lerin ilk senelerinde uçak ve uzay sanayinde kullanılmaya başlanan bu yöntem, 1963 yılında varyasyonal yaklaşım ve Ritz metodunun sonlu elemanlarla kullanılmaya başlanmasıyla giderek yaygınlaşmıştır. Önceleri yalnızca statik yapısal analizlerde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, Laplace ve Poisson denklemlerine de uygulanabileceği ortaya çıktıktan sonra, Galerkin yaklaşımı yardımıyla akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminin temeli, sıcaklık, basınç veya uzaklık gibi bir büyüklüğü lineer, parabolik veya kübik bir fonksiyonla tanımlı olan küçük parçalara ayırıp, çözüme gitmeye dayanır. Böylece tek başına matematik olarak modeli enemeyen bir çok büyüklük, parçalayarak yaklaşık olarak modellenmiş olur.

İç yapıda tesadüfi olarak dağılmış, düzensiz biçimli parçacıkların gerçek katı modeline aktarılması hesaplama yükünü arttırdığından hem parçacıkların biçimi hem de yapıdaki dağılımı idealize edilerek modelleme yapılır. Düzensiz biçimli, keskin köşeleri olan parçacıklar ve tesadüfi dağılımlar göz önüne alındığında parçacık küresel olarak kabul edilmektedir. Dağılım geometrisi ise parçacıkların periyodik dağılıma uyduğu kabul edilerek basitleştirilir ve yapının periyodik dağılımlı birim hücrelerin yan yana gelmesinden oluştuğu kabul edilir. Literatürde rastlanan birim hücreler şunlardır.

3.3.1. Basit Kübik Dağılım (BK)

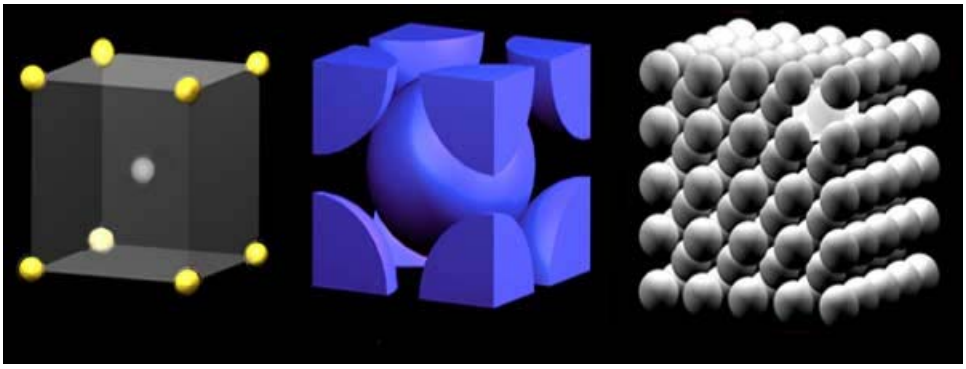
Basit kübik dağılımda, kübün 8 kenarında da birer tane atom yerleştirilmiştir. Bu hücrenin her biri hücre başına bir parçacığa sahiptir.

3.3.2. Hacim Merkezli Kübik Dağılım (HMK)

Şekil 3.1 deki HMK kristal dağılımda her birim hücrenin parçacıklarının yerlerine bakılırsa, bu birim hücrede katı küreler, parçacıkların bulunduğu yerlerin merkezlerini ve bağıl konumlarını göstermektedir. Bu birim hücrede merkezdeki parçacık en yakın sekiz komşu atomla çevrilmiştir. Bu hücrenin her biri hücre başına iki parçacığa sahiptir. Hücrenin merkezinde bir tam parçacık yer almakta hücrenin

her kenarında bulunan sekizde bir parçacıklar da ikinci parçacığı oluşturmaktadırlar. HMK hücrede küpün kenarı a ile parçacık yarı çapı R arasındaki ilişki;

$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \tag{3.9}$$



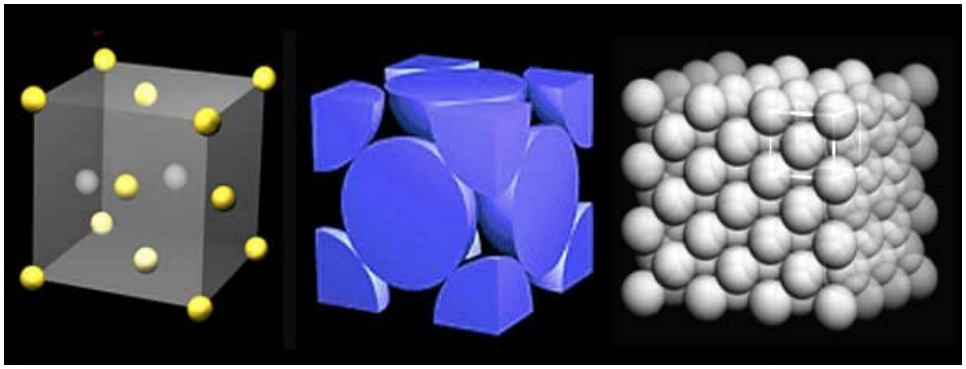
Şekil 3.1 Hacim merkezli kübik dağılım

3.3.3. Yüzey Merkezli Kübik Dağılım (YMK)

Şekil 3.2'deki YMK kristal dağılımda her birim hücrenin parçacıklarının yerlerine bakılırsa, bu hücrede küpün köşelerinde birer kafes noktası bulunmakta ve birer kafes noktası da küpün her yüzeyinin ortasında yer almaktadır. Şekildeki sert küre modeli YMK kristal dağılımında parçacıkların mümkün olan en sıkı durumda dizildiklerini göstermektedir. HMK yapısında 0.68 olan atomik doluluk oranı YMK yapı için 0.74 değerindedir. YMK hücrede birim hücre başına düşen parçacık sayısı dörttür. Küp kenarı uzunluğu a ile parçacık yarıçapı R arasında;

$$a = \frac{4R}{\sqrt{2}} \tag{3.10}$$

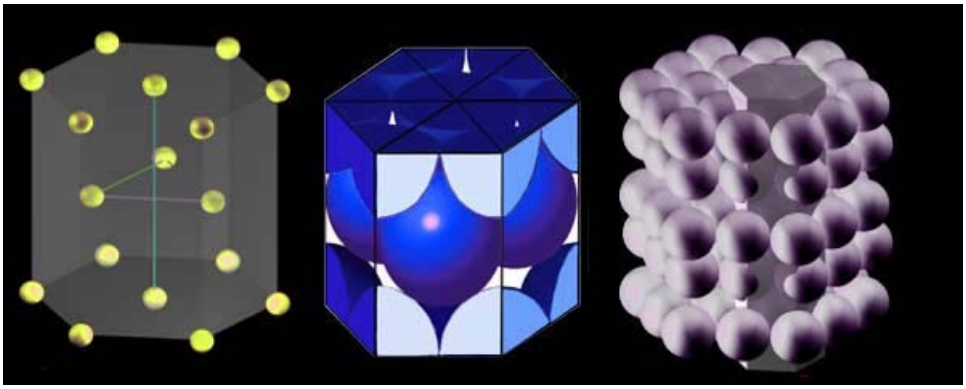
oranı bulunmaktadır.



Şekil 3.2 Yüzey merkezli kübik dağılım

3.3.4. Sıkı Düzen Hekzagonal Dağılım (SDH)

Yaygın olarak rastlanan üçüncü kristal dağılımı Şekil 3.3'te gösterilen SDH yapıdır. Atomik doluluk oranı çok düşük olduğundan metaller SDH kristalin atomik doluluk oranı 0.74 olup YMK yapı ile aynıdır. Hem SDH hem de YMK yapıda her bir atom 12 diğer parçacıkla çevrilmiştir ve dolayısı ile her iki yapının da birliktelik sayısı 12'dir. SDH birim hücresinde parçacık sayısı altıdır. Üç atom orta tabakada bir üçgen oluşturmaktadır. Üst ve alt tabakalarda altı adet altıda bir parçacık ve üst ve alt tabakanın ortalarında birer yarım parçacık yer almaktadır.



Şekil 3.3 Sıkı düzen hekzagonal dağılım

3.4. Voronoi Temsili Hacim Elemanları

Üç boyutlu Voronoi temsili hacim elemanları ideal kafes yapılarının incelenmesinde kullanılabilir. Voronoi temsili hacim elemanlarının en önemli avantajı her hücrede bir tam parçacığın bulunmasıdır. Voronoi temsili hacim elemanları takviye parçacıklarının matris içerisinde rasgele dizildiği durumların analizinde de rahatlıkla kullanılabilir. Üç boyutlu grafiksel gösterimi kolaylaştırmak için küresel olduğu kabul edilen takviye parçacıkları, herhangi bir şekilde bulunabilir. Bu çalışma kürelerin yarıçaplarının en yüksek teorik parçacık hacim oranını verdiği ve kürelerin birbirleri ile temas halinde olduğu kabul edilmiştir. Bu yarıçap oluşturulacak birim hücre için karakteristik uzunluğu oluşturmaktadır.

3.4.1. Basit Kübik Dağılım İçin Temsili Hacim Elemanı

Şekilde 3.4 a'da gösterildiği gibi Birim hücreyi ele alalım. Basit kübik hücre için Voronoi temsili hacim elemanı Şekil 3.4 b'de gösterildiği gibi küptür. Hücrenin sınırları [16];

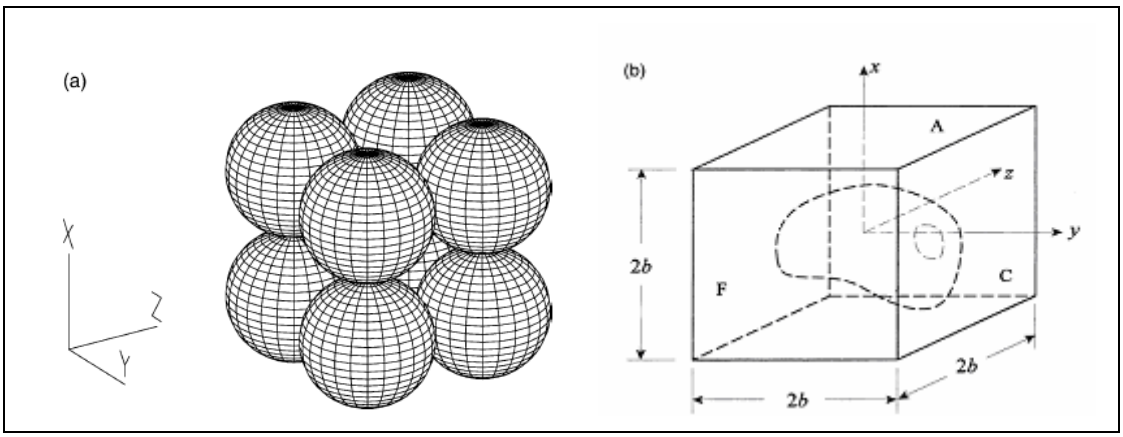
$$x = \pm b\,,\ y = \pm b\,,\text{ve}\ z = \pm b \tag{3.11}$$

ile gösterilir, b hücrenin karakteristik yarıçapıdır. Hacim;

$V = 8b^3$ 'tür. (3.12)

Yarıçapı a olan küresel parçalar için parçacık hacim oranı;

$$f = \frac{\pi a^3}{6b^3} \tag{3.13}$$



Şekil 3.4 a) Basit kübik; b) Basit kübik için Voronoi temsili hacim elemanı

3.4.2. Hacim Merkezli Kübik Dağılım İçin Temsili Hacim Elemanı

Şekil 3.5 a'da HMK dağılımı gösterilmektedir. Bu yapının Voronoi temsili hacim elemanı Şekil 3.5 b'de gösterilmiştir. Hücrenin sınırları [16];

$$x = \pm\frac{2b}{\sqrt{3}}, \quad y = \pm\frac{2b}{\sqrt{3}}, \quad z = \pm\frac{2b}{\sqrt{3}} \tag{3.14}$$

ve

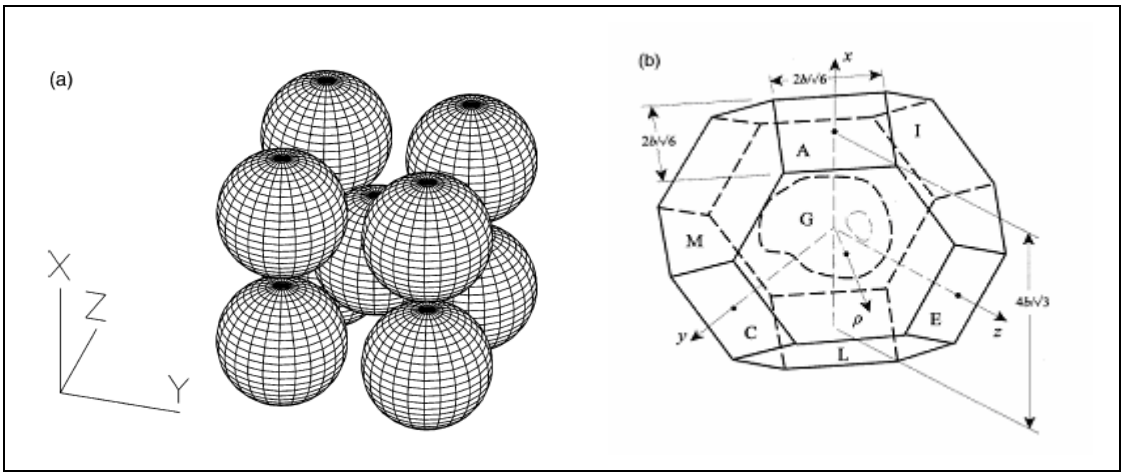
$$x \pm y \pm z = \pm\sqrt{3b} \tag{3.15}$$

ile gösterilmektedir, b hücrenin karakteristik yarıçapıdır. Hacim;

$$V = \frac{32b^3}{3\sqrt{3}} \text{'tür} \tag{3.16}$$

Yarıçapı a olan küresel parçalar için parçacık hacim oranı;

$$f = \pi\sqrt{\frac{3a^3}{8b^3}} \text{'tür} \tag{3.17}$$



Şekil 3.5 a) HMK hücre; b) HMK hücre için Voronoi temsili hacim elemanı

3.4.3. Yüzey Merkezli Kübik Dağılım İçin Temsili Hacim Elemanı

Yüzey merkezli kübik dağılım Şekil 3.6 a'da gösterilmektedir. Aynı yapı için daha değişik bir parçacık dizilimi Şekil 3.6 b'de gösterilmiştir. Bu yapıdan oluşturulan Voronoi temsili hacim elemanı Şekil 3.6 c'de gösterilmiştir. Hücrenin sınırları [16];

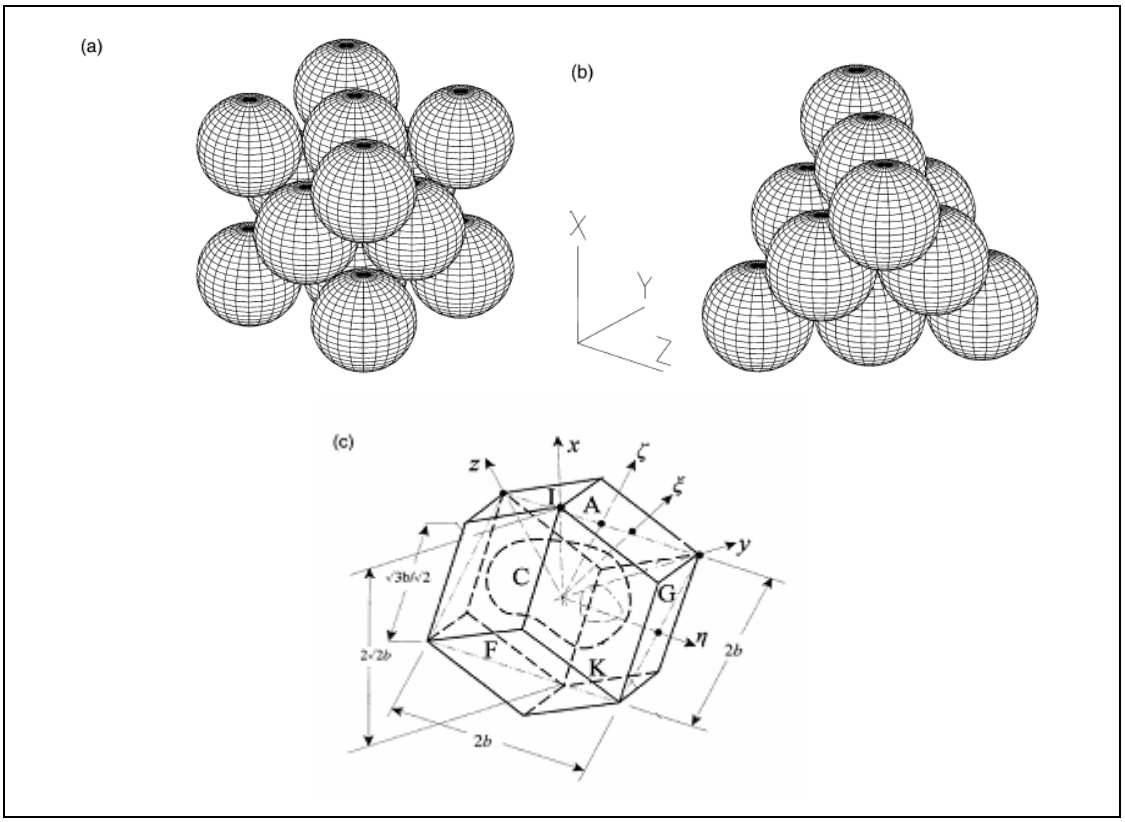
$$x \pm y = \pm\sqrt{2b}\,,\ y \pm z = \pm\sqrt{2b} \text{ ve } z \pm x = \pm\sqrt{2b} \tag{3.18}$$

ile gösterilmektedir, b hücrenin karakteristik yarıçapıdır. Hacim;

$$V = 4\sqrt{2b^3} \tag{3.19}$$

Yarıçapı a olan küresel parçalar için parçacık hacim oranı;

$$f = \frac{\pi a^3}{3\sqrt{2b^3}} \tag{3.20}$$



Şekil 3.6 a)YMK hücre; b)YMK hücrenin farklı dizilimi; c)YMK hücre için Voronoi temsili hacim elemanı

3.4.4. Sıkı Düzen Hekzagonal Yapı İçin Temsili Hacim Elemanı

SDH dağılım Şekil 3.7 a'da gösterilmektedir. Bu yapının Voronoi temsili hacim elemanı Şekil 3.7 b'de gösterilmiştir. Hücrenin sınırları [16];

$$y = \pm b$$

$$\pm y + \sqrt{3}z = \pm 2b \tag{3.21}$$

$$4\sqrt{3}x + 3\sqrt{2}y \pm \sqrt{6}z = 6\sqrt{2}b \tag{3.22}$$

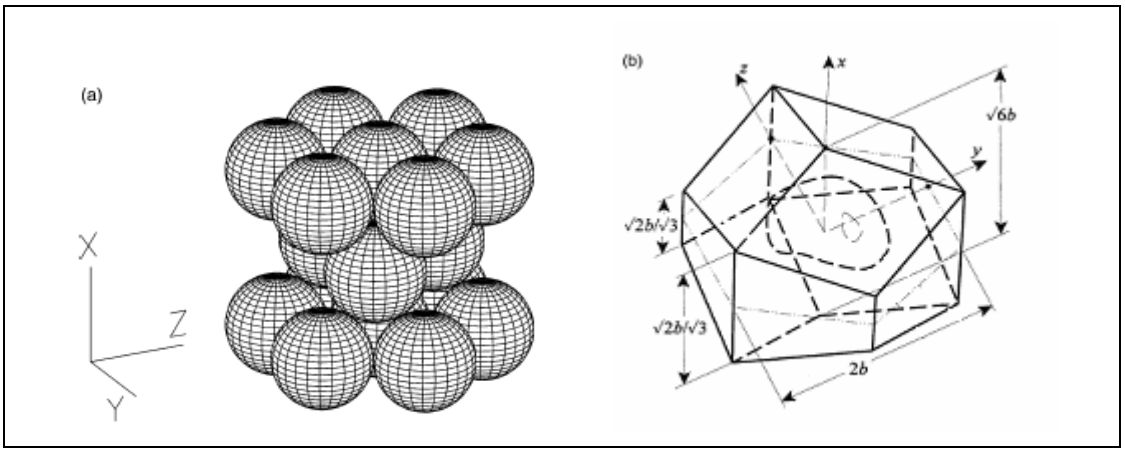
$$2\sqrt{3}x + 4\sqrt{2}y \pm 3\sqrt{6}z = 3\sqrt{2}b \tag{3.23}$$

$$-2\sqrt{3}x \pm \sqrt{6}z = 3\sqrt{2}b \tag{3.24}$$

ile gösterilmektedir, b hücrenin karakteristik yarıçapıdır. Hacim;

$$V = 4\sqrt{2b^3} \tag{3.25}$$

Dikkat edilirse SDH ve YMK yapıları için tanımlanan Voronoi temsili hacim elemanlarının hacimleri aynıdır. Bu sebepten dolayı bu iki yapı aynı kompaktlıktadırlar, her ikisi de sıkıca paketlenmiş şekildedir. Bununla beraber SDH ve YMK dağılımların temsili hacim elemanları topolojik olarak da benzerlikler taşımaktadırlar.



Şekil 3.7 a) SDH hücre; b) SDH hücre için Voronoi temsili hacim elemanı

4. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Malzeme

Bu çalışmada, ticari kaynaktan (Goodfellow, İngiltere) satın alınan 15 mm çapındaki SiC takviyeli Alüminyum matrisli karma malzeme çubuk kullanılmıştır. Karma malzemenin içerisindeki elementlerin ağırlıkça yüzdeleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Karma malzemenin hacimce element yüzdeleri

Ağırlıkça %				
Al	SiC	Cu	Mg	Mn
77.9	17.8	3.3	1.2	0.4

Tabloda verilen ağırlıkça oranlardan literatürde bu elementler için tanımlanmış olan yoğunluklar kullanılarak karma malzemede SiC hacim oranı %15.58 olarak hesaplanmıştır. Karma malzemeye takviye olarak SiC parçacıkları eklenmeden önceki ağırlıkça yüzdeler Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Karma malzemeye takviye eklenmeden önceki ağırlıkça yüzdeler

Ağırlıkça %				
Al	SiC	Cu	Mg	Mn
94.08		4.01	1.45	0.486

Yukarıdaki tabloda yer alan element yüzdeleri, alüminyum alaşımlarının içerdikleri element yüzdeleri ile ilgili TS EN 573-3 standardı ile karşılaştırıldığında (Tablo 4.3), malzemenin Al 2024'e oldukça yakın olduğu görülmüştür. Standartta verilen değerler aralık belirtilmedikçe en yüksek değerlerdir.

Tablo 4.3 Al 2024 ağırlıkça element yüzdeleri [18]

Ağırlıkça %											
Al 2024											
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
0.5	0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.1		0.25	0.15			Kalan

Deneysel çalışma için, piyasadan alınan Al 2024'ün kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.4'de gösterilmiştir [19]. Literatürde yapılan araştırma sonucunda sonlu elemanlar analizinde kullanılan T351 ile T4 ısıl işlemi sonucu elde edilen gerilme şekil değişimi eğrileri aynı olduğu görülmüştür.

Tablo 4.4 Al 2024 numunenin kimyasal analiz sonuçları [19]

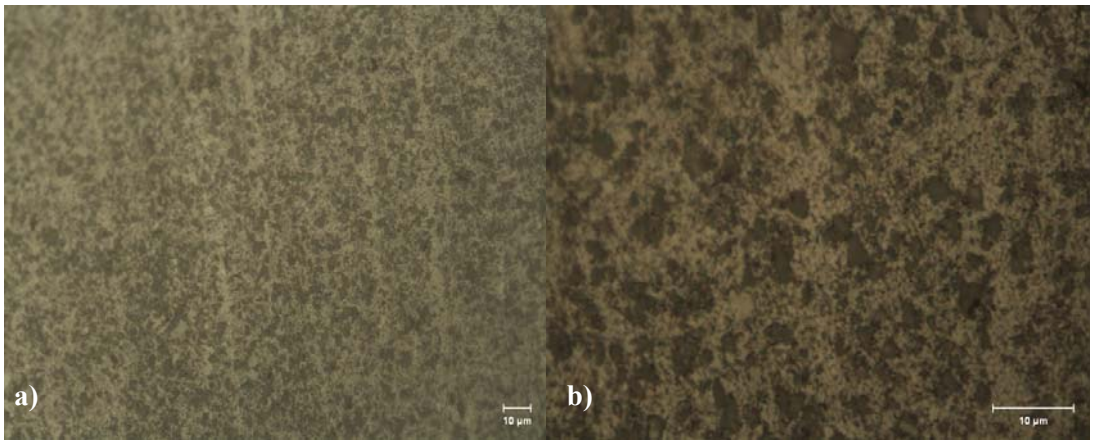
Ağırlıkça %												
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	Pb	Sb	Al
0.27	0.383	4.27	0.433	0.562	0.00819	0.00674	0.0497	0.0666	0.005	0.00787	0.003	94.94

Tablo 4.5 Al 2024 ısıl işlemleri ve özellikleri [20]

	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Elastiklik Modülü [GPa]	Brinell Sertliği [HB]
Al 2024-T0	185	75	73	47
Al 2024-T3	485	345	73	120
Al 2024-T4-T351	472	325	73	120

4.2. İç Yapı

Optik mikroskop ile iki değişik bölgeden çekilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Ölçekte gösterilen mesafe 10µm'dir. Yapılan ölçümler sonucu karma malzemede yer alan SiC takviye parçacıklarının boylarının 3 – 5 µm arasında değiştiği görülmüştür.

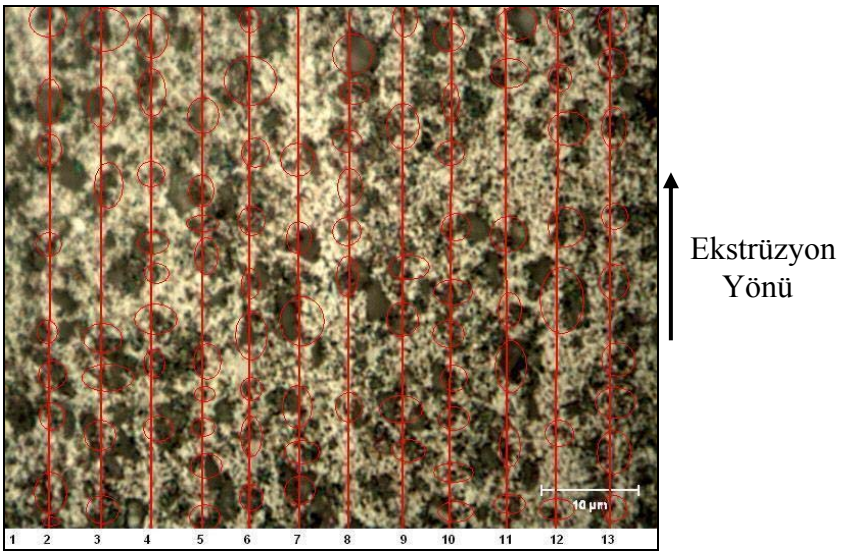


Şekil 4.1 Karma malzemenin mikroyapı fotoğrafları a)500x; b)1500x

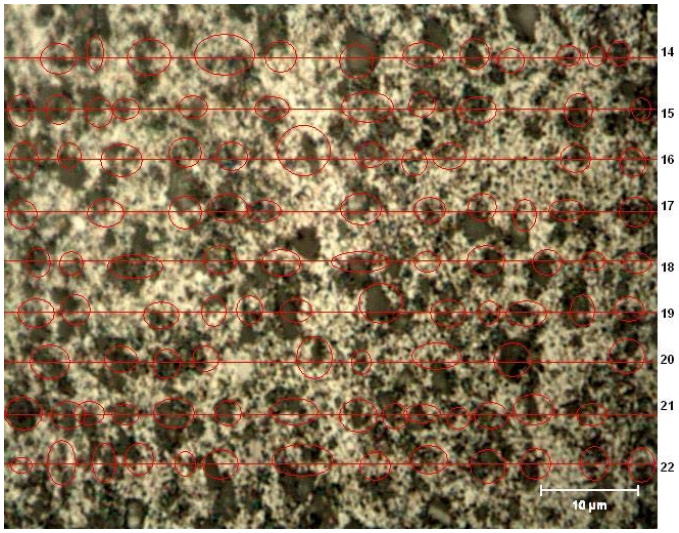
Karma malzemenin optik mikroskop ile 1500 büyütmede çekilen fotoğraftan yararlanılarak çizgisel yoğunluk hesaplanmıştır. Ekstrüzyona paralel yöndeki hesaplamanın yapılabilmesi için, toplam uzunluğu 620 µm'ye karşılık gelen 13 çizgi, 5 µm aralık ile çizilmiştir. Bu çizgilere toplam 101 parçacık temas etmiştir. Ekstrüzyona dik yöndeki hesaplamanın yapılabilmesi için, toplam uzunluğu 600 µm'ye karşılık gelen 9 çizgi, 5 µm aralık ile çizilmiştir. Bu çizgilere toplam 103 parçacık temas etmiştir. Tablo 4.6'da çizgi numarası ve çizgiye temas eden parçacık sayısı verilmiştir.

Tablo 4.6 Çizgi numarası ve çizgiye temas eden parçacık sayısı

Çizgi No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
TEPS	7	9	7	8	9	9	6	7	6	10	7	7	9	12	11	11	11	10	12	9	14	13



Şekil 4.2 Ekstrüzyona paralel çizgisel yoğunluk hesaplanmasında kullanılan çizgiler ve çizgilere temas eden parçacıklar



Şekil 4.3 Ekstrüzyona dik çizgisel yoğunluk hesaplanmasında kullanılan çizgiler ve çizgilere temas eden parçacıklar

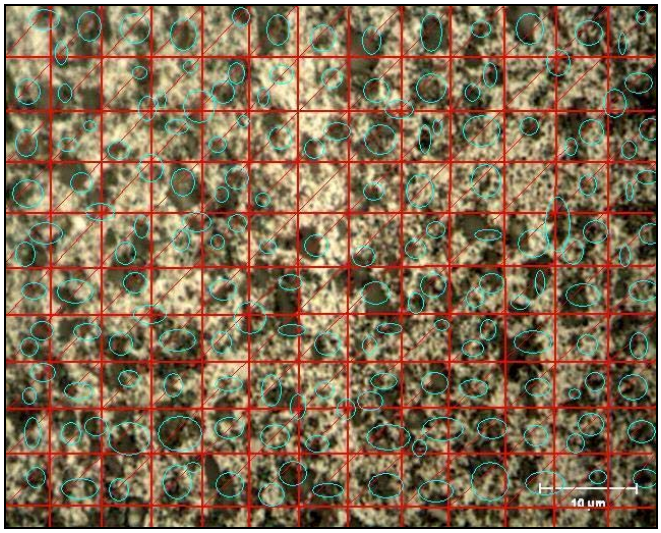
Ekstrüzyona paralel yöndeki çizgisel yoğunluk;

$$\frac{101}{620} = 0.1629 \ \ adet/\mu m \tag{4.1}$$

Ekstrüzyona dik yöndeki çizgisel yoğunluk;

$$\frac{103}{600} = 0.1716 \ \ adet/\mu m \tag{4.2}$$

Ekstrüzyona 45^0'deki hesaplamanın yapılabilmesi için, toplam uzunluğu 919µm'ye karşılık gelen 22 çizgi, 3µm aralık ile çizilmiştir. Bu çizgilere toplam 186 parçacık temas etmiştir.



Şekil 4.4 Ekstrüzyona 45^0 çizgisel yoğunluk hesaplanmasında kullanılan çizgiler ve çizgilere temas eden parçacıklar

Ekstrüzyona 45^0 çizgisel yoğunluk;

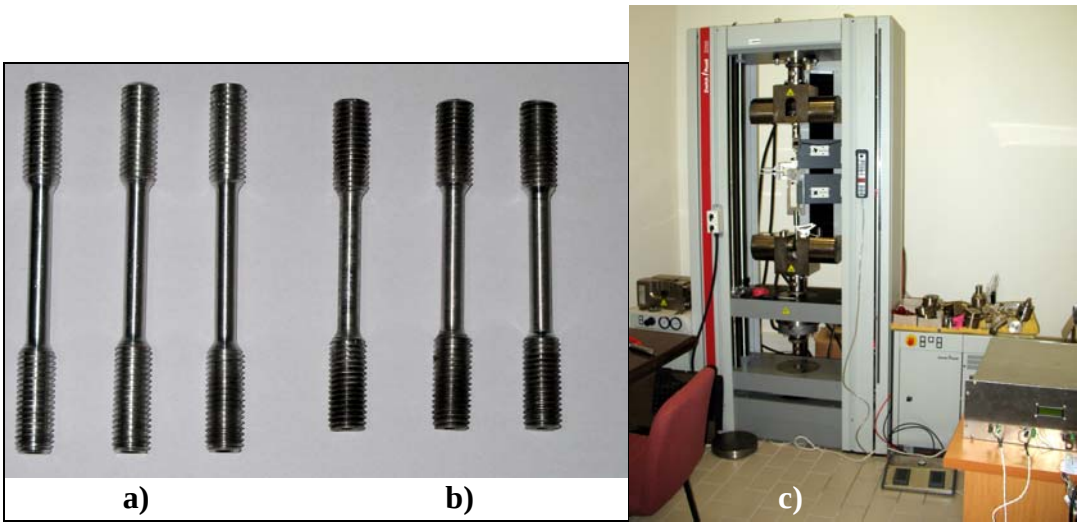
$$\frac{186}{919} = 0.2024 \ \ adet/\mu m \tag{4.3}$$

Çizgisel yoğunluk hesapları sonucunda ekstrüzyona dik doğrultu ile paralel doğrultu arasında parçacık yoğunluğu bakımından farkın oldukça yakın olduğu, ekstrüzyona 45^0 açıdaki çizgisel yoğunluğun ise farklı olduğu görülmüştür. Normalde parça dağılımının her yönde aynı olduğunu kabul ettiğimize göre, 45^0'de görülen bu fark ekstrüzyon sonucu parçacıkların yönlendiğini göstermektedir.

Çekilen fotoğraftan image J programı kullanılarak yapılan hacim analizinde takviye oranı %17.26 olarak tespit edilmiştir. Okuma hatası da dikkate alındığında bu değer makuldur.

4.3. Çekme Deneyi

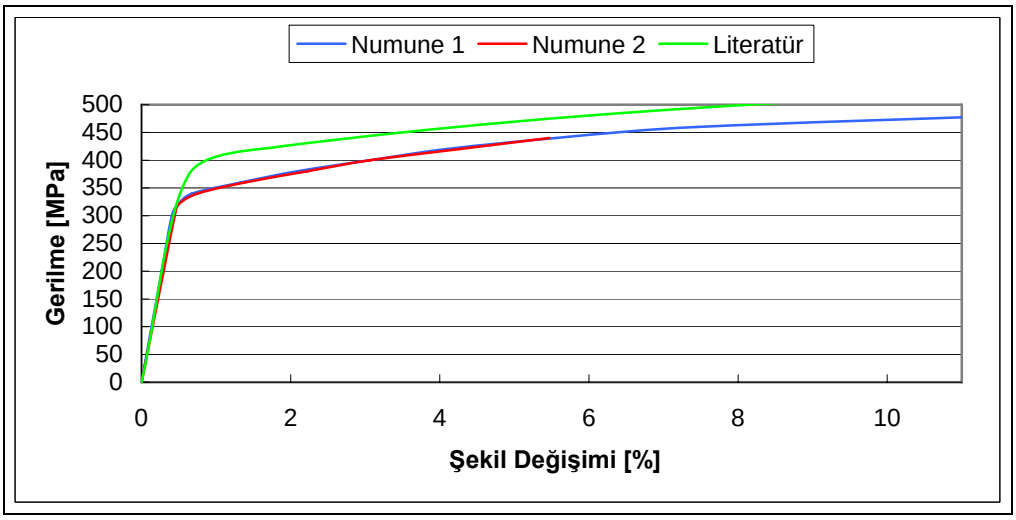
Ortam sıcaklığında metalik malzemeler için çekme deneyi, TS 138 EN 10002-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Şekil 4.5 a'da ve Şekil 4.5 b'de hazırlanan çekme numuneleri görülmektedir.



Şekil 4.5 Çekme numuneleri a)Al 2024; b)Karma malzeme; c) Deney tertibatı

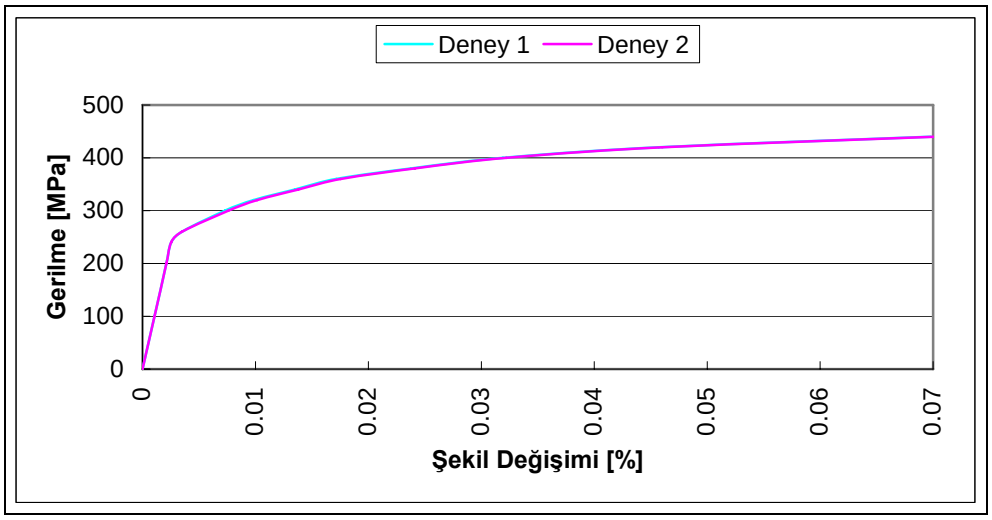
Deney numunelerinin çapı 9mm'dir. Numunelerin ölçme uzunluğu deneylerde 45mm olarak alınmıştır.

Al malzemenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde elastiklik modülü 73 GPa, akma dayanımının 338 MPa, çekme dayanımının 481 MPa olduğu ve literatürde verilen değerler ile uygun olduğu görülmüştür (Tablo 4.5). Ancak takviye etkisi ile çökelme kinetiği değişeceğinden, matrisin takviye ile komşu olan bölgelerinde dislokasyon yoğunluğu artacağını da dikkate almak gereklidir [4]. Bu nedenle, sonlu elemanlar çalışmasında literatürde Al 2024 ile gerçekleştirilmiş benzer bir çalışmada Bao tarafından tanımlanmış olan gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Al 2024-T351 gerilme- birim şekil değişimi diyagramı [23]

Karma malzemenin çekme deneyi sonrasında elastiklik modülü 96.45 GPa, akma dayanımı 274 MPa, çekme dayanımının 427 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Karma malzemenin gerilme şekil değişimi eğrisi

5. SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ SONUÇLARI ve İRDELENMESİ

Yapılan çalışmada, birim hücrelerin gerilme-birim şekil değişimi özelliklerinin, kuvvetin uygulandığı yöne göre olan değişimleri incelenmiştir. Bu amaçla küresel parçacıklı basit kübik, hacim merkezli kübik ve yüzey merkezli kübik olmak üzere 3 kübik hücre modeli, her model üzerinde de [100] ve [110] olmak üzere iki yönde analiz edilmiştir. Bunların dışında hacim merkezli kübik, yüzey merkezli kübik yapılar [100] ve [110] yönlerinde, sıkı düzen hekzagonal yapıda ise [001], [010] ve [100] yönlerinde Voronoi temsili hacim elemanları kullanılarak, detaylı analizler yapılmıştır.

Gerçekte parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemede parçacıklar rasgele dağılmışlardır ve makroskobik olarak izotropluk gösterirler. İdealize edilmiş sistemleri modellerken izotropi tam anlamı ile korunamaz, bu nedenle değişik yönler için ayrı ayrı analizler yapılmıştır.

5.1. Modelin Oluşturulması

Gerçekleştirilen çalışmadan ANSYS Multiphysics v.10 kullanılmıştır. ANSYS programında yapılan analizlerden elde edilen sonuçların sağlıklı olması için, programa sınır koşulların doğru olarak tanımlanması gerekmektedir. Aşağıda birim kübik modelinin kurulması, sınır koşulları ve analiz işlemi ile ilgili bilgiler tartışılmaktadır.

Tablo 5.1 Al 2024 ve SiC için elastiklik modülü ve Poisson oranı değerleri [21,22]

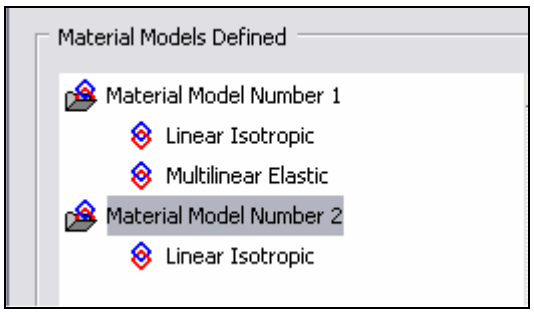
	E [GPa]	ν
Al 2024-T351	73	0.33
SiC	410	0.17

Plastik analiz yapabilmek için kullanılan malzemenin gerilme şekil değişimi eğrisinin programa tanıtılması gerekmektedir.. Kullanılan gerilme şekil değişimi eğrisi, Bao (2005)'ten alınmıştır (Şekil 4.6). Noktaların konumları, eğriden Image J programı kullanılarak elde edilmiş ve ANSYS programına tanıtılmıştır [25,26].

Matris malzemesi olarak tanımlanacak olan küp oluşturulduktan sonra, matrisin içerisinde yer alacak olan SiC parçacığı için 1/8 kürenin yerleşeceği kısım boşaltılmıştır. Boş kısma 1/8 küre yerleştirilmiş ve bu iki hacim GLUE komutu kullanılarak yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemini parça ağ yapısı ile kaplanmadan önce yapılmalıdır aksi halde birleşim alanlarında boşluklar meydana gelecektir.

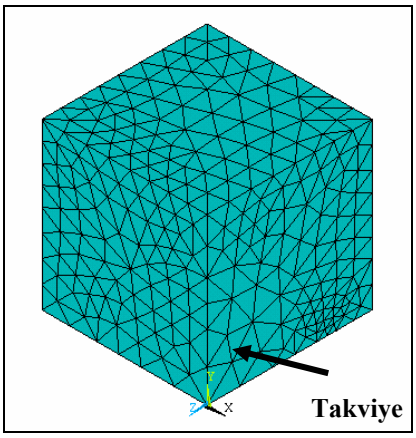
Malzeme özellikleri girilirken, matris malzemesine iki özellik tanımlanmalıdır; elastiklik modülü ve Poisson oranı değerlerinin girilebilmesi için lineer izotropik, malzemenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin noktalarının girilebilmesi için multilineer elastik seçilmiştir (Şekil 5.1). Takviye malzemesi olan SiC ise sadece lineer izotropik olarak belirtilmiştir.

Özellikler girilirken dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri de değerlerin aynı birim ile tanımlanmasıdır. Program, girilen değerleri herhangi bir birim dönüşümüne tabi tutmadan kullanmaktadır.



Şekil 5.1 Malzeme özelliklerinin tanımlandığı pencere

Modelin ağ yapısı ile kaplanmasında kullanılacak eleman olarak solid 92 seçilmiştir. Malzeme özellikleri ve eleman seçildikten sonra model ağ yapısı ile kaplanmıştır (Şekil 5.2). Ağ yapısı ile kaplama işlemi modelin analiz edilebilmesi için küçük parçalara ayrılmasıdır ve analizden alınacak olan sonucun doğruluğu için büyük öneme sahiptir. Ancak ağ yapısının yoğunluğu arttıkça analiz süresi dolayısı ile de işlemin maliyeti arttığı için yeterli yoğunluğun belirlenmesi önemlidir.



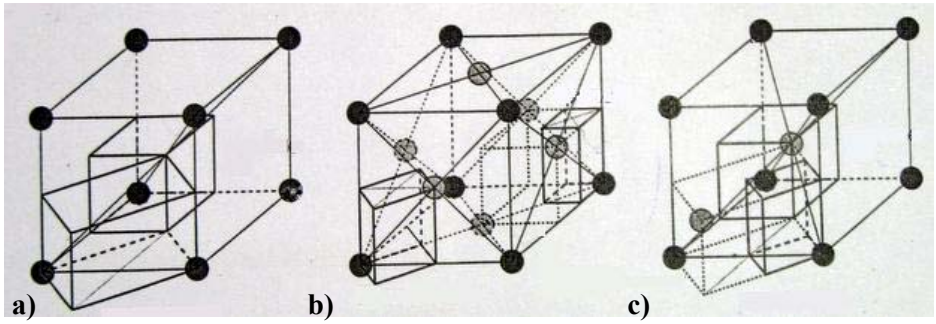
Şekil 5.2 Modelin ağ yapısı ile kaplandıktan sonraki görüntüsü

Sınır şartlarının doğru olarak belirtilmesi yapılan analiz işlemi sonucunda istenilen sonuçların alınması için çok önemlidir. Şartların yanlış olarak girilmesi halinde de program analizi gerçekleştirecektir fakat aldığımız sonuçlar, istediğimiz sonuçlar olmayacaktır.

Model ile ilgili tanımlama işlemleri bittikten sonra, seçilen alana uygulanacak olan basınç girilmiştir, çekme işlemi yapılmak istenildiği için basınç eksi olarak tanımlanmıştır. İstenilen koşullar tanımlandıktan sonra model analiz ettirilmiştir.

Çözüm bittikten sonra ANSYS ana menüsünde bulunan GeneralPostProc sekmesi üzerinden ister matris ve takviye için ayrı ayrı ister de ikisi için beraber olarak sonuçlar, rakamsal ve grafiksel olarak incelenebilmektedir.

5.1.1. Küresel Elemanlar Kullanılan Model



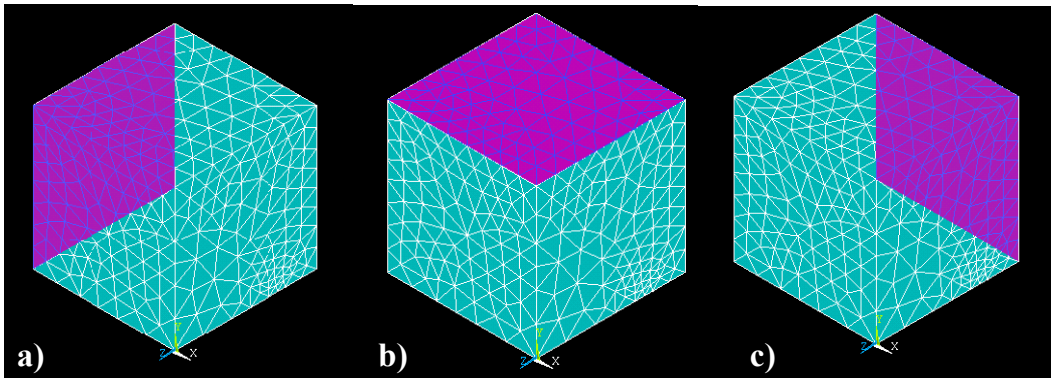
Şekil 5.3 Analiz edilecek birim hücreler ve yönleri; a) Birim Kübik; b) YMK; c) HMK [24]

Şekil 5.3'te analizlerde ele alınacak olan kübik yapılar ile bu yapıların [100] ve [110] yönleri görülmektedir [24].

5.1.1.1. Sınır Şartları

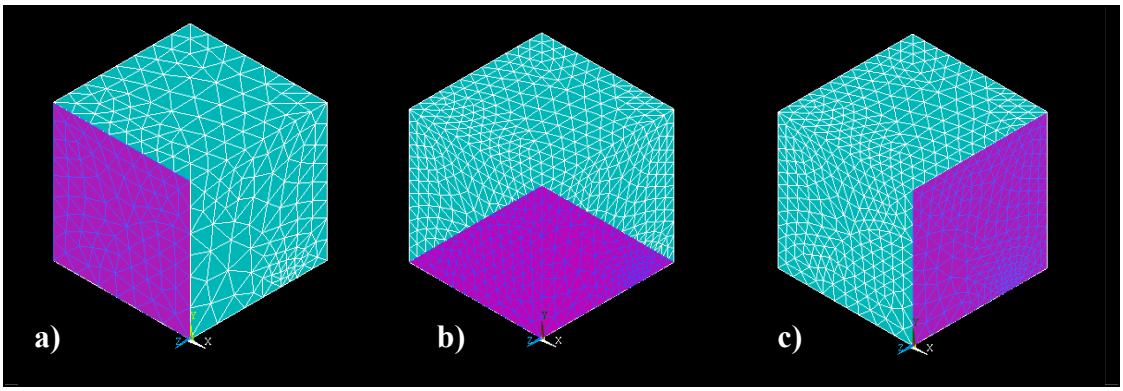
Şekil 5.4'te gösterilen yüzeylerin uygulanan basıncın etkisi ile, belirlenen yönlerde düzlemselliklerini yitirmeleri istenmediği için, üzerlerine bulunan düğüm noktaların

hareketleri çift olarak tanımlanmalıdır. Şekil 5.4 a' da seçili olan yüzeyde bulunan düğüm noktaları y yönündeki hareketleri, Şekil 5.4 b'de seçili olan yüzeyde bulunan düğüm noktaları x yönündeki hareketleri Şekil 5.4 c'de seçili olan yüzeyde bulunan düğüm noktaları ise z yönündeki hareketleri çiftlenmişlerdir. Bu düğüm noktalarının hareketlerinde herhangi bir yönde kısıtlama yapılmamıştır.



Şekil 5.4 Hareketleri belirli bir yönde çift olarak tanımlanmış düğüm noktaları

Belirli bir yönde hareket etmesi istenmeyen yüzeylerde ise bu yöndeki yer değişimi sıfır olarak tanımlanmıştır. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken nokta şudur, matris ve takviye elemanı iki ayrı hacim oldukları için her iki hacmin belirlenen yöndeki yüzeyleri seçilerek hareketsiz olarak tanımlanmalıdır. Şekil 5.5 a'da seçili yüzeyin z yönündeki hareketi engellenmiştir Şekil 5.5 b'de gösterilen yüzeyin y yönündeki hareketi kısıtlanmıştır, Şekil 5.5 c'de gösterilen yüzeyin ise x yönündeki hareketi engellenmiştir.

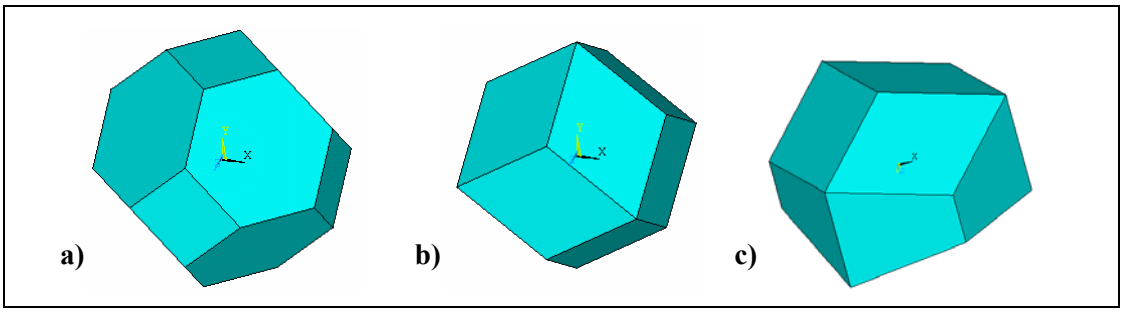


Şekil 5.5 Hareketi belirli bir yönde sınırlandırılan yüzeyler

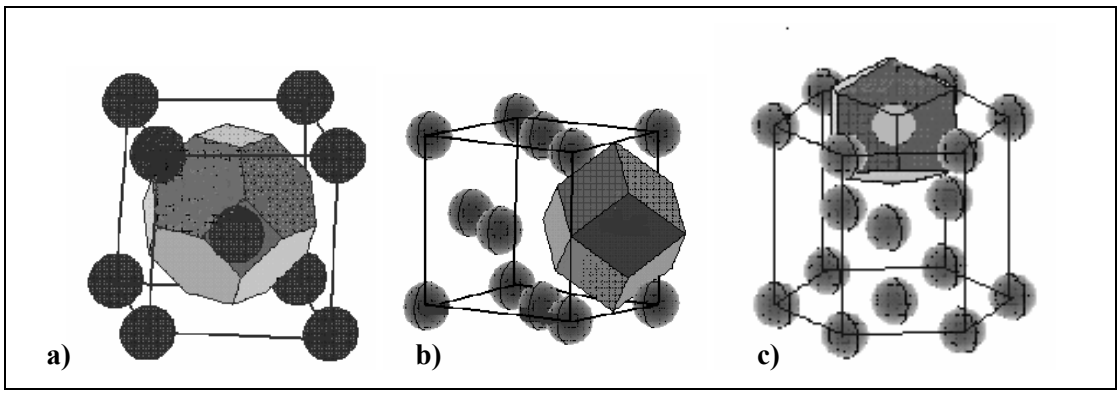
5.1.2. Voronoi Temsili Hacim Elemanları İçeren Birim Hücre Modelleri

Voronoi temsili hacim elemanları, konumları 3.4.2., 3.4.3. ve 3.4.4. bölümlerde verilen bağıntılar yardımı ile hesaplandıktan sonra ANSYS programında belirlenen konumlarda oluşturulan noktaların birleştirilmesi yolu ile çizilmiştir. Voronoi temsili hacim elemanları Şekil 5.6'da, birim hücre içinde yerleşimleri Şekil 5.7'de

gösterilmiştir. Voronoi temsili hacim elemanlarının anahtar nokta konum ve koordinatları EK 1'de verilmiştir.

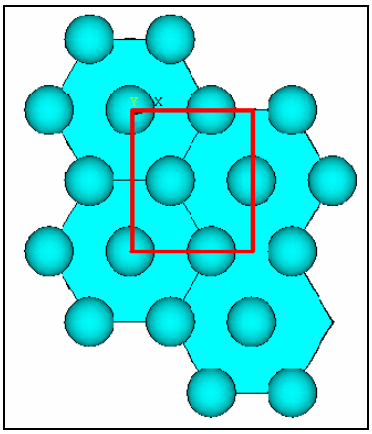


Şekil 5.6 Analizlerde kullanılan Voronoi temsili hacim elemanı a)HMK; b)YMK; c)SDH

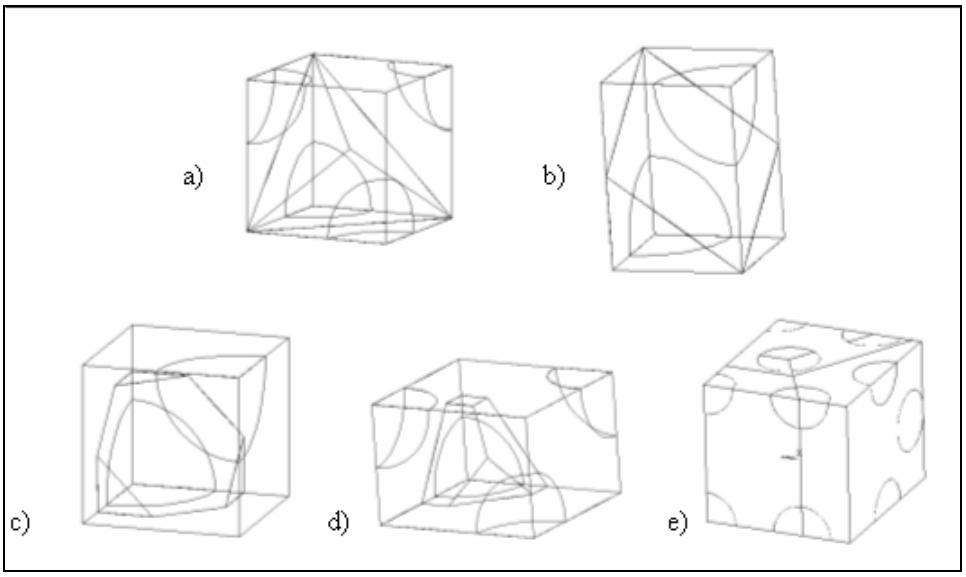


Şekil 5.7 Voronoi temsili hacim elemanlarının hücre içerisindeki yerleşimleri a)HMK; b)YMK; c) SDH

Sıkı düzen hekzagonal modelin oluşturulmasında birbirleri ile temas eden dört SDH dağılım çizilmiştir ve analizde kullanılacak model Şekil 5.8'de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



Şekil 5.8 SDH model oluşturulması



Şekil 5.9 Sonlu elemanlar analizinde kullanılan Voronoi hücre modelleri a)YMK [100]; b) YMK [110]; c) HMK [100]; d) HMK [110]; e) SDH

5.2. Analiz Sonrası Elde Edilen Değerler

ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak önceki başlıklarda anlatılan modeller ve sınır şartları kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonrasında anılan dağılımlar için elastik ve plastik analizler yapılmıştır. Analizler sırasında kullanılan eleman ve düğüm noktası sayıları Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Analizlerde kullanılan düğüm noktası ve eleman sayıları

	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
BK[100]	14274	21239
BK[110]	12733	19146
HMK[100]	12827	19166
HMK[110]	9973	15184
YMK[100]	16129	24435
YMK[110]	12846	19605
SDH	12364	18965

5.2.1. Elastik Analizlerin Sonuçları

Elastik bölgede yapılan analiz sonucu elde edilen elastiklik modülü ve Poisson oranı değerleri ile analitik ve ampirik yöntemler kullanılarak elde edilen elastiklik modülü değerleri Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'de verilmiştir. Sonlu elemanlar modelleri için elastiklik modüllerinin kendi aralarındaki değişimi ile analitik ve ampirik yöntemleri ile elde edilen değerlerin karşılaştırılması Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

Tabloda verilen E [111] değerleri [17];

$$\frac{4}{E^{110}} = \frac{1}{E^{100}} + \frac{3}{E^{111}} \tag{5.1}$$

bağıntısından yararlanılarak hesaplanmıştır.

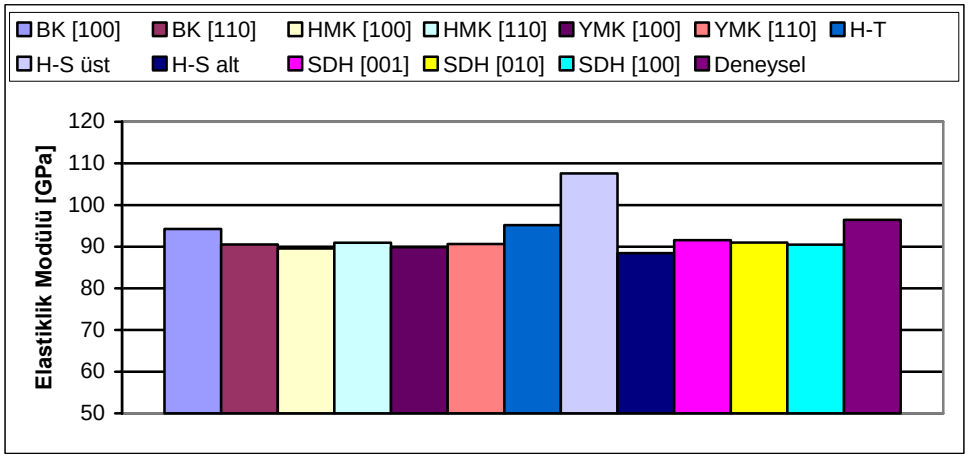
Tablo 5.3 Elastik analiz sonuçları

	E [GPa]	E [100] [GPa]	E [110] [GPa]	ν [100]	K [100] [GPa]	E [111] [GPa]
H-S üst	107.587	-	-	-	-	-
H-S alt	88.458	-	-	-	-	-
H-T	95.191	-	-	-	-	-
BK	-	94.250	90.546	0.31	81.390	89.375
HMK	-	89.716	87.976	0.32	80.825	87.410
YMK	-	90.768	90.681	0.32	81.773	90.652
Deney	96.45					

Tablo 5.4 SDH için elastik analiz sonuçları

SDH		
E [001] [GPa]	E [010] [GPa]	E [100] [GPa]
91.564	90.975	90.490

Bu analizlerin sonucunda, kübik simetriye sahip olan bütün kübik sistemler için, elastiklik modülü (E), Poisson oranı (υ) ve kayma modülü (K) hesaplanmıştır. Bu tablodan görüldüğü üzere hacim merkezli kübik ve yüzey merkezli kübik yapılar, birim kübiğe göre çok daha az anizotropi göstermektedirler. Diğer iki hücre arasında ise, yüzey merkezli kübik yapı hacim merkezli kübik yapıya göre daha az anizotropi göstermektedir ancak bu fark birim kübik ile bu iki yapı arasındaki farktan oldukça azdır.



Şekil 5.10 Modellerin için elastiklik modüllerinin kendi aralarındaki değişimi ile analitik ve ampirik yöntemleri ile elde edilen değerler ile karşılaştırılması

Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan elastiklik modülü değerleri deneysel olarak elde edilen değer ile karşılaştırıldığında (Şekil 5.10), birim kübik için elde edilen değerin deneysel değere en yakın olduğu görülmüştür. Bu durumun malzemenin üretilme yöntemi olan ekstrüzyon sonrasında oluştuğu, ekstrüzyondan önce takviye dağılımı ne olursa olsun işlemden sonra bu dağılımın birim kübiğe yakın tarza dönüştüğü sonucuna varılmıştır.

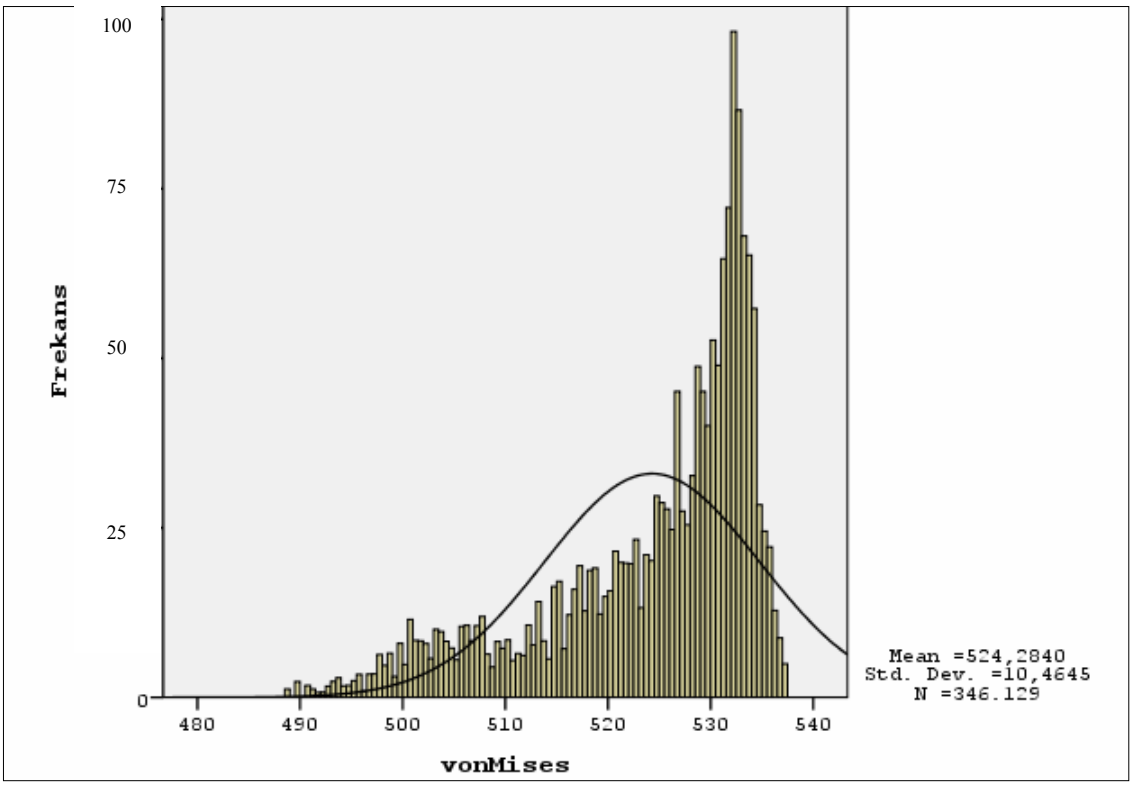
İncelenen modellerin elemanlarının von Mises gerilmelerinin dağılımları matris ve takviye malzemeleri için ayrı ayrı çizilmiştir. Grafiklerin çiziminde elemanların hacimlerine göre gerilme değerlerine frekans vermek için; incelenen elamanın hacmi en küçük eleman hacmine bölünüp, çıkan değerin on ile çarpılması ile elde edilen bir k katsayısı tamsayı olmak üzere tanımlanmıştır. Çıkan değerin on ile çarpılmasının sebebi virgülden sonraki değerlerin daha az ihmal edilmesini sağlamaktır.

$$k = \frac{V_{eleman}}{V_{enküçük}} \cdot 10 \qquad (5.1)$$

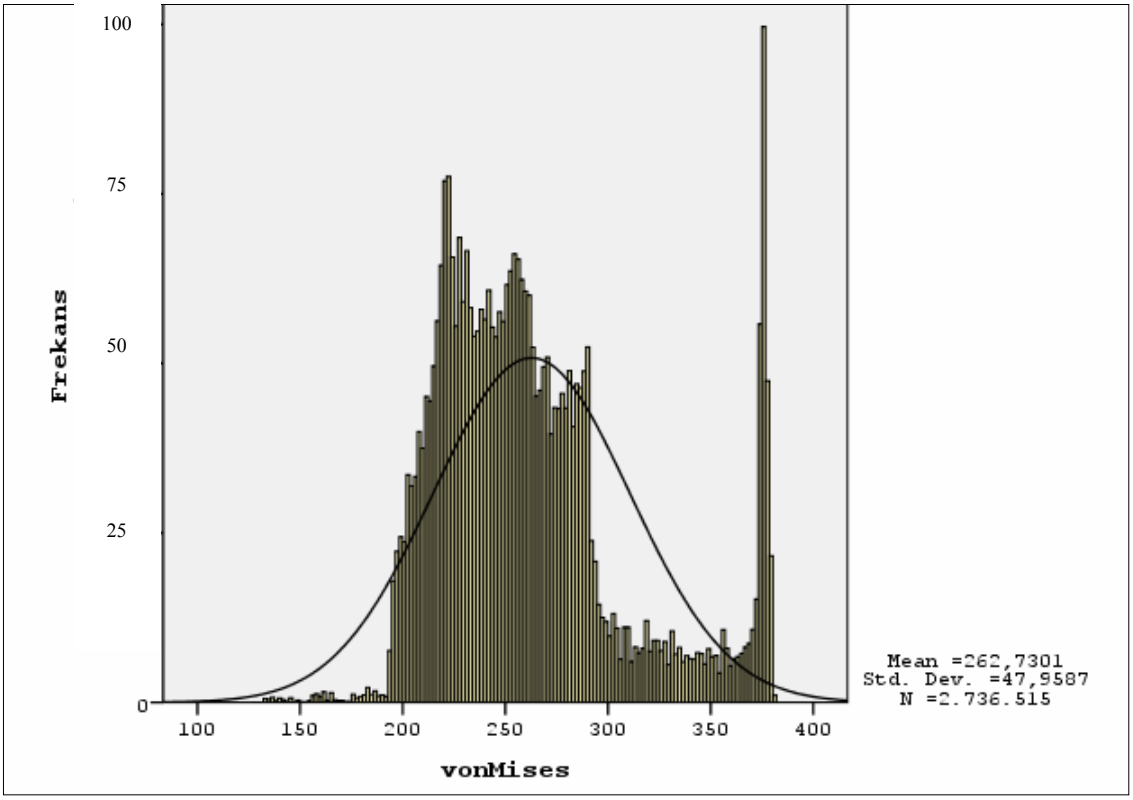
Bu katsayı, SPSS istatistiksel analiz programında elemansal von Mises ve hidrostatik gerilme değerlerine ağırlık katsayısı olarak tanımlanmış ve dağılım grafikleri çizdirilmiştir. Ortalama ile standart sapma değerleri grafik üzerinde gösterilmiştir.

Grafiklerde frekans eksenindeki sonuçlar en yüksek değeri keyfi olarak 100 seçilen değere göre çizdirilmiştir.

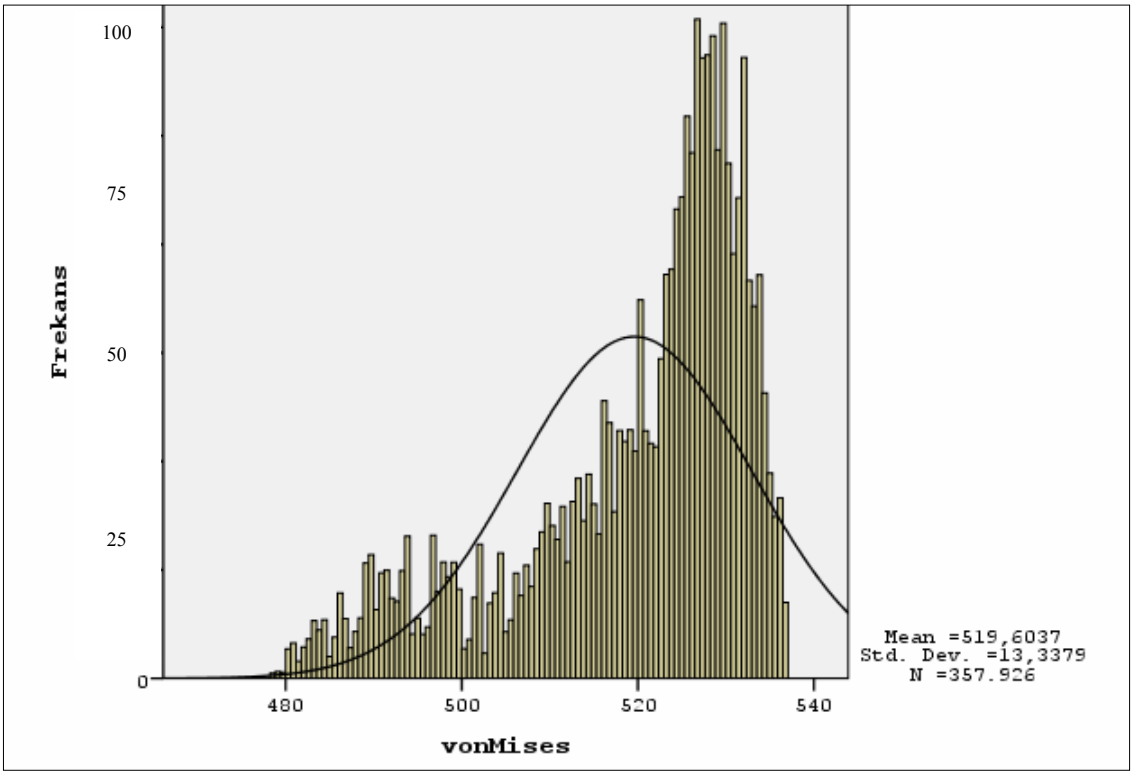
BK dağılımın von Mises gerilmesi dağım grafikleri Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de gösterilmiştir.



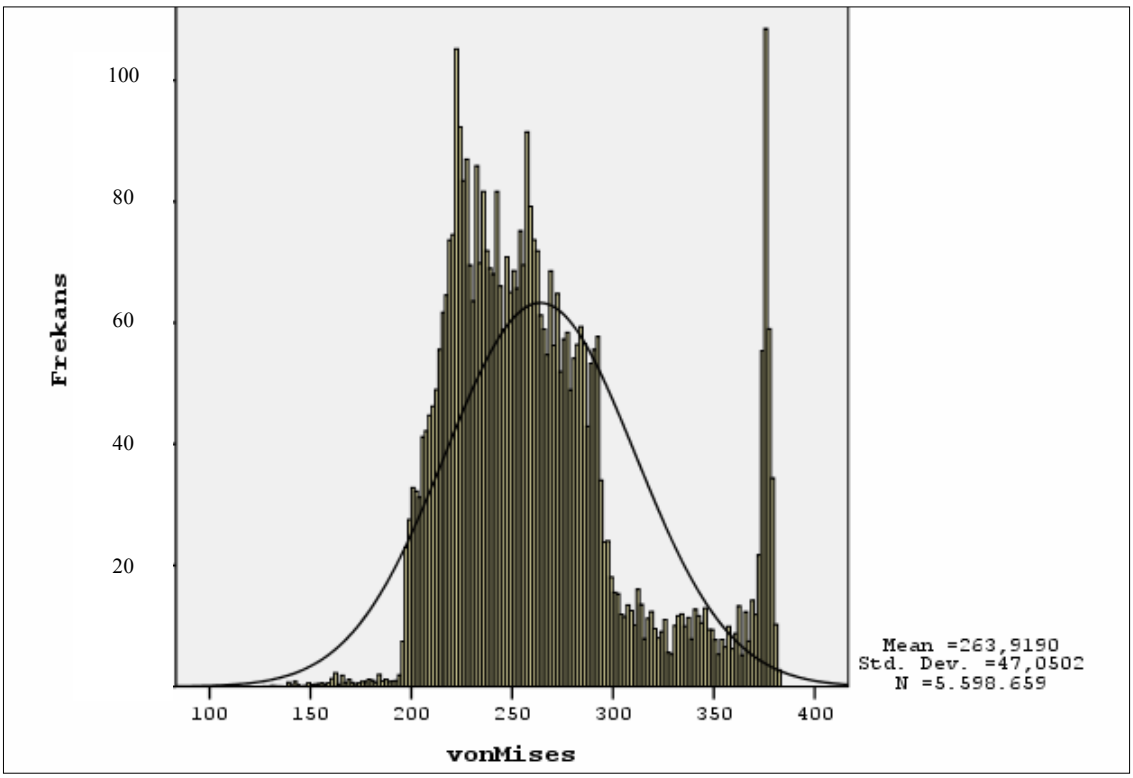
Şekil 5.11 BK takviye malzemesinin [100] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı



Şekil 5.12 BK matris malzemesinin [100] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı

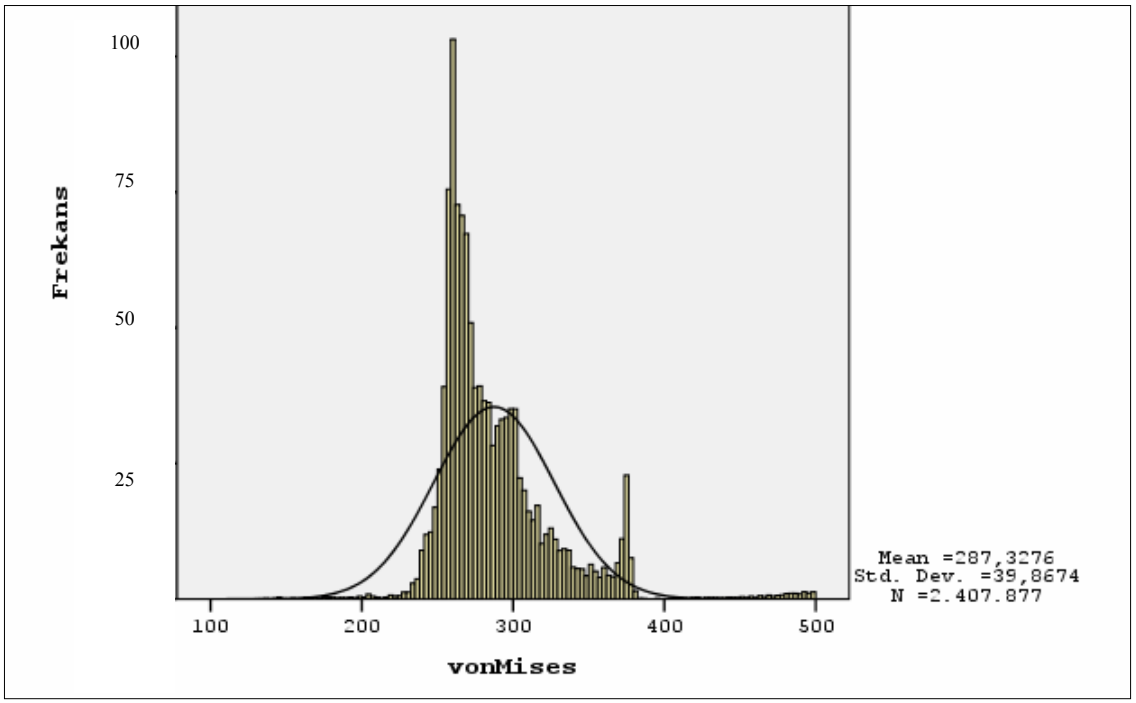


Şekil 5.13 BK takviye malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı

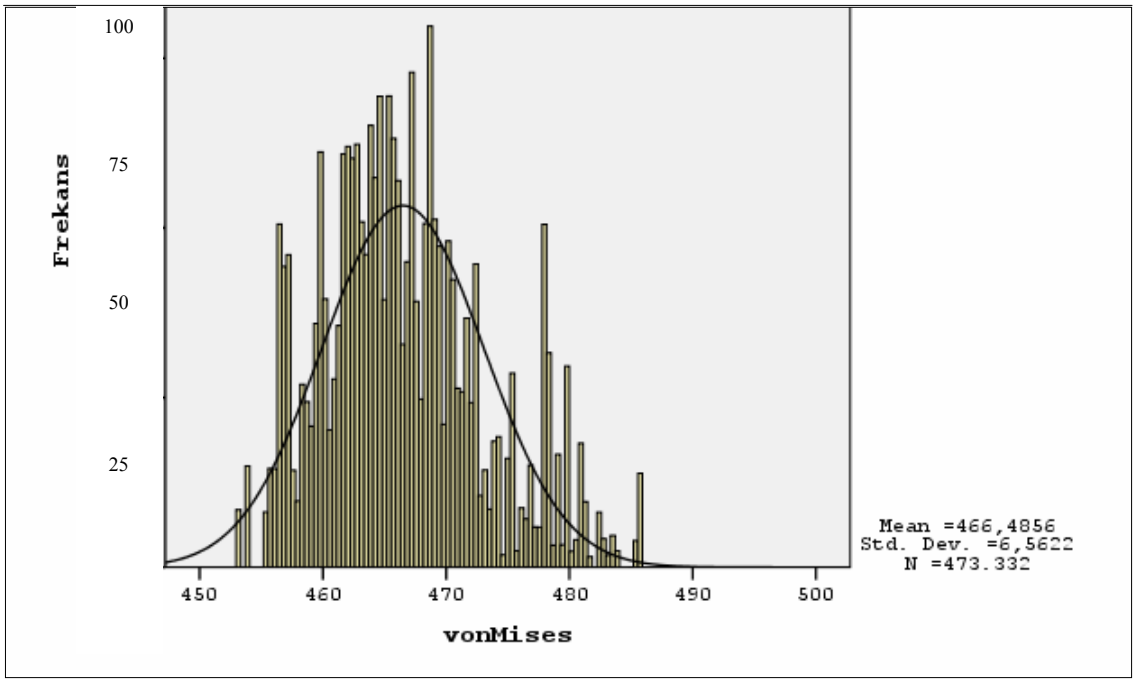


Şekil 5.14 BK matris malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı

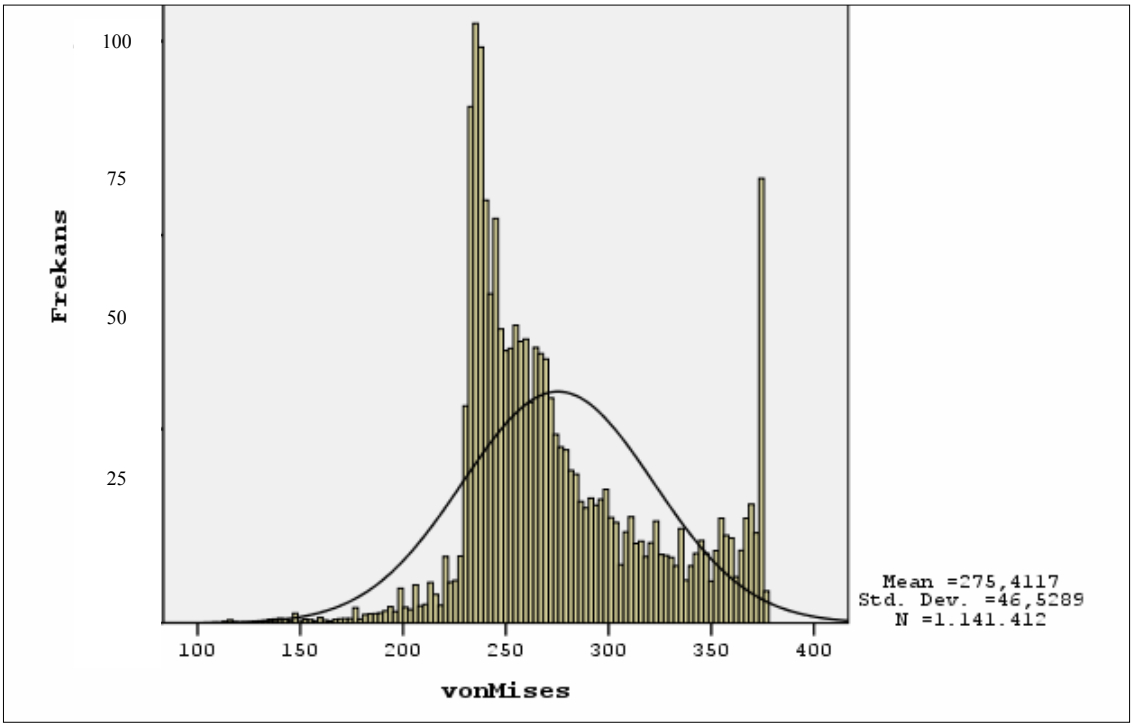
HMK dağılımın von Mises gerilmesi dağım grafikleri Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de gösterilmiştir.



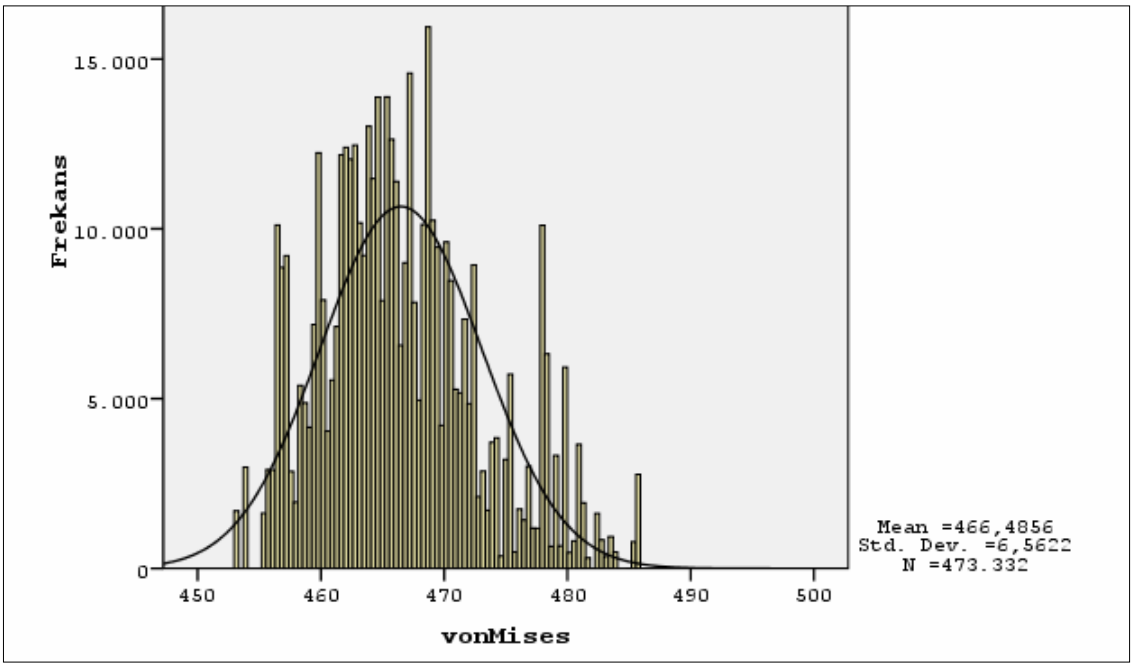
Şekil 5.15 HMK matris malzemesinin [100] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı



Şekil 5.16 HMK takviye malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı

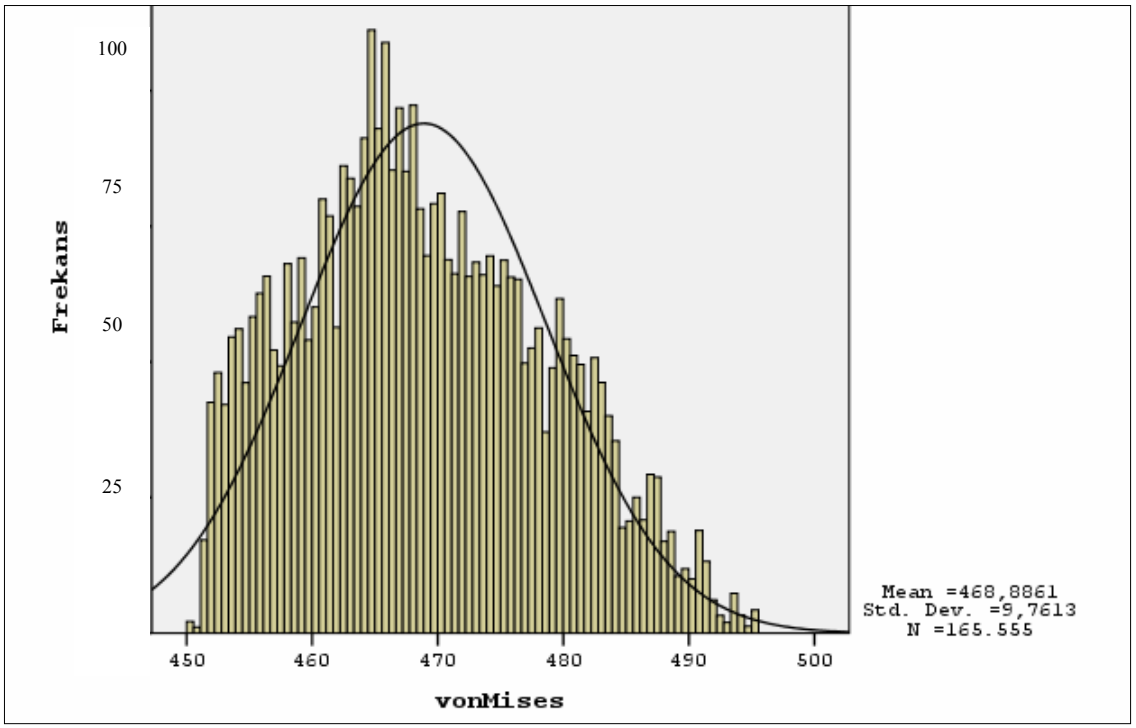


Şekil 5.17 HMK matris malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı

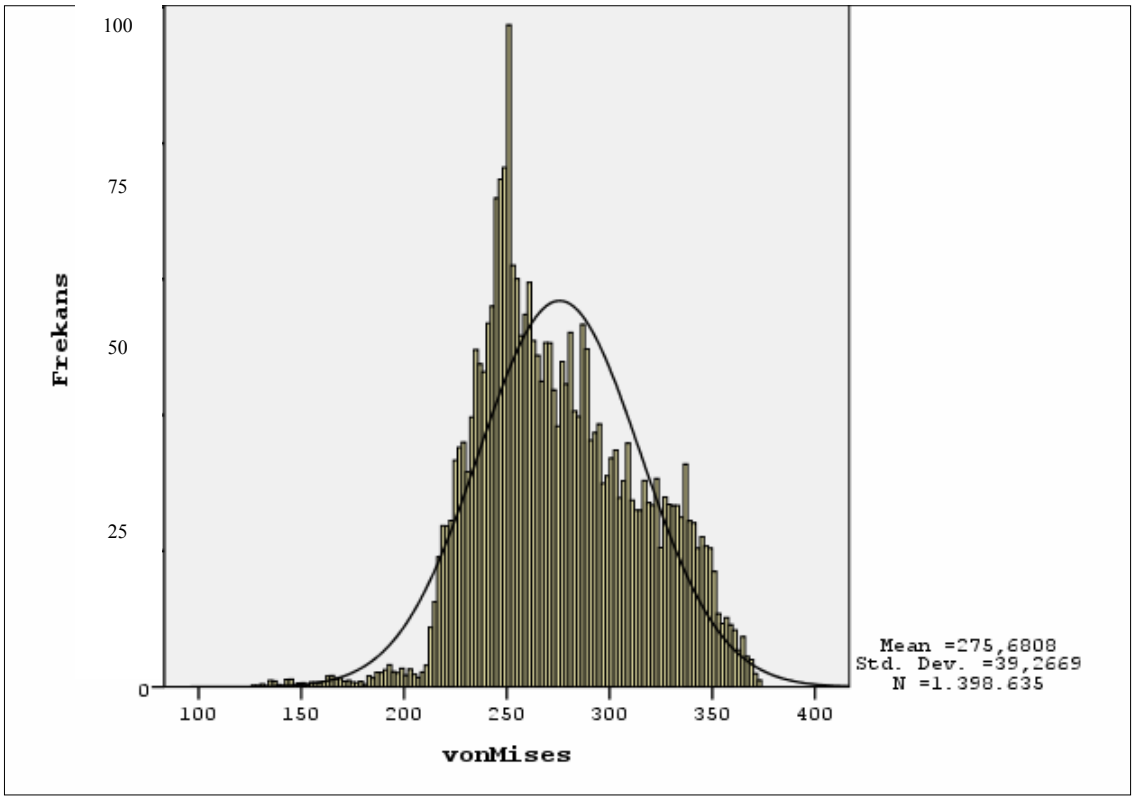


Şekil 5.18 HMK takviye malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesidağılımı

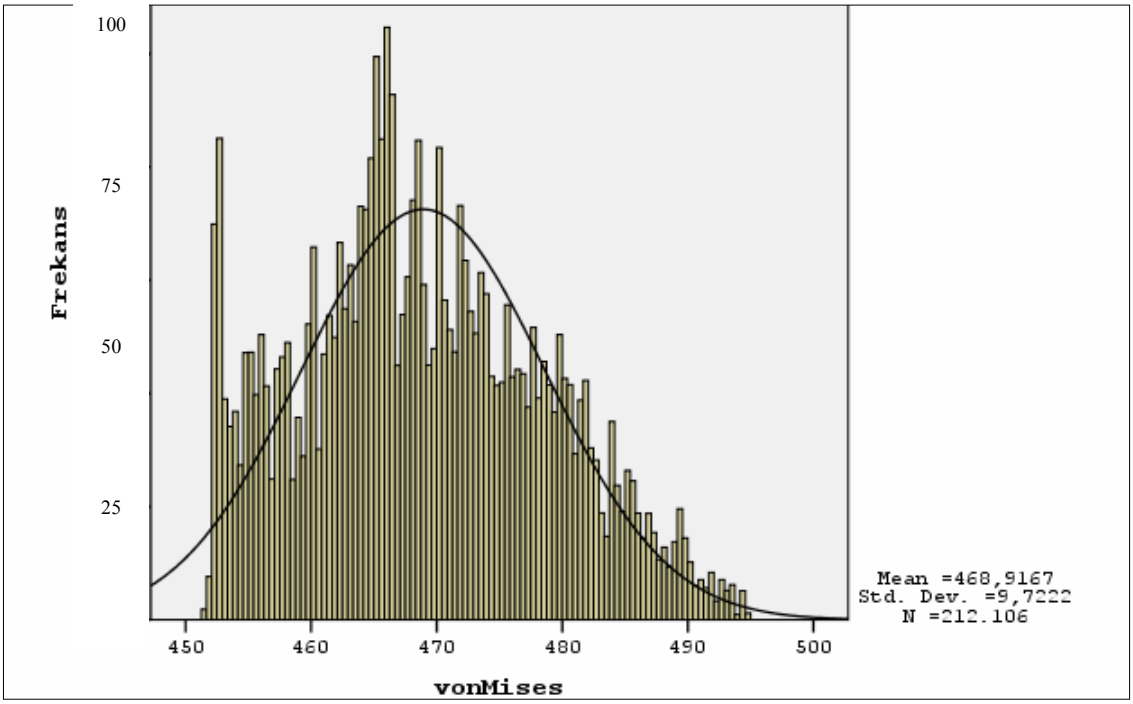
YMK dağılımın von Mises gerilmesi dağım grafikleri Şekil 5.19, Şekil 5.20 Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



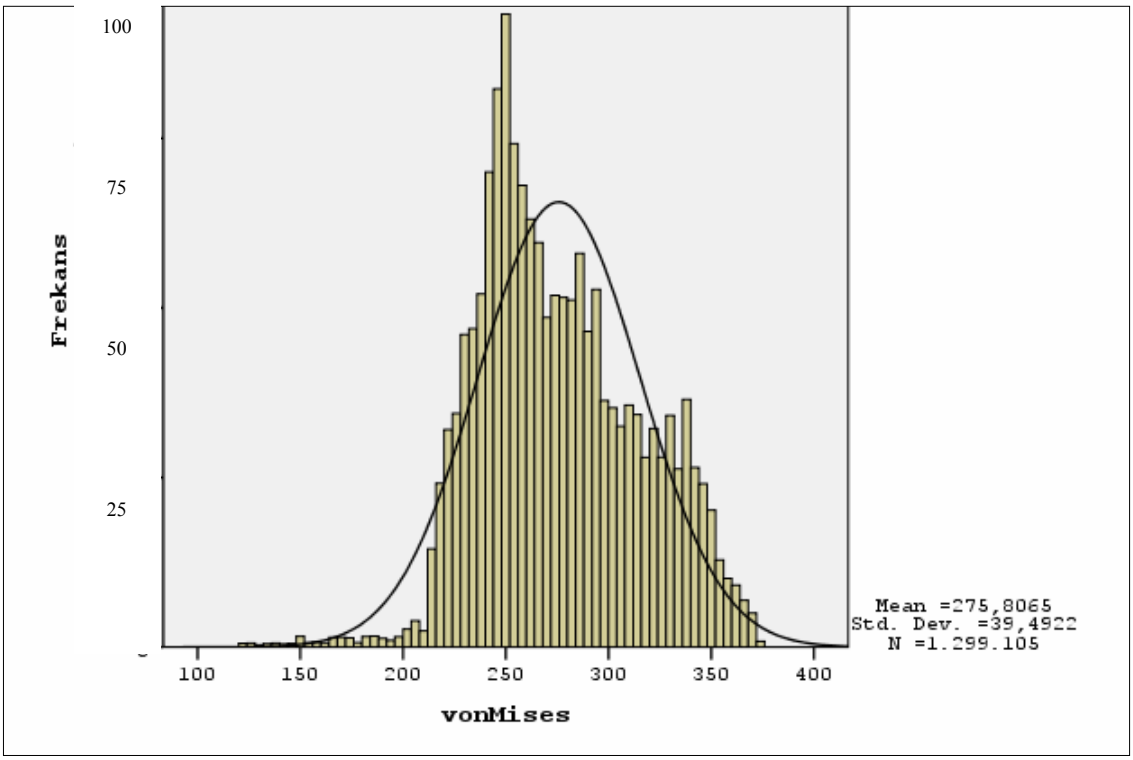
Şekil 5.19 YMK takviye malzemesinin [100] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı



Şekil 5.20 YMK matris malzemesinin [100] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı

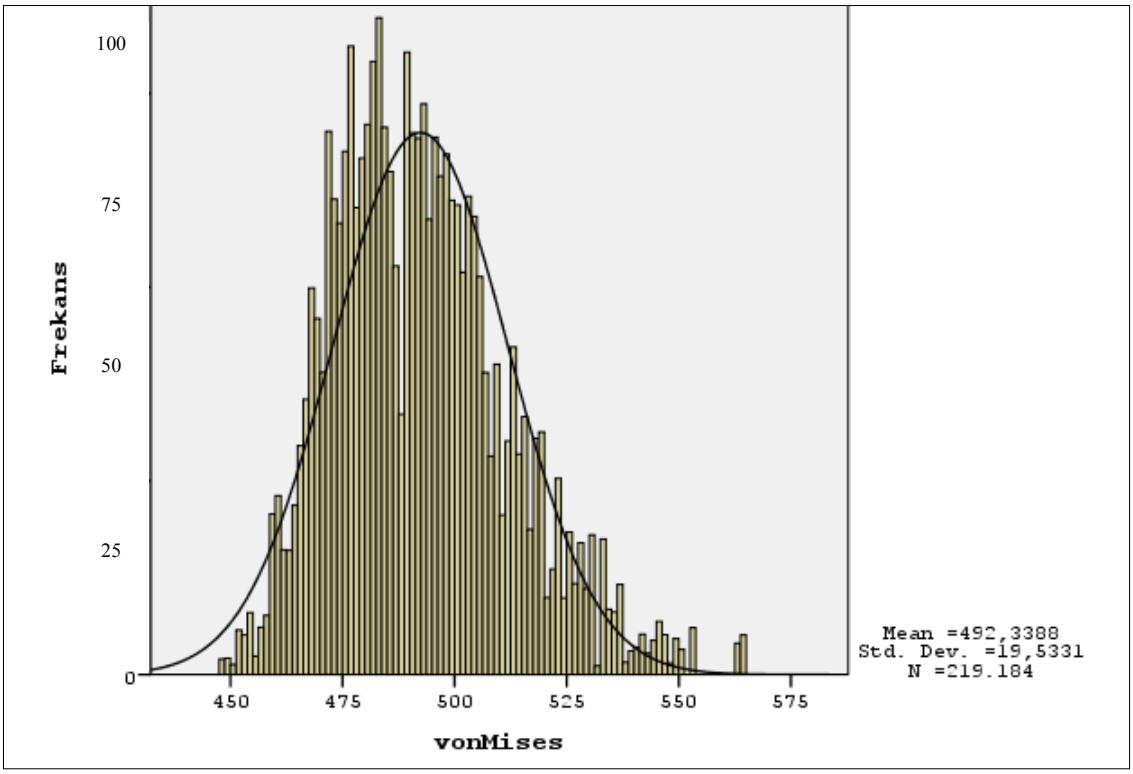


Şekil 5.21 YMK takviye malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı

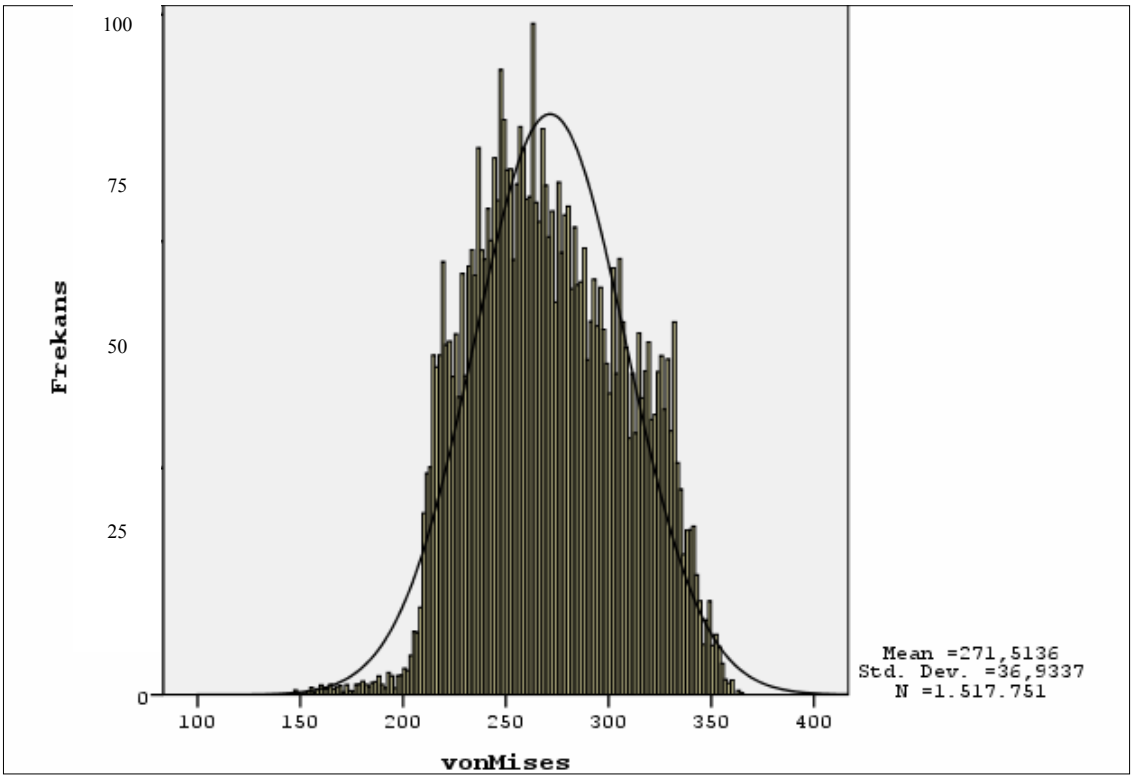


Şekil 5.22 YMK matris malzemesinin [110] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı

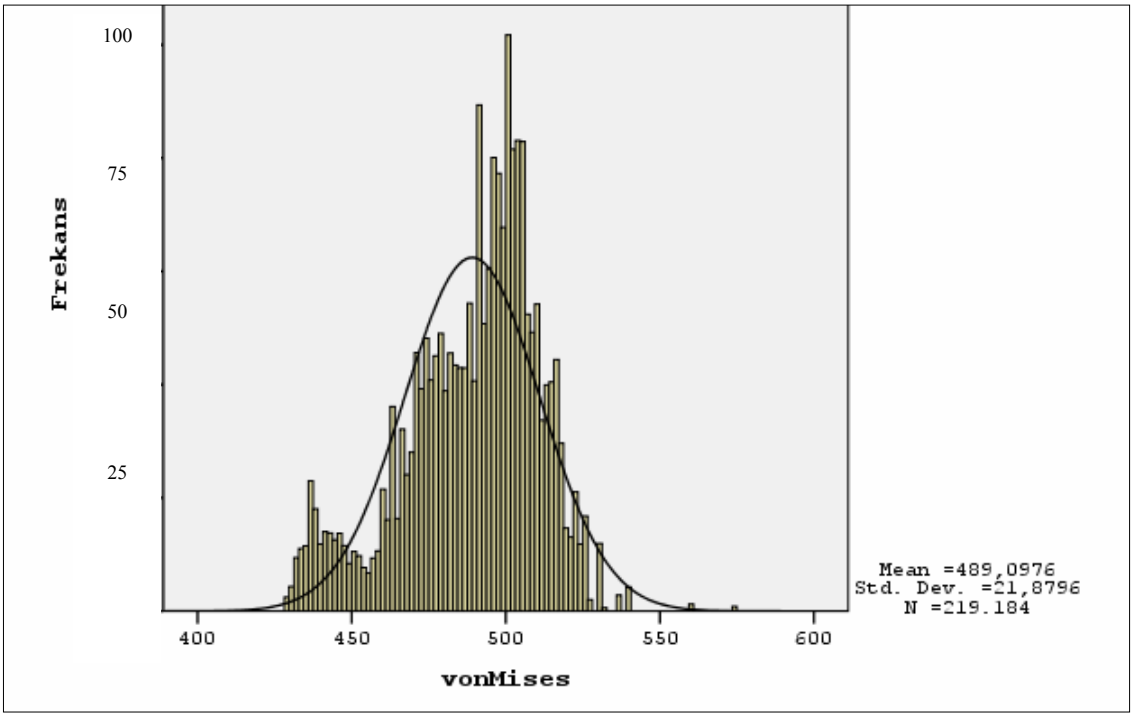
SDH dağılımın von Mises gerilmesi dağım grafikleri Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de gösterilmiştir.



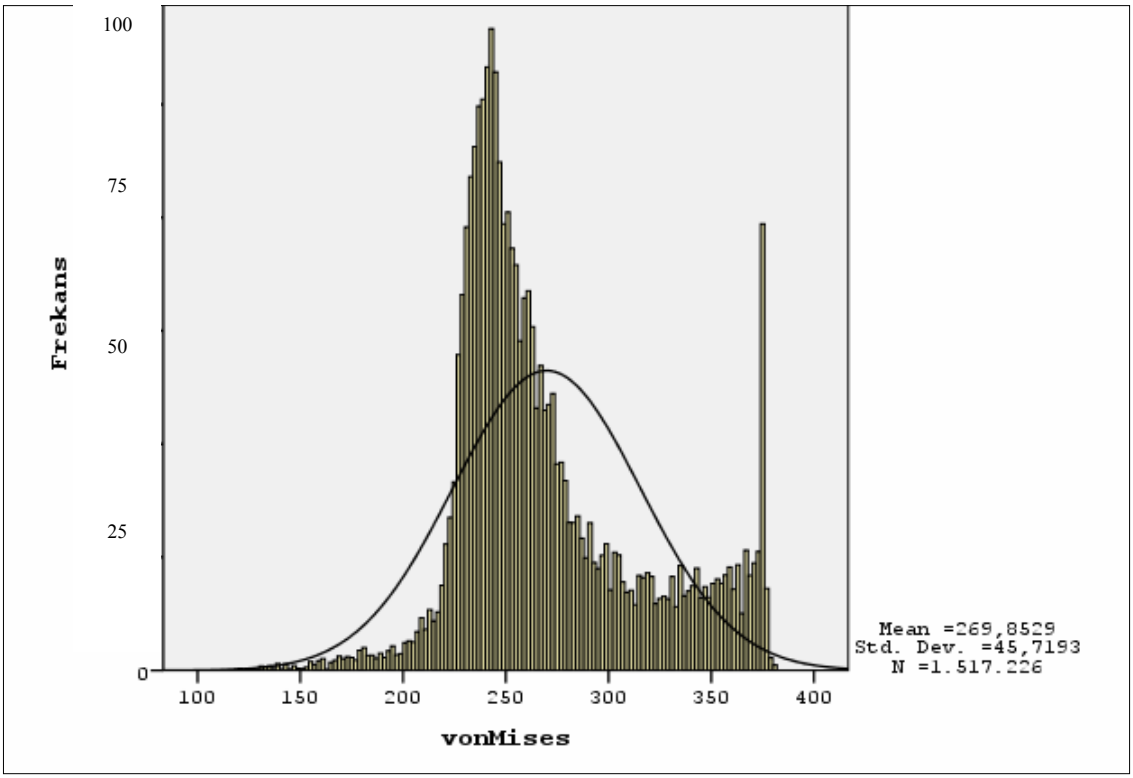
Şekil 5.23 SDH takviye malzemesinin [001] von Mises gerilmesi dağılımı



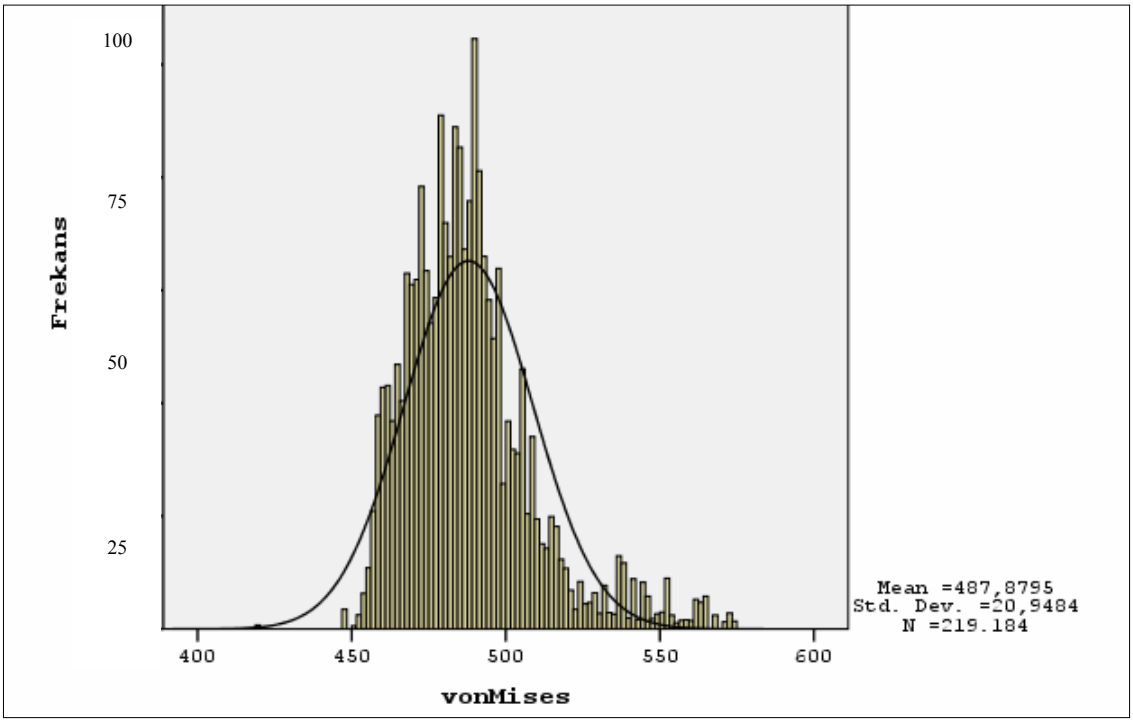
Şekil 5.24 SDH matris malzemesinin [001] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı



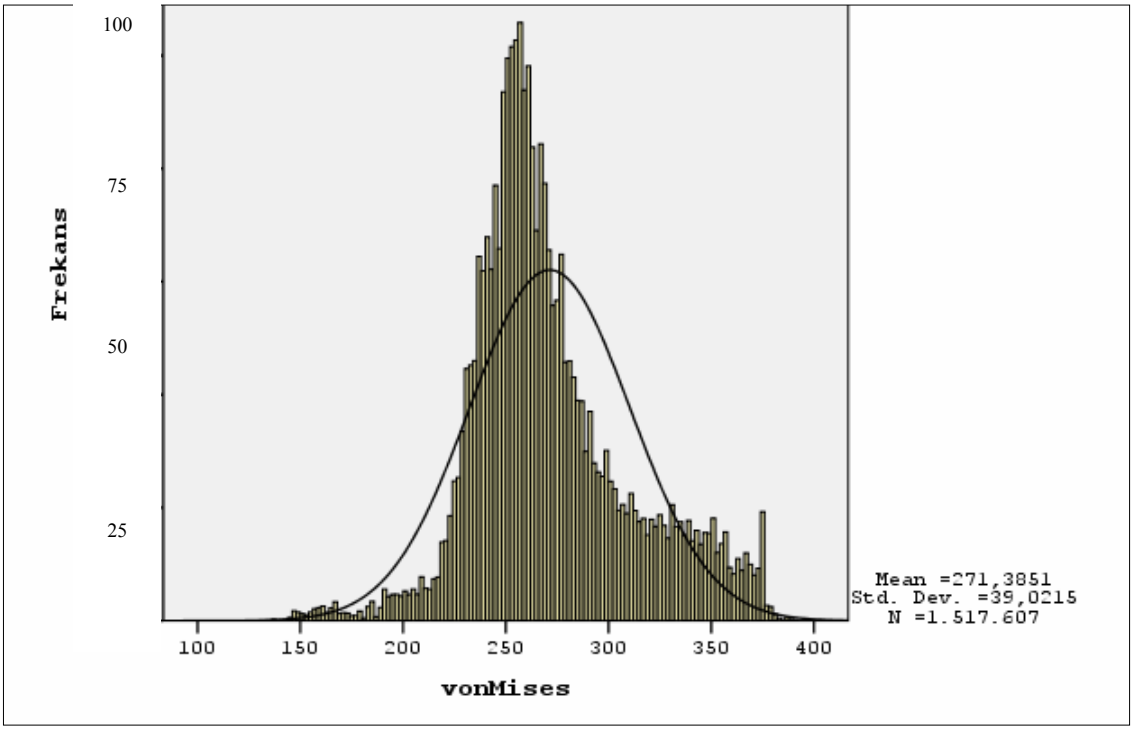
Şekil 5.25 SDH takviye malzemesinin [010] von Mises gerilmesi dağılımı



Şekil 5.26 SDH matris malzemesinin [010] yönündeki von Mises gerilmesi dağılımı

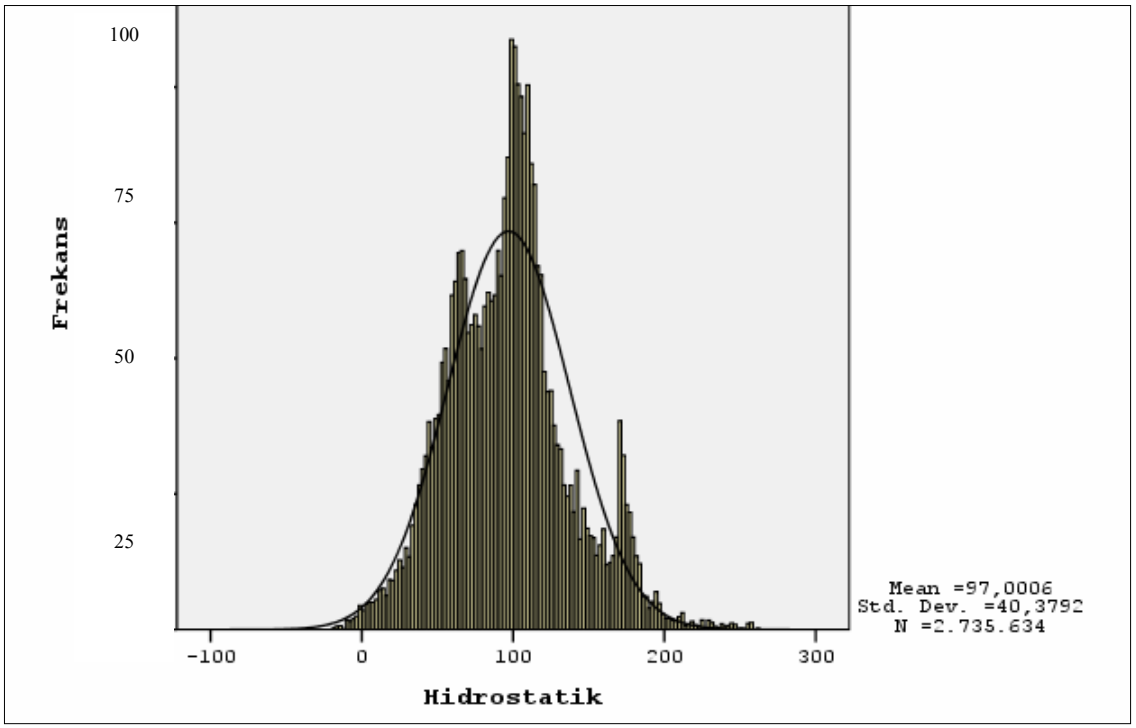


Şekil 5.27 SDH takviye malzemesinin [100] von Mises gerilmesi dağılımı

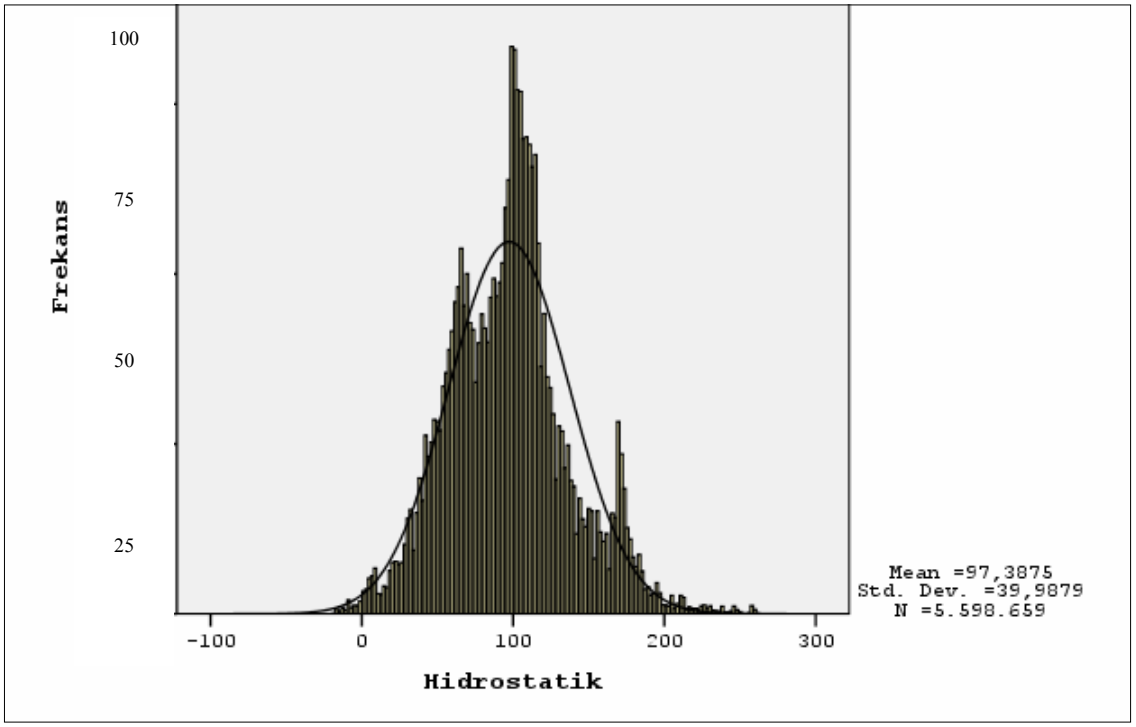


Şekil 5.28 SDH matris malzemesinin [100] von Mises gerilmesi dağılımı

BK dağılımın hidrostatik gerilme dağım grafikleri Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da gösterilmiştir.

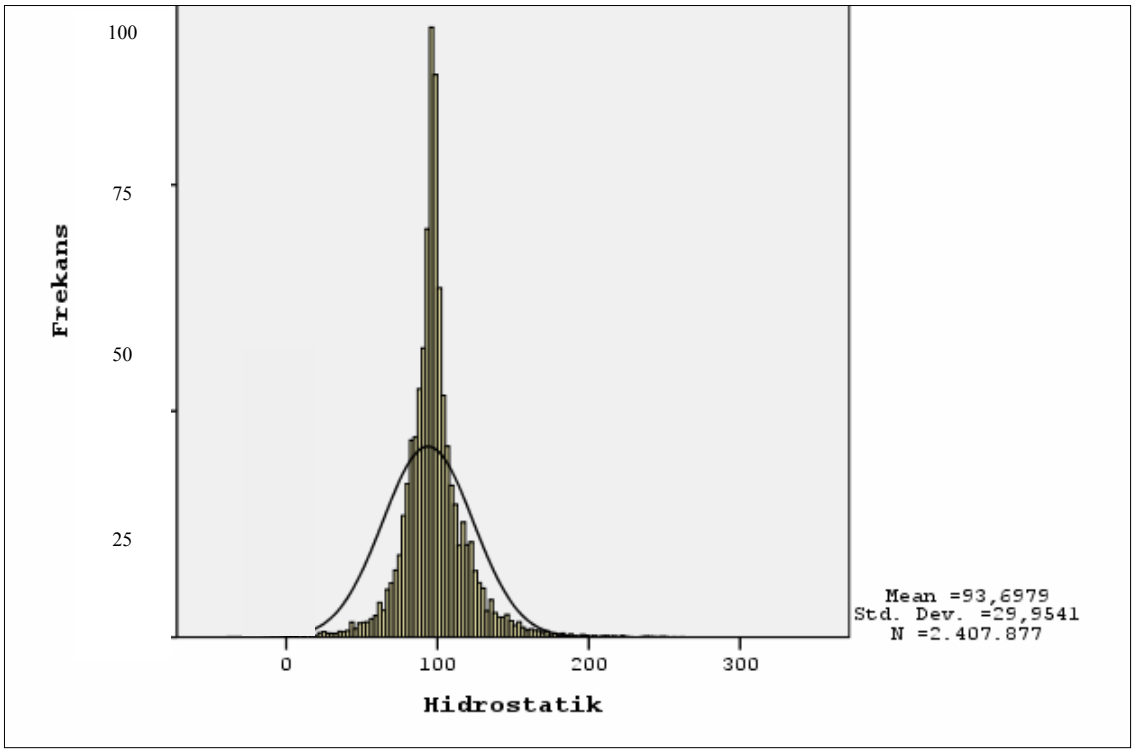


Şekil 5.29 BK matris malzemesinin [100] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı

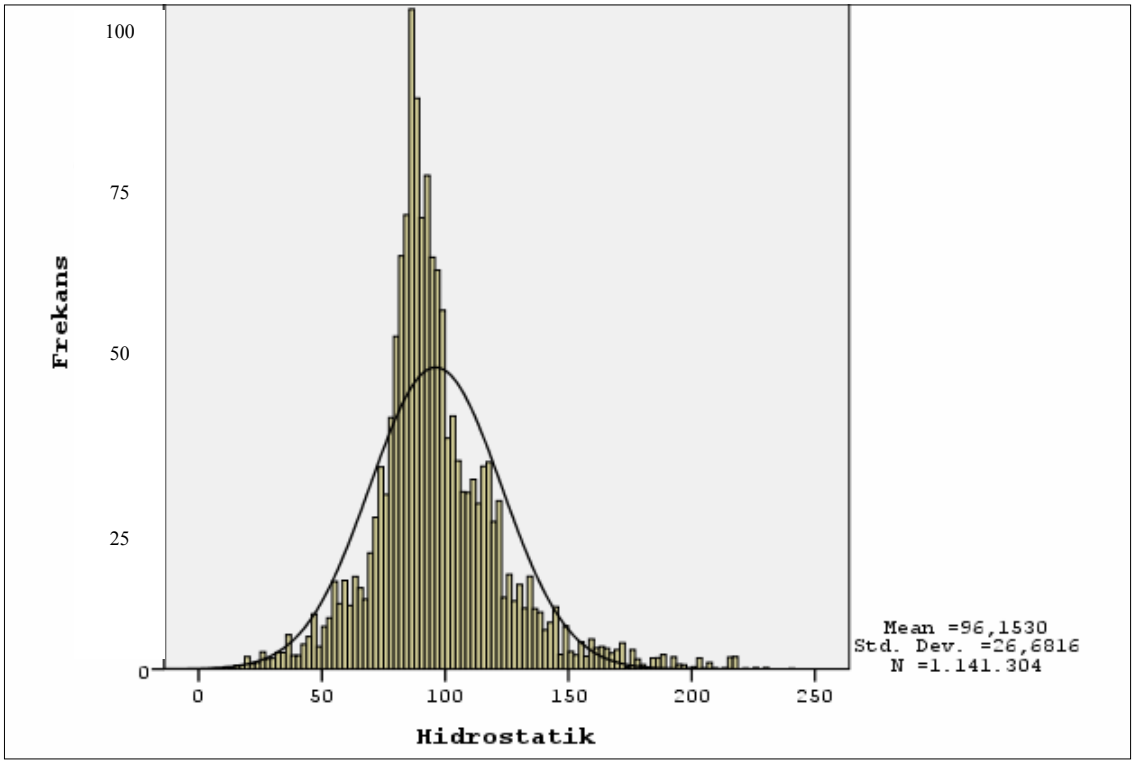


Şekil 5.30 BK matris malzemesinin [110] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı

HMK dağılımın hidrostatik gerilme dağım grafikleri Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de gösterilmiştir.

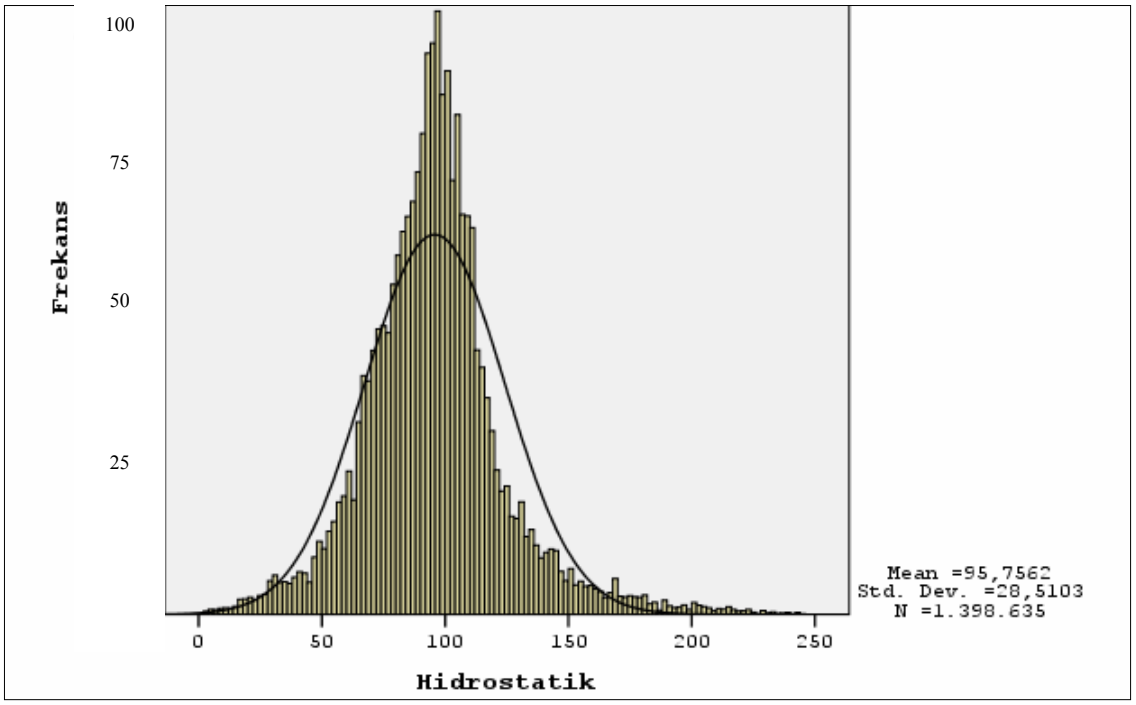


Şekil 5.31 HMK matris malzemesinin [100] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı

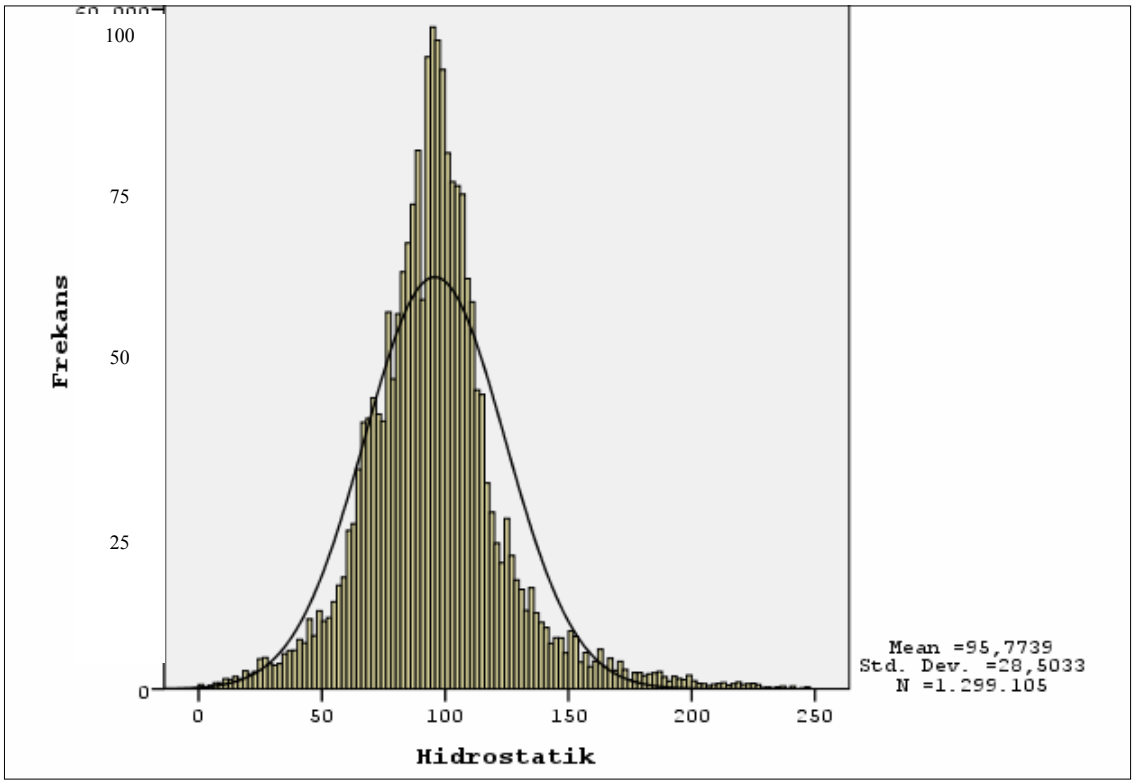


Şekil 5.32 HMK matris malzemesinin [110] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı

YMK dağılımın hidrostatik gerilme dağım grafikleri Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'de gösterilmiştir.

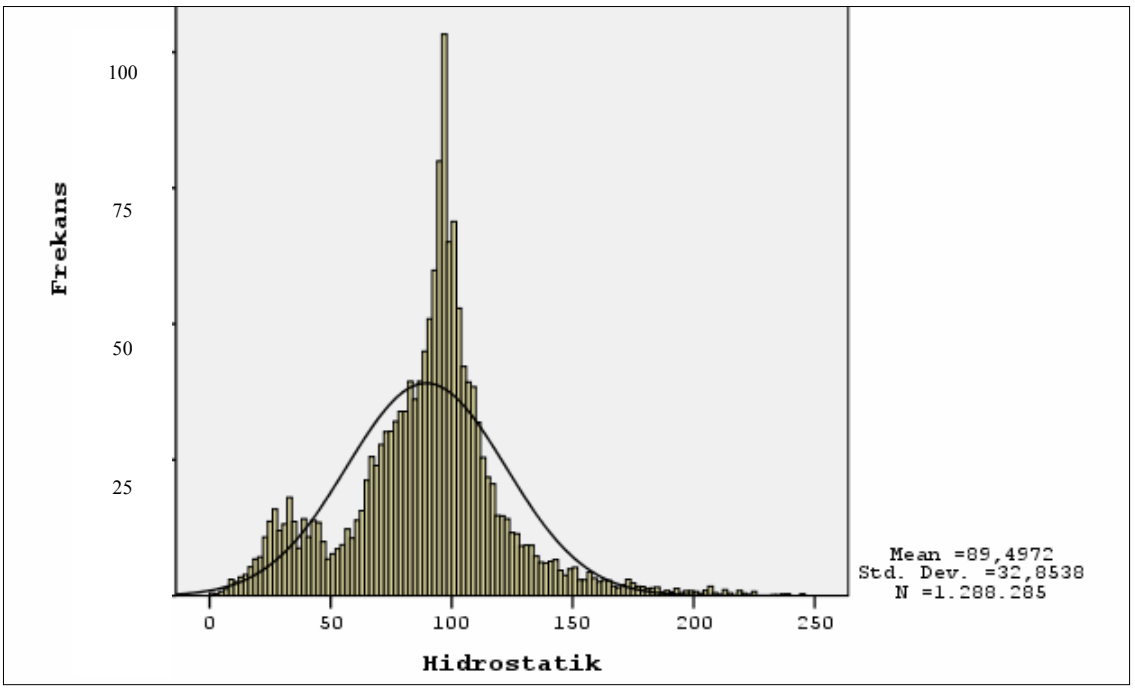


Şekil 5.33 YMK matris malzemesinin [100] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı

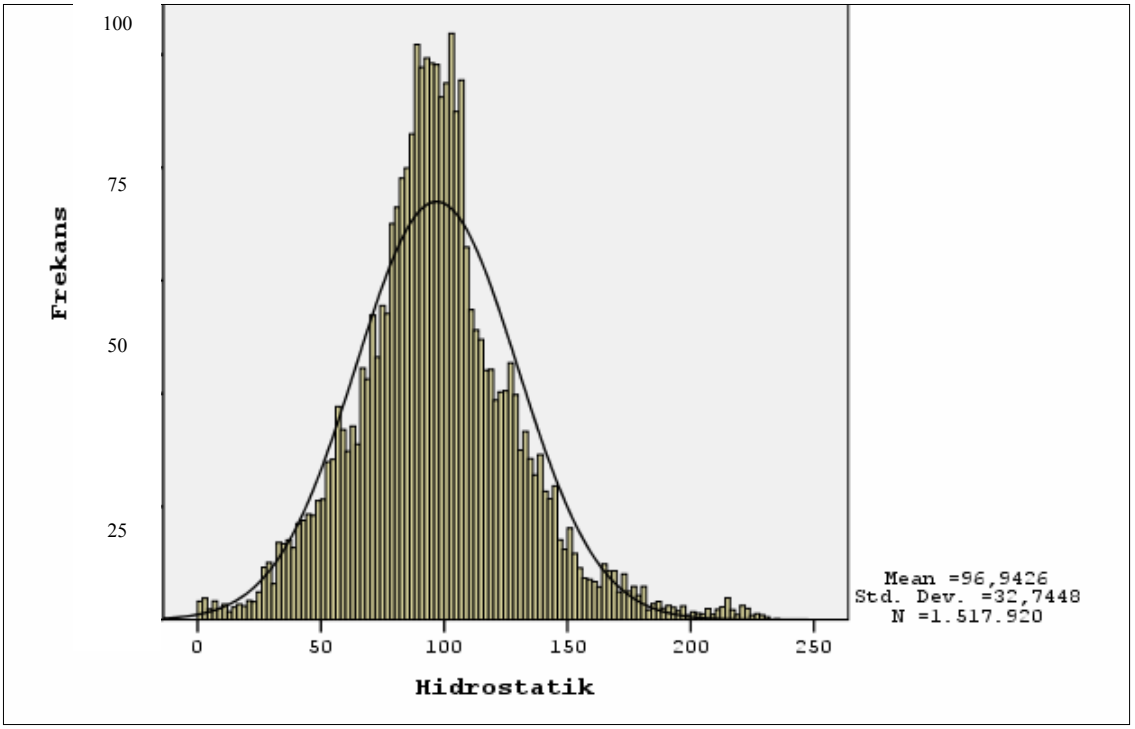


Şekil 5.34 YMK matris malzemesinin [110] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı

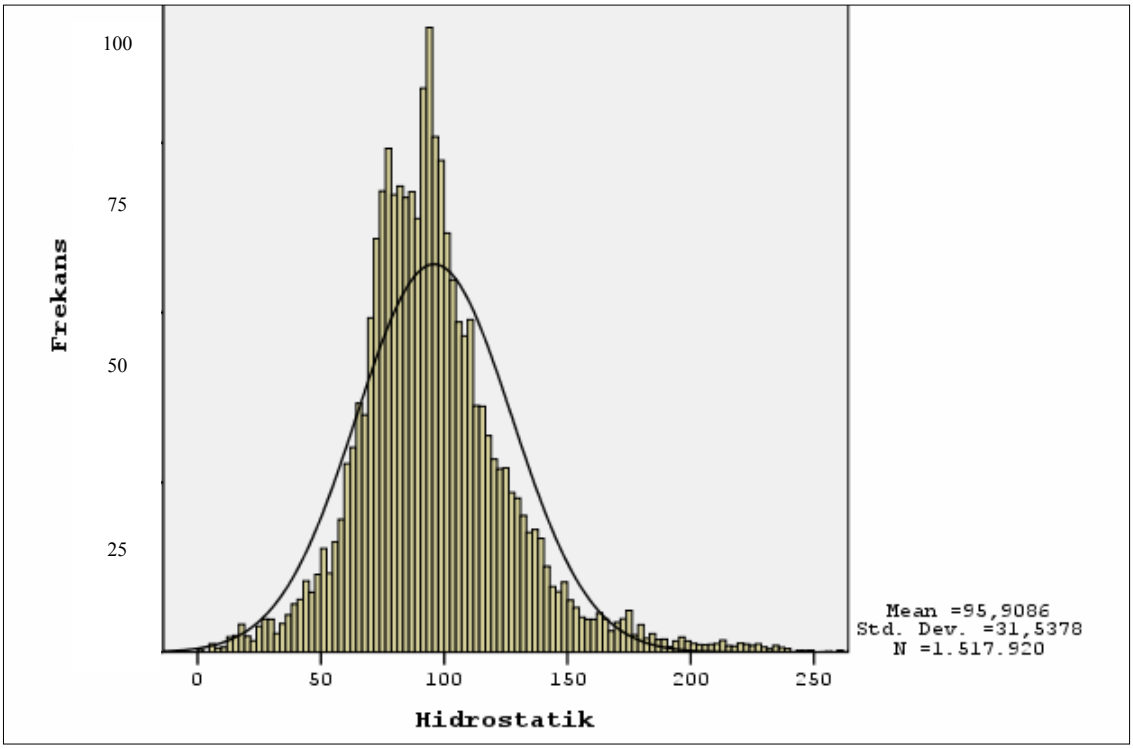
SDH dağılımın yönündeki hidrostatik gerilme dağım grafiği Şekil 5.35, Şekil 5.36 ve Şekil 5.37'de gösterilmiştir.



Şekil 5.35 SDH matris malzemesinin [001] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı



Şekil 5.36 SDH matris malzemesinin [010] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı



Şekil 5.37 SDH matris malzemesinin [100] yönündeki hidrostatik gerilme dağılımı

Tablo 5.5 Modellerin 300 MPa gerilme için von Mises gerilmeleri ile ilgili değerleri

		Doğrultu	Takviye/Matris	Ortalama	Std. Sapma
DAĞILIM	BK	[100]	Takviye	524.208	10.465
		[100]	Matris	262.73	47.959
		[110]	Takviye	519.604	13.338
		[110]	Matris	263.919	47.05
	HMK	[100]	Takviye	496.777	27.81
		[100]	Matris	287.327	39.867
		[110]	Takviye	466.485	6.562
		[110]	Matris	275.411	46.589
	YMK	[100]	Takviye	468.886	9.761
		[100]	Matris	275.68	39.266
		[110]	Takviye	468.916	9.922
		[110]	Matris	275.806	39.495
	SDH	[001]	Takviye	492.338	19.533
		[001]	Matris	271.513	36.933
		[010]	Takviye	489.097	21.879
		[010]	Matris	269.852	45.719
		[100]	Takviye	487.879	20.948
		[100]	Matris	271.385	39.021

Tablo 5.6 Modellerinin 300 MPa gerilme için hidrostatik gerilmeler ile ilgili değerleri

		Doğrultu	Takviye/Matris	Ortalama	Std. Sapma
DAĞILIM	BK	[100]	Matris	97.001	40.379
		[110]	Matris	97.388	39.998
	HMK	[100]	Matris	93.697	29.954
		[110]	Matris	96.153	26.681
	YMK	[100]	Matris	95.756	28.51
		[110]	Matris	95.774	28.503
	SDH	[001]	Matris	89.497	32.853
		[010]	Matris	96.942	32.744
		[100]	Matris	95.908	31.537

Birim hücrelerde matris hacminin Voronoi kısmındaki hacme oranı ve bu hücrelerin elastik enerjilerinin oranı Tablo 5.7'de verilmiştir. Görüldüğü gibi enerji oranları ile hacim oranları birbirlerine oldukça yakındır. Bu durum birim hücrelerin temsil ettiği periyodik parçacık dağılımlarının seçilen Voronoi hücreleri ile modellenebileceğini göstermektedir.

Tablo 5.7 Voronoi temsili hacim elemanı modellerinin matris/toplam elastik enerji ve hacim oranları

	HMK		YMK		SDH
	[100]	[110]	[100]	[110]	[001]
Enerji oranı	0.876769	0.941081	0.749951	0.499519	0.728747
Hacim Oranı	0.881549	0.943695	0.749997	0.5	0.736525

Analizler sonucunda dağılımlarda parçacıktaki depolanan şekil değişimi enerjilerinin hücrenin tamamında depolanan şekil değişimi enerjisine oranı Tablo 5.8'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi %15.58 hacim oranında takviye kullanılmasına rağmen takviye toplam enerjinin en fazla alan dağılım %9.59 ve %9.37 ile birim kübiktir.

Tablo 5.8 Analiz edilen dağılımların parçacıkların şekil değişimi enerjisin hücrenin şekil değişimi enerjisine oranı

	Doğrultu	Oran
BK	[100]	0.0959
	[110]	0.0937
HMK	[100]	0.0747
	[110]	0.0776
YMK	[100]	0.0772
	[110]	0.0768
SDH	[001]	0.077
	[010]	0.0828
	[100]	0.0834

Yapılan analizlerin sonuçları elemansal olarak incelendiğinde, bazı matris elemanlarının uygulanandan daha az gerilme taşıdığı görülmüştür. Hücrelere uygulanan 300 MPa'dan daha az gerilme taşıyan matris elemanlarının hacminin toplam matris hacmine oranı Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9 Analiz edilen dağılımlarda uygulanandan daha az gerilme taşıyan matris elemanların hacminin toplam matris hacmine oranı

	Doğrultu	Oran
BK	[100]	0.8356
	[110]	0.835
HMK	[100]	0.7069
	[110]	0.7427
YMK	[100]	0.7266
	[110]	0.73
SDH	[001]	0.7272
	[010]	0.0828
	[100]	0.0834

Tablo 5.10'da analizler sonucu elde edilen değerlerin irdelenmesi verilmiştir. Görüldüğü gibi; en yüksek von Mises gerilmesi oranı, hem ortalama değerlerde hem en yüksek değerlerde HMK [100] doğrultusunda görülmüştür. Aynı şekilde en yüksek hidrostatik gerilme oranı da hem ortalama değerlerde hem en yüksek değerlerde HMK [100] doğrultusunda görülmüştür. En yüksek gerilme altında bulunan bu dağılımda hasarın en erken oluşması beklenebilir. YMK ve SDH yapılarda daha düşük gerilme oranlarının görülmesinin nedeni bu yapıların HMK'dan daha kompakt olmasıdır. YMK ve SDH yapılarda görülen oranlar birbirine yakındır, bu da bu iki yapının yaklaşık olarak aynı kompaktlıkta olması ile uyumludur.

Tablo 5.10 Voronoi temsili hacim elemanları için elde edilen sonuçları

		von Mises				Hidrostatik	
		En Yüksek		Ortalama		En Yüksek	Ortalama
		Matris	Takviye	Matris	Takviye	Matris	Matris
		$\frac{\sigma_{E.EY}}{\sigma_{UYG}}$	$\frac{\sigma_{E.EY}}{\sigma_{UYG}}$	$\frac{\sigma_{E.ORT}}{\sigma_{UYG}}$	$\frac{\sigma_{E.ORT}}{\sigma_{UYG}}$	$\frac{\sigma_{EY}}{\sigma_{UYG}}$	$\frac{\sigma_{ORT}}{\sigma_{UYG}}$
HMK	[100]	1.666	1.793	0.957	1.655	1.017	0.312
	[110]	1.254	1.649	0.918	1.554	0.829	0.320
YMK	[100]	1.244	1.651	0.918	1.562	0.814	0.319
	[110]	1.246	1.649	0.919	1.563	0.826	0.319
SDH	[001]	1.216	1.883	0.905	1.641	0.789	0.318
	[010]	1.269	1.912	0.899	1.630	0.781	0.323
	[100]	1.302	1.915	0.904	1.6262	0.990	0.319

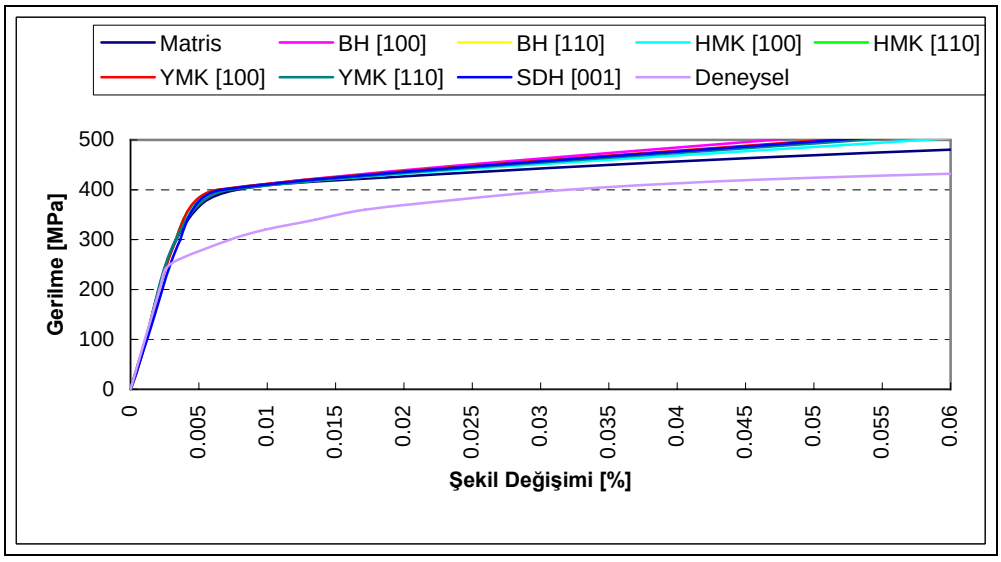
Hücredeki gerilme analizinin gösteriminde von Mises eşdeğer gerilmesi kullanılmıştır.Hücrelerdeki gerilme elemanların hacimlerine göre ağırlıklandırılmış istatistiksel dağılımları incelendiğinde şu sonuçlar dikkat çekmektedir;

En yüksek gerilme hep takviyede, takviye üzerinde ise matris ile birleşim yüzeyinde bulunmaktadır. Matris üzerindeki en yüksek gerilme ise takviye ile temas eden yüzeylerde görülmektedir. En yüksek von Mises gerilmeleri matris için birim kübik [100] yönünde, takviye için ise birim kübik [110] yönünde görülmüştür. Hidrostatik gerilmenin en yüksek değerleri de birim kübik üzerinde görülmüştür.

Eğer bileşenlerin dayanımlarından, karma malzemenin dayanımı belirlenecek olursa, (Shuguang ve Wongsto, 2003) birim kübiğin en düşük dayanıma sahip olacağı söylenebilir. Bu bilgiler, birim kübiğe göre daha iyi simetri özelliklerine ve daha düşük anizotropiye sahip olan hacim merkezli kübik, yüzey merkezli kübik ve sıkı düzen hekzagonal dağılımları tercih edilebilir kılmaktadır.

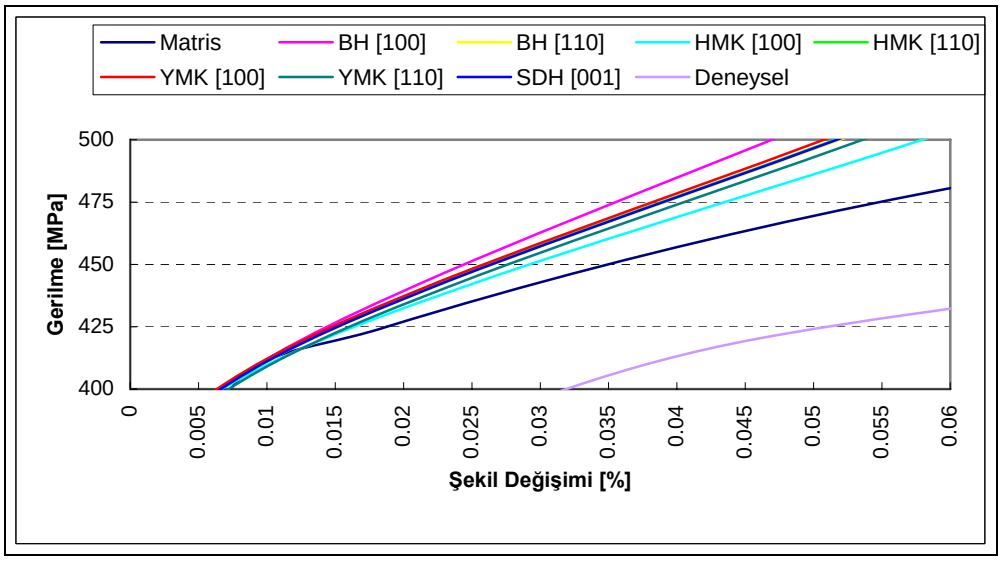
5.2.2. Plastik Analizlerin Sonuçları

İncelenen modellere %6 şekil değişimi olacak şekilde plastik analiz yaptırılmıştır. Yapılan analiz sonucu elde edilen gerilme birim şekil değişimi grafiği, modeller için plastik alanda Şekil 5.38'de gösterilmiştir.



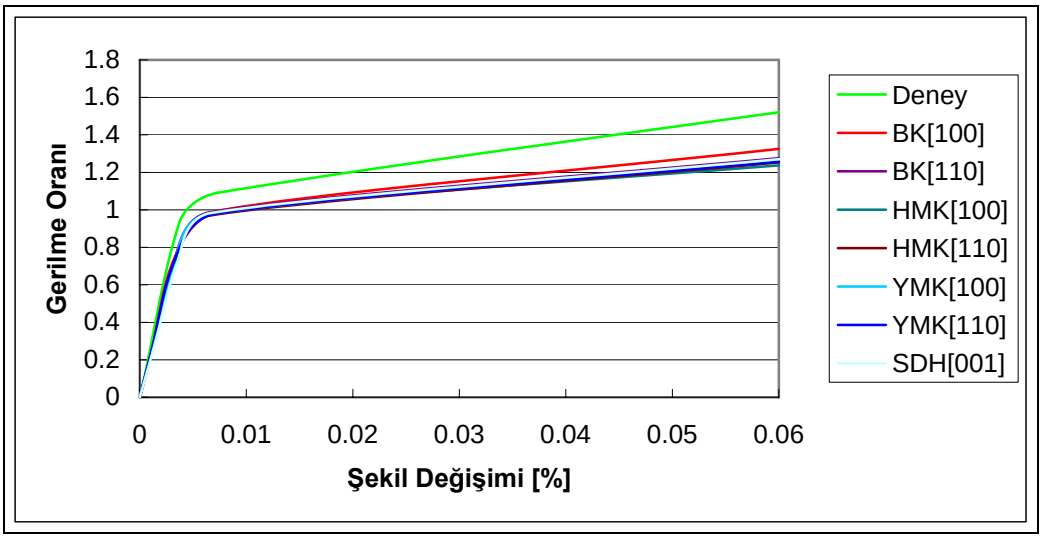
Şekil 5.38 Küresel dağılımlı modellerin ve matris malzemesinin gerilme şekil değişimi grafiği plastik alan

Çizgilerin birbirlerine yakın olması nedeni ile sonuçları görsel açıdan daha anlaşılır kılmak amacı ile Şekil 5.39'da 400 MPa ile 500 MPa gerilmeleri arası gösterilmiştir.

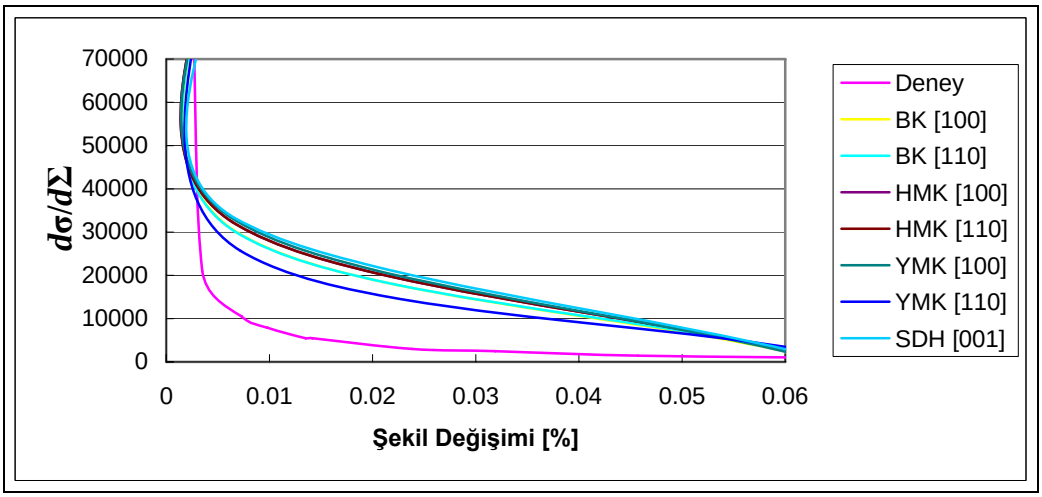


Şekil 5.39 Küresel dağılımlı modellerin ve matris malzemesinin gerilme şekil değişimi grafiği plastik alan 400-500MPa arası

İncelenen dağılımların $\sigma/\sigma_{0.2}$ – birim şekil değişimi grafikleri Şekil 5.40'de, $d\sigma/d\Sigma$ – birim şekil değişimi grafikleri ise Şekil 5.41'de gösterilmiştir.



Şekil 5.40 İncelenen dağılımların $\sigma/\sigma_{0.2}$ – birim şekil değişimi grafikleri



Şekil 5.41 İncelenen dağılımların dσ/dΣ – birim şekil değişimi grafikleri

Grafiklerden görüldüğü üzere, incelenen dağılımlarda birim kübiğin [100] ve [110] doğrultuları arasındaki fark en yüksektir, dolayısı ile en yüksek anizotropiyi birim kübik göstermektedir. Diğer dağılımlar kendi aralarında incelendiğinde, HMK dağılımın BK ten daha az olmak üzere yüksek anizotropi gösterdiği görülmektedir. Bu durumda en az anizotropi gösteren dağılım YMK olmaktadır. Bu YMK dağılımın BK ve HMK'dan daha kompakt bir şekilde olmasına bağlanabilir. YMK ve SDH dağılımların değerleri birbirlerine yakındır.

İncelenen karma malzemedeki matrisin takviye ile etkileşimi ve dolayısı ile de gerilme-birim şekil değişimi davranışı tam olarak bilinemediğinden sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen eğriler deneysel eğriden farklıdırlar. Eğriler incelendiğinde sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan (Bao, 2005)'ten alınan eğrinin matris malzemesini tam olarak temsil etmediği görülmektedir.Bununla

birlikte deneysel eğrinin eğilimi ile birim kübik dağılım için elde edilen eğrinin eğilimleri oldukça yakın olduğu dikkat çekmektedir.

6. SONUÇLAR

Elde edilen sonuçlar şu maddeler halinde özetlenebilir;

1. Parçacıkların dağılımı ekstrüzyondan etkilenmektedir.

2. Voronoi hücreleri BK'yı modellemede kullanılabilinir.

3. Takviye dağılımı etkisi göz önüne alındığında, elastiklik modülü değeri için deneysel çalışmaya en yakın olan sonucu BK dağılım [100] doğrultusunda vermiştir.

4. Ekstrüzyondan etkilenen parçacık dağılım geometrisi etkisi için, sonlu elemanlar modellerinin makro davranış sonuçları ve deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılmasından, incelenen karma malzeme davranışının en çok BK ile örtüştüğü görülmüştür.

KAYNAKÇA

[1] Huda, M.D. and Hashmi, M.S. 1995. MMCs: Materials, Manufacturing and Mechanical Properties, 37-64, The Printer LTD , U.K.

[2] Ashby, M.F., 1993. Criteria for Selecting the Components of Composites, *Acta Metall. Material*, **41,** 1313-1335.

[3] Eliasson, J. and Sandstrom, R., 1995. Applications of Aluminium Matrix Composites; *Key Engineering Materials*, **104-107**, 3-36.

[4] Ibrahim, I.A., Mohammed, F.A. and Laverinia, E.J., 1991. Particulate Reinforced Metal Matrix Composites-A Review, *Journal of Materials Science*, **26**, 1137-1156.

[5] Lloyd, D.J., 1994. Particle Reinforced Aluminium and Magnesium Matrix Composites. *International Materials Review*, **39,** 1-23.

[6] Srivatsan, T.S., Ibrahim, I.A., Mohammed, F.A. and Laverinia, E.J., 1991. Processing Techniques for Particle Reinforced Metal Aluminium Matrix Composites; *Journal of Materials Science*, **26**, 5965-5978.

[7] Ögel, B. Kompozit Malzemelerde Son Gelişmeler ve İleriye Dönük Beklentiler, *9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, **1**, 639-644.

[9] Rohatgi, P.K., Asthana R. and Das, S., 1986, Solidification, Structures and Properties of Cast Metal-Ceramic Particle Composites, *International Materials Reviews*, **31,** 115-135.

[10] Hosking, F.M., Folgar Portillo, F., Wunderlin, R. and Mehrabian, R., 1982. Composites of Aluminium Alloys; Fabrication and Wear Behaviour. *Journal of Materials Science*, **17,** 477-498.

[11] Macdanesl, L., 1985. Analysis of Stres-Strain, and Fracture and Ductility Behaviour of Aluminium Matrix Composites Containing Discontinuous Silicon Carbide Reinforcement, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **16,** 1105-1115.

[12] Cöcen, Ü., Önel, K., and Özdemir, İ., 1997. Microstructures and Age Hardenability of Al-5 %Si-0.2%Mg Based Composites Prenforced with Particulate SiC, *Composites Science and Technology*, **57,** 801-808.

[13] Song, W.Q., Krauklis, P., Mourits, A.P., and Bandyapadhyay, S., 1995. The Effect of Thermal Aging on The Abrasive Wear Behaviour of Age-Hardening 2014 Al-SiC and 6061 Al-SiC Composites, *Wear,* **185,** 125-130.

[14] Manoharan, M. and Lewandowski, J.J., 1990. Crack Initiation and Growth Toughness of an Aluminium Metal Matrix Composite, *Acta Metal Materialia,* **38,** 489-496.

[15] Roy, M., Venkatamaran, B., Bhnuprasad, V.V., Mahajan, Y.R., and sudararajan, G., 1992. The Effect of Particulate Reinforcement on The Sliding Wear Behaviour of Aluminium Matrix Composites, *Metallurgical and Materials Transactions A,* **23,** 2833-2847.

[16] Shuguang, L., Wongsto, A., 2003. Unit Cells for Micromechanical Analyses of Particle-Reinforced Composites, *Mechanics of Materials*, **36,** 543-572.

[17] Chawla, N., Sidhu, R.S., Ganesh, V.V., 2006. Three Dimensional Visualization and Microstructure Based Modelling of Deformation in Particle Reinforced Composites, *Acta Materialia*, **54**, 1541-1548.

[18] TS EN 573-3,2004. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları -Biçimlendirilebilen Mamullerin Kimyasal Bileşim ve Şekli - Bölüm 3: Kimyasal Bileşim, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[19] Kimyasal Analiz Raporu, 2007. Rapor Tarihi: 13.04.2007, *İkitelli Organize Sanayi Bölgesi KOSGEB Laboratuar Müdürlüğü*, **Rapor No: 0958**, İstanbul.

[20] Davis, J.R., 1996. Aluminium and Aluminium Alloys ASM Speciality Handbook 3rd Printing, *American Society for Metals International,* Ohio.

[21] Wroblewskia, T., Ponkratzb, U., Porschc F., 2004. Simultaneous Determination Of Micro-Strain In Two Directions by Energy Dispersive Diffraction Using Two Detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. **532**, 639-643.

[22] Deng, X., Chawla, N., 2006. Modeling The Effect of Particle Clustering on The Mechanical Behavior of SiC Particle Reinforced Al Matrix Composites, *Journal of Materials Science,* **41,** 5731-5734.

[23] Bao, Y., 2005. Dependence of Ductile Crack Formation In Tensile Tests on Stress Triaxiality, Stress and Strain Ratios, *Engineering Fracture Mechanics,* **72,** 505-522.

[24] Weissenbek, E., Böhm, H.J., Rammerstorfer, F.G., 1994. Micromechanical Investigations of Arrangement Effects in Particle Reinforced Metal Matrix Composites, *Computational Materials Science*, **3,** 263-278.

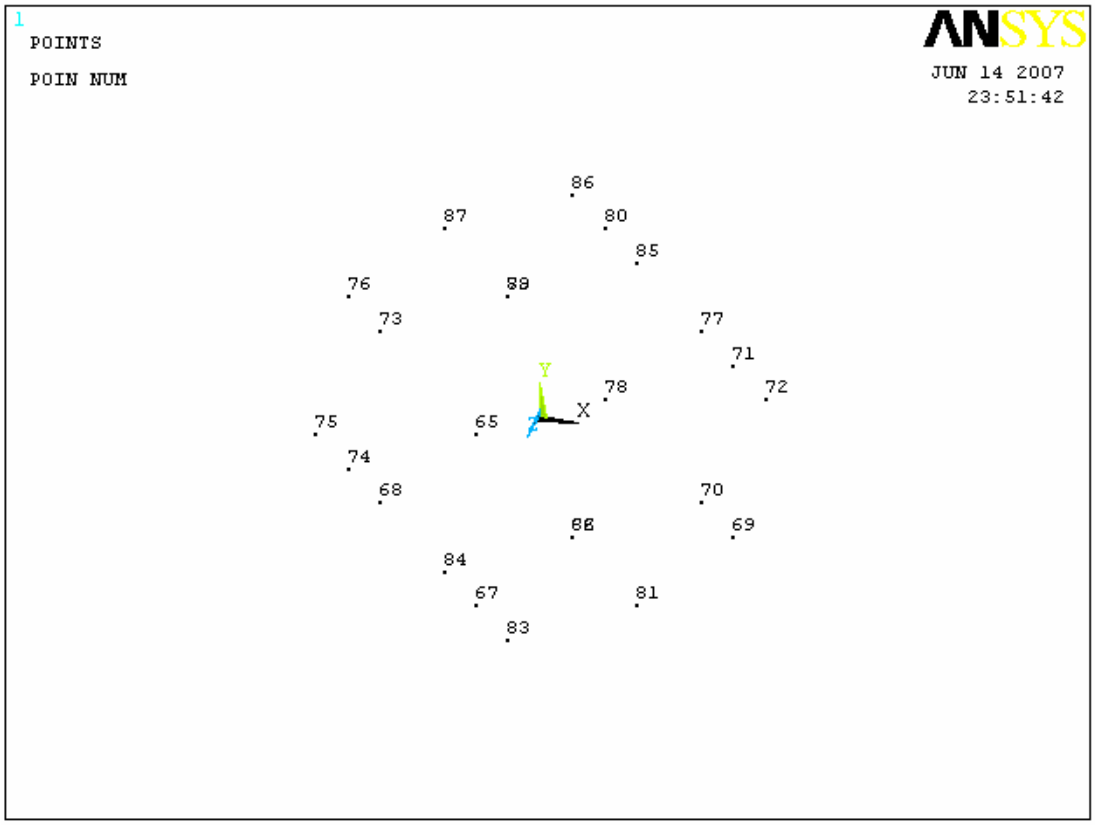
[25] Lawrance, K.L., 2004. ANSYS Tutorial Release 8.0 and Release 7.1, SDC Publications, Mission, Kansas.

[26] Moaveni, S., 1999. Finite Element Analysis, Theory and Application with ANSYS, Prentice Hall, New Jersey.

[27] Mackerle, J., 2002. Metal Matrix Composites: Finite Element and Boundary Element Analyses A Bibliography (1997–2000), Finite Elements in Analysis and Design, **38,** 659-667.

EK A. Voronoi temsili hacim elemanlarının anahtar noktaların konumları ve koordinatları.

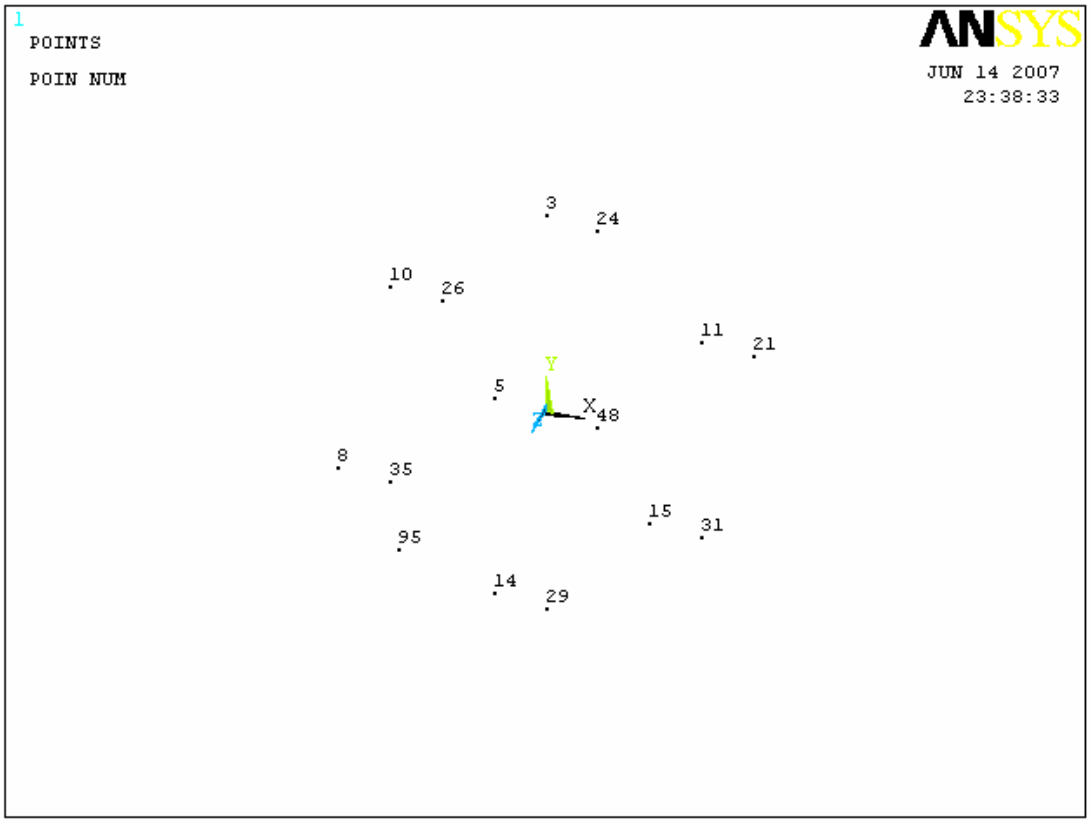
HMK Dağılım için anahtar noktaların konum ve koordinatları



Şekil A.1 HMK Dağılım için anahtar noktaların konum ve koordinatları

NO.	X,Y,Z KOORDİNATLARI			THXY,THYZ,THZX AÇILARI		
65	0.000000	40.82483	81.64966	0.0000	0.0000	0.0000
66	40.82483	0.000000	81.64966	0.0000	0.0000	0.0000
67	0.000000	-40.82483	81.64966	0.0000	0.0000	0.0000
68	-40.82483	0.000000	81.64966	0.0000	0.0000	0.0000
69	81.64966	-40.82483	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
70	81.64966	0.000000	40.82483	0.0000	0.0000	0.0000
71	81.64966	40.82483	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
72	81.64966	0.000000	-40.82483	0.0000	0.0000	0.0000
73	-81.64966	0.000000	-40.82483	0.0000	0.0000	0.0000
74	-81.64966	-40.82483	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
75	-81.64966	0.000000	40.82483	0.0000	0.0000	0.0000
76	-81.64966	40.82483	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
77	40.82483	0.000000	-81.64966	0.0000	0.0000	0.0000
78	0.000000	-40.82483	-81.64966	0.0000	0.0000	0.0000
79	-40.82483	0.000000	-81.64966	0.0000	0.0000	0.0000
80	0.000000	40.82483	-81.64966	0.0000	0.0000	0.0000
81	40.82483	-81.64966	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
82	0.000000	-81.64966	-40.82483	0.0000	0.0000	0.0000
83	0.000000	-81.64966	40.82483	0.0000	0.0000	0.0000
84	-40.82483	-81.64966	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
85	40.82483	81.64966	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
86	0.000000	81.64966	-40.82483	0.0000	0.0000	0.0000
87	-40.82483	81.64966	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
88	0.000000	81.64966	40.82483	0.0000	0.0000	0.0000

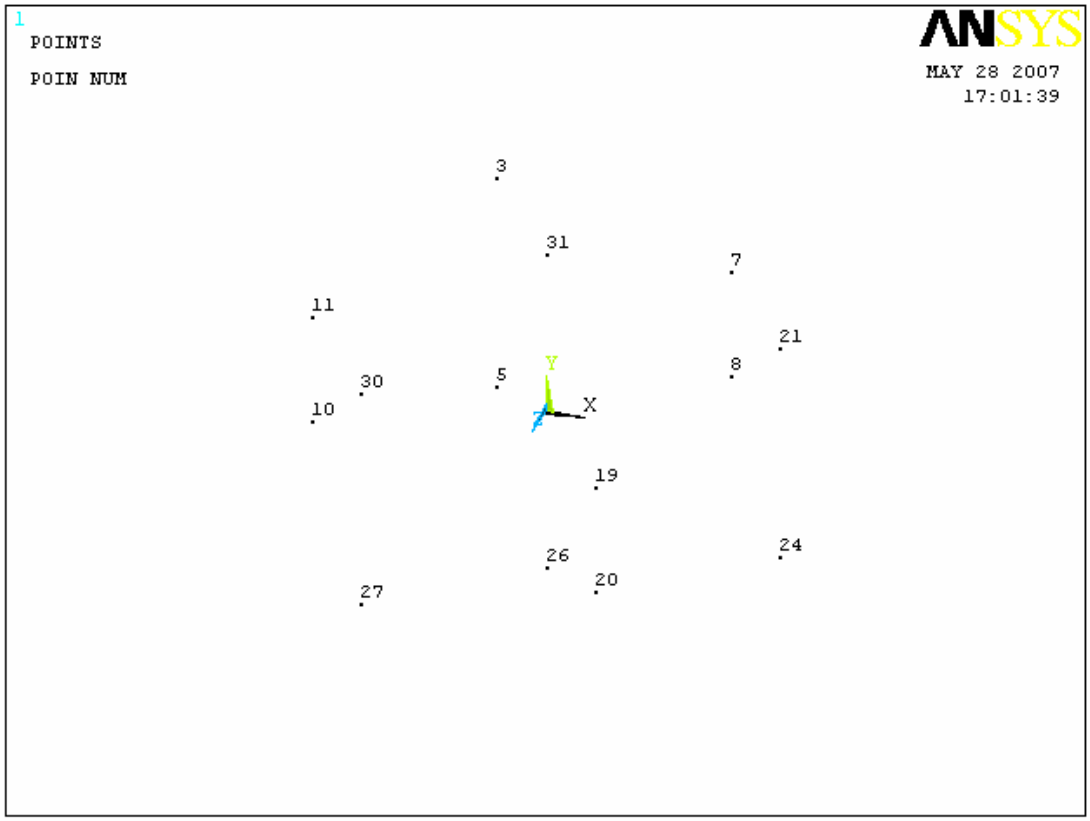
YMK Dağılım için anahtar noktaların konum ve koordinatları



Şekil A.2 YMK Dağılım için anahtar noktaların konum ve koordinatları

NO.	X,Y,Z KOORDİNATLARI			THXY,THYZ,THZX AÇILARI		
3	0.000000	100.0000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.000000	50.00000	70.71068	0.0000	0.0000	0.0000
8	-70.71068	0.000000	70.71068	0.0000	0.0000	0.0000
10	-70.71068	50.00000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
11	70.71068	50.00000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.000000	-50.00000	70.71068	0.0000	0.0000	0.0000
15	70.71068	0.000000	70.71068	0.0000	0.0000	0.0000
21	70.71068	0.000000	-70.71068	0.0000	0.0000	0.0000
24	0.000000	50.00000	-70.71068	0.0000	0.0000	0.0000
26	-70.71068	0.000000	-70.71068	0.0000	0.0000	0.0000
29	0.000000	-100.0000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
31	70.71068	-50.00000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
35	-70.71068	-50.00000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
48	0.000000	-50.00000	-70.71068	0.0000	0.0000	0.0000
95	-50.00000	-50.00000	50.00000	0.0000	0.0000	0.0000

SDH Dağılım için anahtar noktaların konum ve koordinatları



Şekil A.3 SDH Dağılım için anahtar noktaların konum ve koordinatları

NO.	X,Y,Z KOORDİNATLARI			THXY,THYZ,THZX AÇILARI		
3	-81.65000	81.65000	-141.4219	0.0000	0.0000	0.0000
5	-81.65000	-81.65000	-141.4219	0.0000	0.0000	0.0000
7	81.65000	40.80000	-141.4219	0.0000	0.0000	0.0000
8	81.65000	-40.80000	-141.4219	0.0000	0.0000	0.0000
10	-163.3000	-40.80000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
11	-163.3000	40.80000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
19	81.65000	40.80000	141.4219	0.0000	0.0000	0.0000
20	81.65000	-40.80000	141.4219	0.0000	0.0000	0.0000
21	163.0000	81.65000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
24	163.0000	-81.65000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
26	0.000000	-122.5000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
27	-81.65000	-81.65000	141.4219	0.0000	0.0000	0.0000
30	-81.65000	81.65000	141.4219	0.0000	0.0000	0.0000
31	0.000000	122.5000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000

EK B. İncelenen dağılımların çeşitli eğrilerinin çizilmesinde kullanılanılabilinecek noktalar.

Tablo B.1 Karma malzeme deney sonuçları

Kuvvet [N]	Şekil Değişimi [mm]	Deney Süresi [s]
72.6457	0.00320336	0.499941
335.825	0.0615894	3.99994
713.41	0.128189	7.99994
1574.29	0.228163	13.9999
2570.89	0.311561	18.9999
3551.83	0.386523	23.4999
4544.95	0.453197	27.4999
5590.27	0.519871	31.4999
7094.52	0.611483	36.9999
8209.44	0.678157	40.9999
9622.34	0.761481	45.9999
10863.9	0.836591	50.4999
11913.1	0.903265	54.4999
13153.3	0.994803	59.9999
14213.8	1.10321	66.4999
14902.9	1.1949	71.9999
15667.6	1.3116	78.9999
16217	1.40321	84.4999
16831.3	1.51162	90.9999
17499.4	1.64489	98.9999
17994.5	1.75323	105.5
18434.3	1.86157	112
18777.5	1.95325	117.5
19177.7	2.06995	124.5
19598.3	2.21159	133
19941.1	2.33657	140.5
20213.4	2.45327	147.5
20480.1	2.58662	155.5
20683.7	2.71153	163
20932.1	2.8616	172
21130.9	2.99488	180
21332.3	3.13659	188.5
21217.4	3.28658	197.5
21606.3	3.43658	206.5
21752.9	3.59494	216
21949.6	3.74494	225
21517.6	3.91159	235
21953.5	4.07824	245
22077	4.25325	255.5
22183.6	4.44491	267
22296.7	4.61992	277.5
22342.8	4.68659	281.5
22358.5	4.72825	284

Tablo B.2 İncelenen dağılımların dσ/dΣ – birim şekil değişimi grafiklerinin çizilmesinde kullanılabilinecek noktalar

BK [100]			BK [110]		
sigma	epsilon	delta	sigma	epsilon	delta
0	0	0	0	0	0
100	0.001112	89928.06	100	0.00112	89285.71
300	0.003308	91095.42	300	0.003313	91190.95
400	0.0066	30370.21	400	0.006627	30178.66
530	0.06	2434.466	520	0.061619	2182.128

HMK [110]			HMK [100]		
sigma	epsilon	delta	sigma	epsilon	delta
0	0	0	0	0	0
100	0.001103	90661.83	100	0.001115	89686.1
300	0.003309	90657.72	300	0.003347	89609.75
400	0.006401	32342.57	400	0.006692	29897.15
520	0.061247	2187.944	520	0.068934	1927.949

YMK [100]			YMK [110]		
sigma	epsilon	delta	sigma	epsilon	delta
0	0	0	0	0	0
100	0.001112	89895.72	100	0.001103	90661.83
300	0.003337	89895.72	300	0.003309	90649.5
400	0.006343	33264.59	400	0.007202	25691.75
520	0.060247	2226.196	520	0.063501	2131.461

SDH [100]			DENEY		
sigma	epsilon	delta	sigma	epsilon	delta
0	0	0	0	0	0
			100	0.001059	94473.31
100	0.001212	82481.03	200	0.002116	94526.89
300	0.003637	82481.03	240	0.00254	94500.09
400	0.006643	33264.59	260	0.003492	21000.02
520	0.061347	2193.64	300	0.007302	10500.01
			320	0.009841	7875.008
			340	0.013492	5478.251
			360	0.014143	5478.266
			380	0.02381	2999.999
			400	0.031905	2470.606
			420	0.045714	1448.269
			440	0.0698	830.3677

Tablo B.3 İncelenen dağılımların $\sigma/\sigma_{0.2}$ – birim şekil değişimi grafiklerinin çizilmesinde kullanılabilinecek noktalar

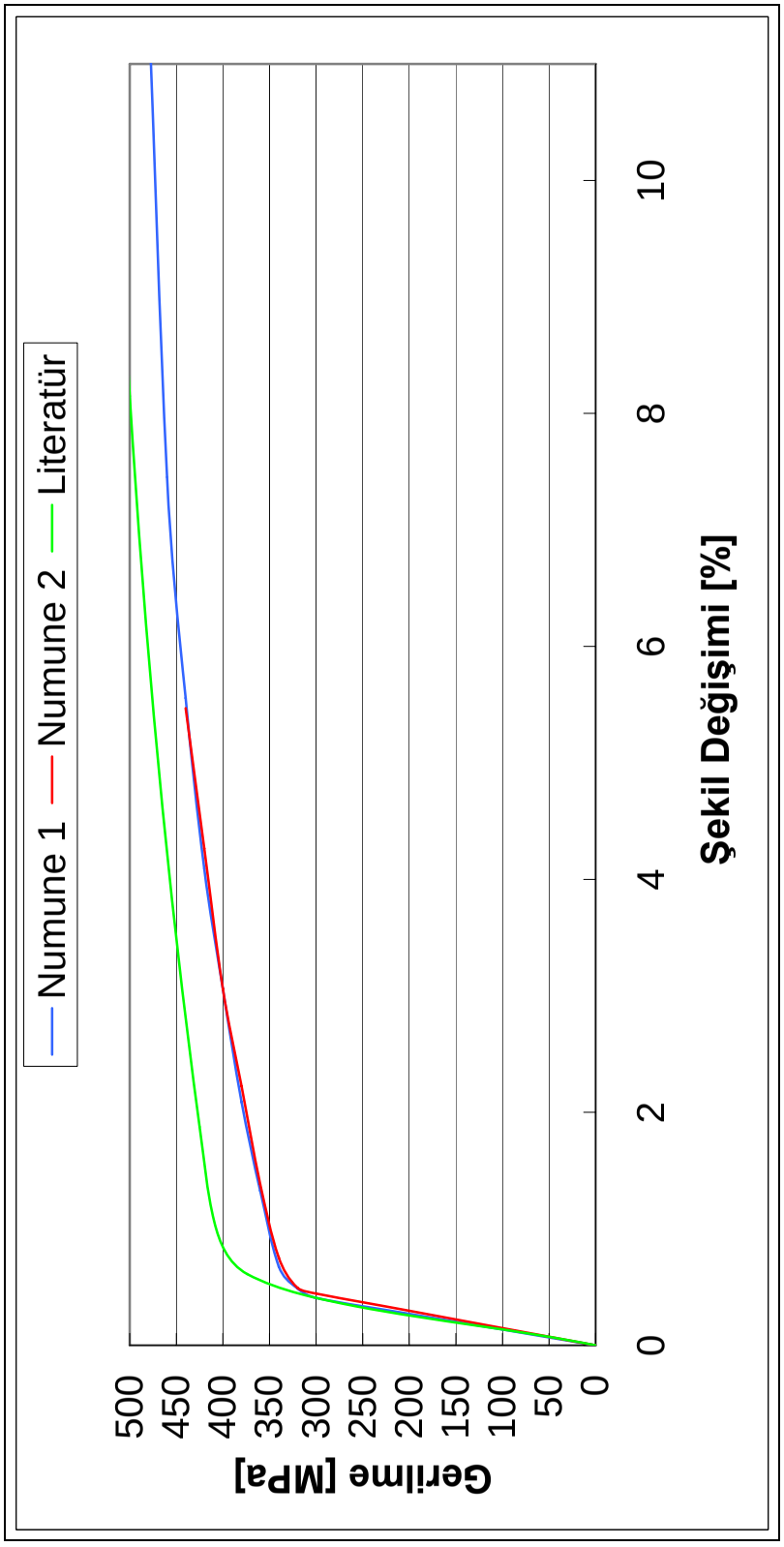
BK [100]		BK [110]	
0	0	0	0
0.25	0.001112	0.246914	0.00112
0.75	0.0033075	0.740741	0.0033132
1	0.0078002	0.987654	0.0066268
1.325	0.06	1.283951	0.061619

HMK [100]		HMK [110]	
0	0	0	0
0.2457	0.001115	0.242131	0.001103
0.737101	0.0033469	0.726392	0.0033091
0.982801	0.0066917	0.968523	0.006401
1.277641	0.068934	1.25908	0.061247

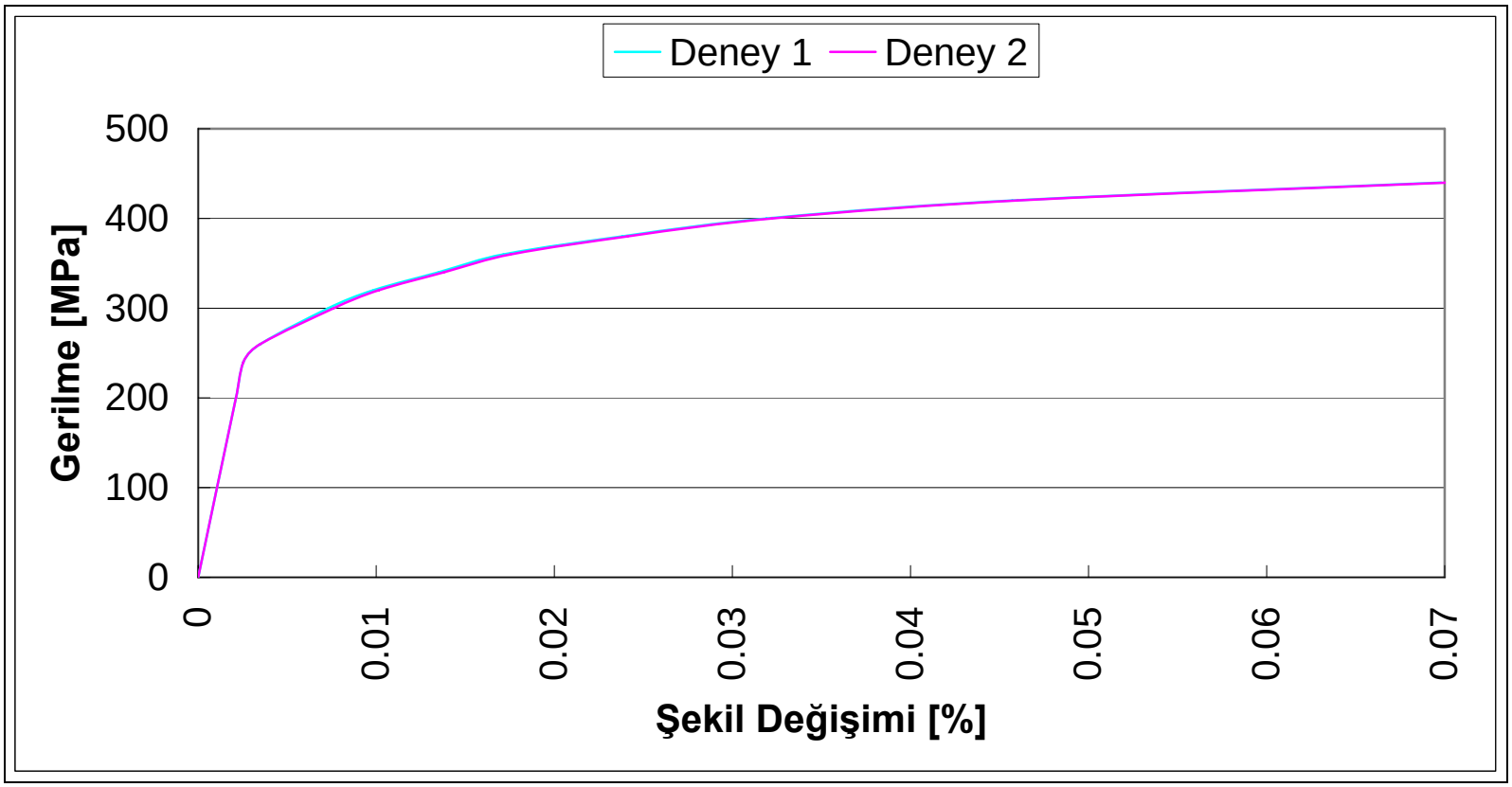
YMK [100]		YMK [110]	
0	0	0	0
0.243309	0.0011124	0.245098	0.001103
0.729927	0.0033372	0.735294	0.0033093
0.973236	0.0063434	0.980392	0.0072016
1.265207	0.060247	1.27451	0.063501

SDH [001]	
0	0
0.2457	0.001212
0.737101	0.003637
0.982801	0.006643
1.277641	0.061347

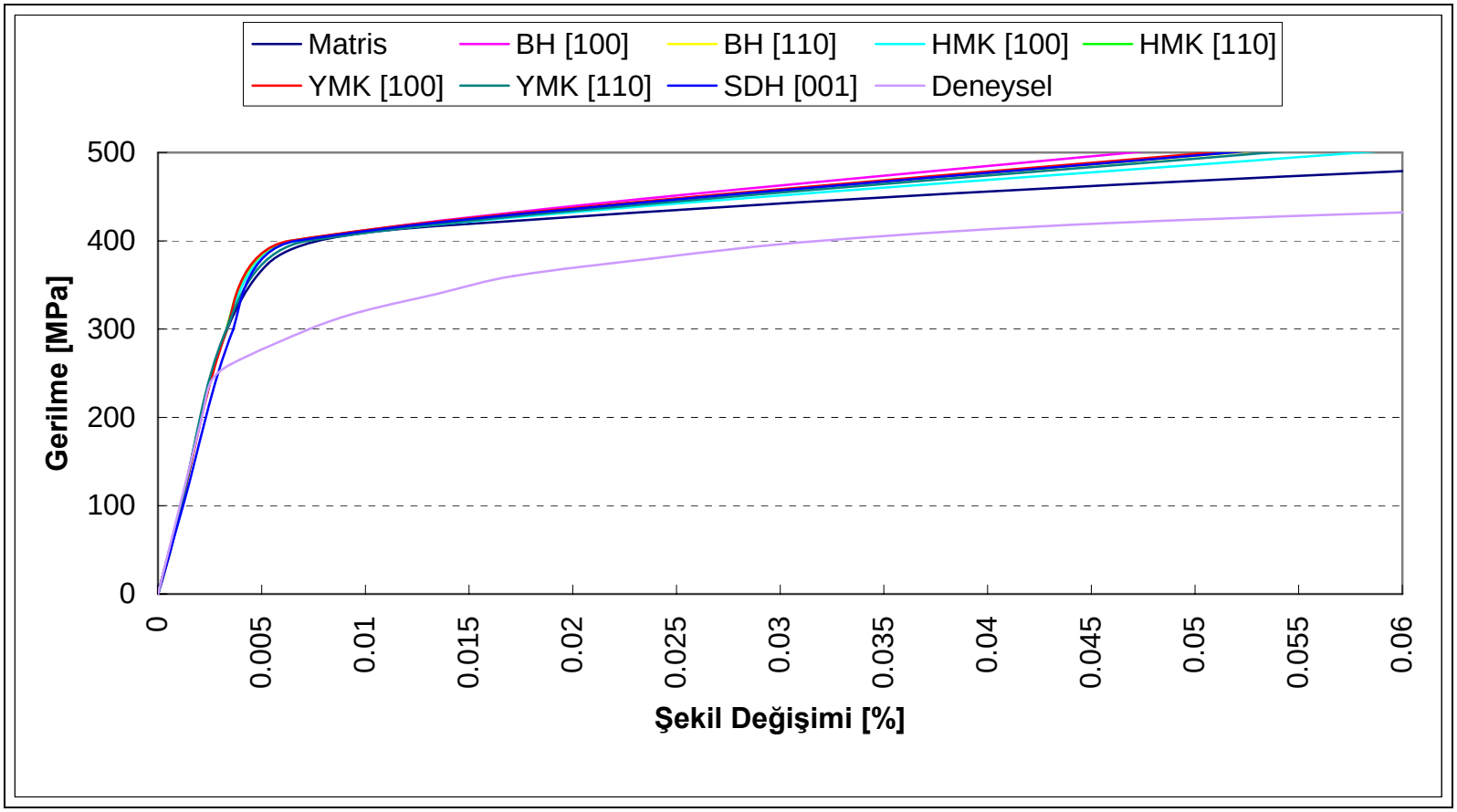
EK C. Çizilen grafikler



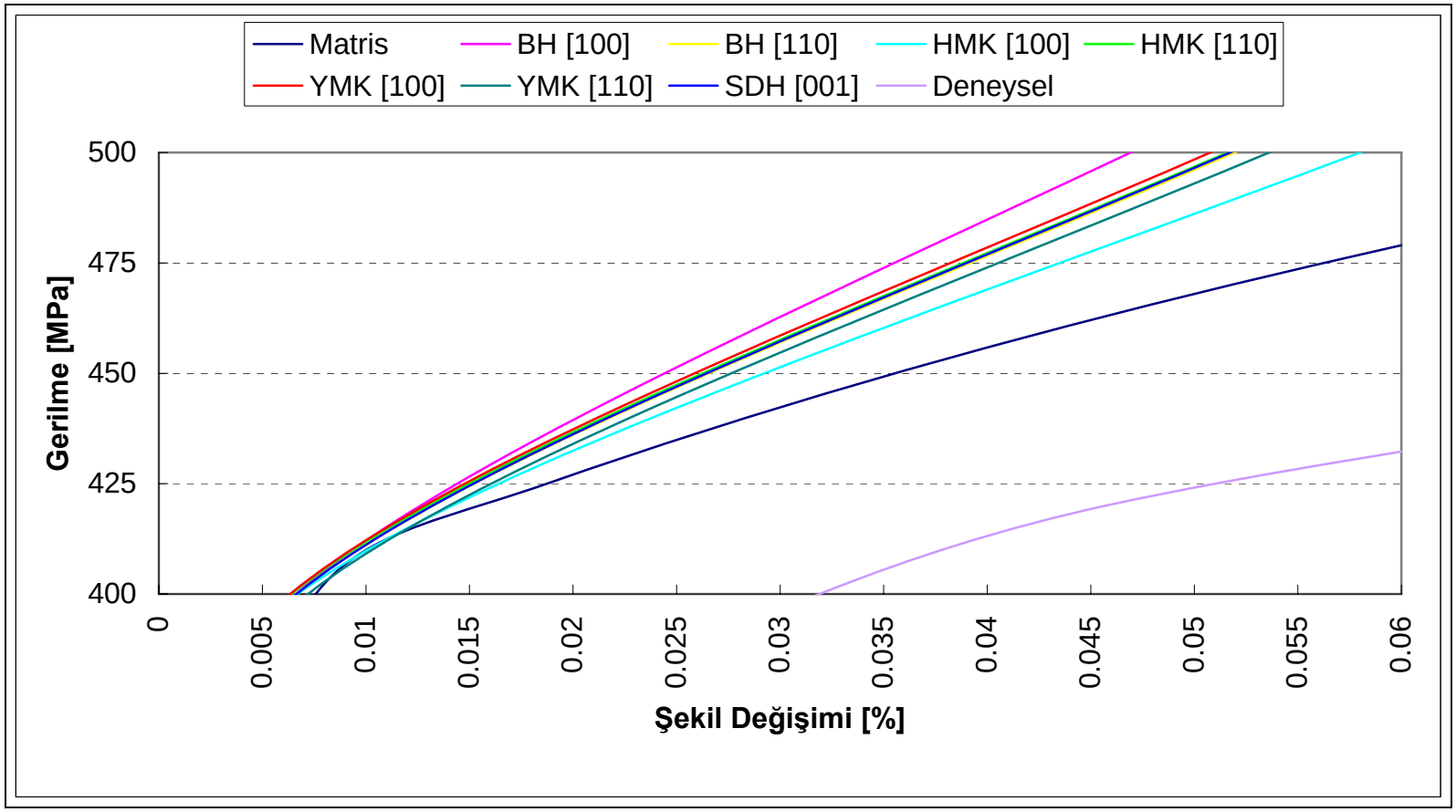
Şekil C.1 Literatür ile Al numunelerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri



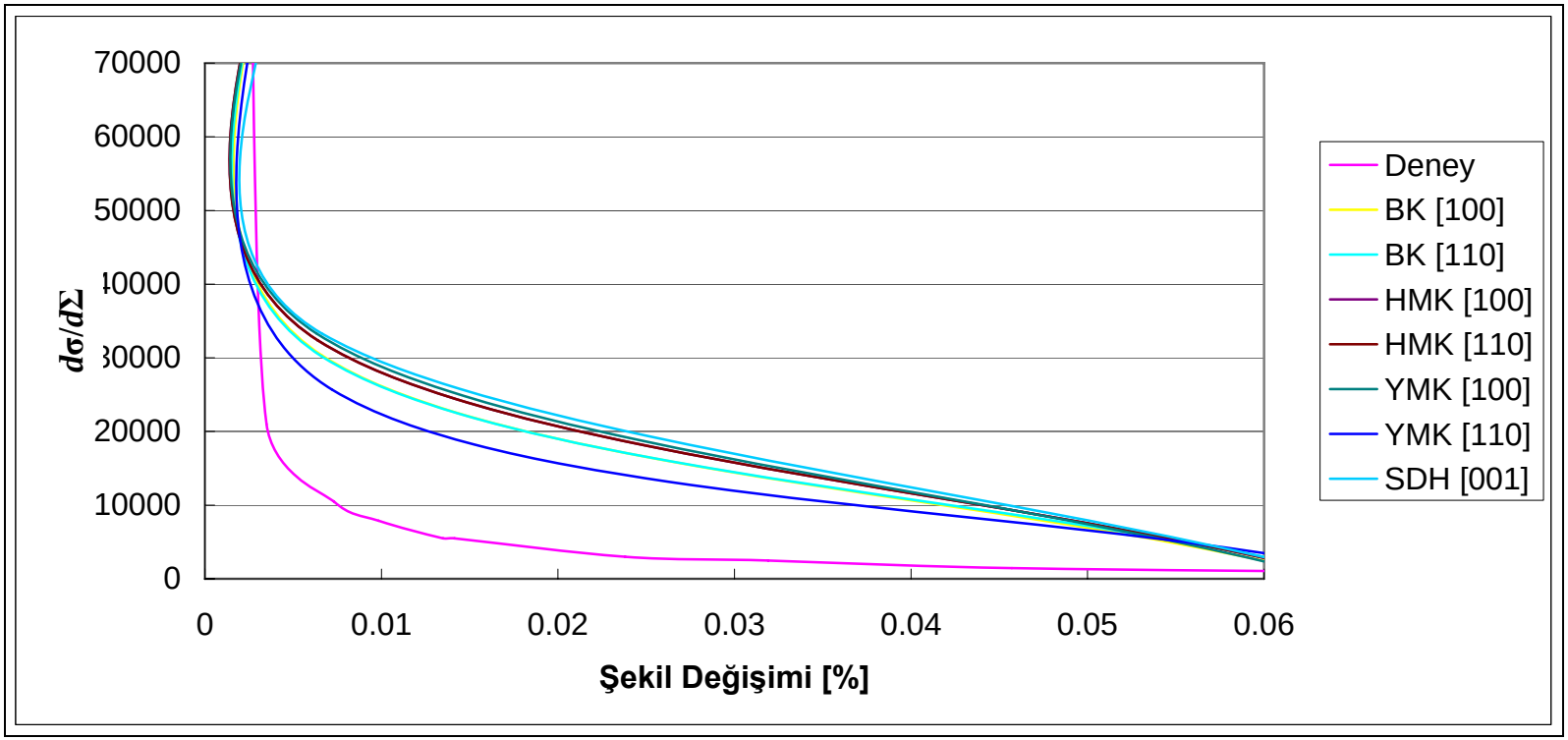
Şekil C.2 Karma malzemenin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri



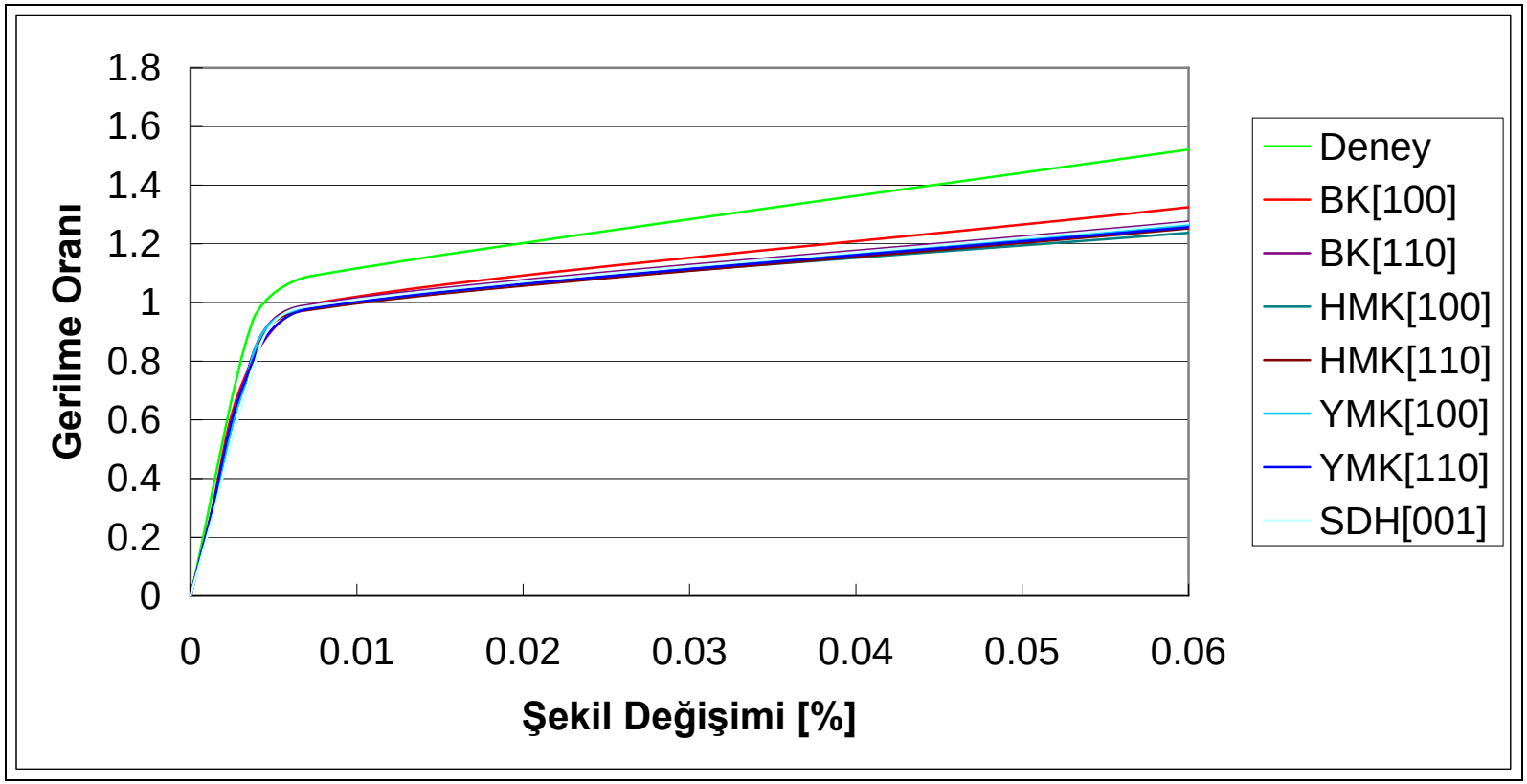
Şekil C.3 İncelenen dağılımların ve karma malzemenin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri



Şekil C.4 İncelenen dağılımların ve karma malzemenin 400-500 MPa arası gerilme-birim şekil değişimi eğrileri



Şekil C.5 İncelenen dağılımların ve karma malzemenin dσ/dΣ – birim şekil değişimi grafikleri



Şekil C.6 İncelenen dağılımların ve karma malzemenin $\sigma/\sigma_{0.2}$ – birim şekil değişimi grafikleri

ÖZGEÇMİŞ

Alpay VARDAR, Şubat 1983 Eskişehir doğumludur. Ortaokul ve lise eğitimini 1994-2001 yılları arasında Eskişehir Anadolu Lisesi'nde, lisans eğitimini 2001-2005 yılları arasında Osmangazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde almıştır. 2005 yılı temmuz ayından bu yana İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme ve İmalat programına kayıtlı yüksek lisans öğrencisidir.