

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOLEMANİT KATKILI POLİPROPİLEN MALZEMELERİN
KIRILMA DAVRANIŞI

UTKU TURAN

KOCAELİ 2012

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOLEMANİT KATKILI POLİPROPİLEN MALZEMELERİN
KIRILMA DAVRANIŞI

UTKU TURAN

Yrd.Doç.Dr. Tülin ŞAHİN
Danışman, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Adalet ZEREN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Ahmet ÜNAL
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv.


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 20.06.2012

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Sanayi devriminden bu yana, endüstriyel alanda plastiklerin ve katkı malzemelerinin kullanımının gözle görülür artışını, gerek konuyla ilgili bilimsel çalışmalardan, gerekse üreticilerin piyasaya sürdükleri yeni ürünlerden takip etmekteyiz. Buna karşılık, endüstride konvansiyonel olarak imal edilen dövme ve döküm gibi ağır parçaların kullanımının, mühendislik plastiklerin kullanımının artması ile orantılı olarak azaldığını görmekteyiz. Bu plastiklerde, mineral katkılandırma uygulamalarında ve bilimsel çalışmalarda da oldukça ileri seviyelere gelinmiştir.

Bu çalışma, 2009-Ç0227 numaralı “Mikro Taneli Ham Kolemenit İle Polipropilen Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Yurtiçi Tüketim Miktarının Arttırılması” isimli Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) destekli olarak yürütülen projenin temel konularından birini ele almak üzere gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada çeşitli yapı ve içerikteki dolgu maddelerinin ve bu dolgu maddelerinin hibrit karışımlarının polipropilen daha verimli şekilde kullanılması açısından kırılma davranışına olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla plastiklerin kırılma davranışlarını karakterize edebilmek için, kritik kırılma şiddeti faktörü (K_{IC}), gerilme şiddeti faktörü (G_{IC}) değerleri, birkaç farklı statik kırılma tokluğu yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır.

Tüm hayatım boyunca bana olan desteklerini hiç bir zaman eksik etmeyen başta çok değerli annem ve babam olmak üzere tüm aileme teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimimin başlangıcından tezimi hazırladığım güne kadar bilgi birikimi ve tecrübesi ile bana her konuda yardımcı olan ve yol gösteren çok değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Tülin ŞAHİN ile çok değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Şenol ŞAHİN’e sonsuz minnet ve şükranlarımı sunar teşekkür ederim.

Deneylerin yapılmasındaki çok değerli yardımlarından ötürü sevgili Anıl ALTAY, Semih MIZRAK, Elif Gülşah YILDIZ ve Mak. Müh. Ece CENGİZ YÜCEL’e teşekkür ederim.

Haziran – 2012

Utku TURAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	3
1.1. Polimer Malzemeler	3
1.2. Polipropilen	5
1.2.1. Polipropilen homopolimer	6
1.2.2. Polipropilen random kopolimer	7
1.3. Mikronize Dolgu Maddeleri.....	8
1.4. Mikronize Dolgu Maddelerinin Polipropilen Malzemelerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	10
1.4.1. Darbe dayanımına etkisi	10
1.4.2. Kırılma tokluğuna etkisi	10
1.5. Yüzey Modifikasyonu	11
1.5.1. Ca-Stearat bağlayıcılar ile yüzey modifikasyonu	11
1.6. Kırılma Mekanizması	12
1.6.1. Giriş	12
1.6.2. Lineer elastik kırılma mekanizması	13
1.6.3. Elasto plastik kırılma mekanizması	22
1.6.4. Kırılma tokluğu deneyleri	25
1.6.4.1. Düzlem genleme kırılma tokluğu (K _{1c}).....	25
1.6.4.2. Üç nokta eğme deneyi	29
1.6.4.3. Kompakt çekme deneyi	31
1.6.5. Literatür çalışmaları	32
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	35
2.1. Kullanılan Malzeme	35
2.1.1. Polipropilen malzemeler	35
2.1.1.1. Homopolimer	35
2.1.1.2. Random kopolimer	36
2.1.2. Öğütülmüş kolemanit bor maddesi	37
2.1.3. Mikronize toz kalsiyum karbonat maddesi	40
2.1.4. Mikronize pudra talk maddesi	41
2.1.5. Kaydırıcı wax maddesi	42
2.1.6. Maleik anhidrit.....	42
2.1.7. Öğütülmüş kolemanit bor maddesi kaplama malzemeleri.....	43
2.2. Harmanlama ve Deney Numunesi Üretimi	45
2.2.1. Hammaddelerin üretimi	45
2.2.2. Deney numunesi üretimi	46

2.2.2.1. Enjeksiyon kalıplama ile deney numunelerinin hazırlanması ..	46
2.2.2.2. Deney numunelerinin kodlanması.....	49
2.3. Deney Şartları, Araçlar, Makineler ve Donanımlar	50
2.3.1. Üç nokta eğme deneyi ve numunesi	50
2.3.2. Kompakt çekme deneyi ve numunesi	52
3. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	55
3.1. Üç Nokta Eğme Deneyi (SENB).....	55
3.1.1. Polipropilen random kopolimer malzemenin üç nokta eğme deneyi (SENB) sonuçları.....	55
3.1.1.1. Polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü ..	55
3.1.1.2. Polipropilen random kopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü	58
3.1.2. Polipropilen homopolimer malzemenin üç nokta eğme deneyi (SENB) sonuçları.....	61
3.1.2.1. Polipropilen homopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü	61
3.1.2.2. Polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü	63
3.2. Kompakt Çekme Deneyi	65
3.2.1. Polipropilen random kopolimer malzemenin kompakt çekme sonuçları.....	65
3.2.1.1. Polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü	65
3.2.1.2. Polipropilen random kopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü	66
3.2.2. Polipropilen homopolimer malzemenin kompakt çekme sonuçları	67
3.2.2.1. Polipropilen homopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü	67
3.2.2.2. Polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü	69
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	71
4.1. Sonuçlar.....	71
4.2. Öneriler.....	74
KAYNAKLAR	75
EKLER.....	81
ÖZGEÇMİŞ	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	F kuvveti etkisi altındaki levha	16
Şekil 1.2.	Çatlak ilerleme modları;I-Açılma modu , II-Kayma modu, III-Yırtılma modu.....	18
Şekil 1.3.	Çatlak ağzı gerilme dağılımı	21
Şekil 1.4.	Malzemelerde çatlak ucunda plastisite, mikro çatlama ve craze (sır çatlağı) sonucu	23
Şekil 1.5.	Düzlem gerilme ve düzlem genleme durumlarında çatlak ucu plastik bölge.....	24
Şekil 1.6.	Düzlem gerilme ve düzlem genleme durumlarında çatlak ucu plastik bölgenin kalınlık boyunca değişimi	25
Şekil 1.7.	Kırılma tokluğu deneylerinde rastlanabilen yük-deplasman türleri	28
Şekil 1.8.	Üç nokta eğme deneyinde kullanılan kırılma tokluğu deney parçası ve aparatının şematik gösterimi	29
Şekil 1.9.	Kompakt çekme numunesi (CT).....	31
Şekil 2.1.	Elek altı 75 µm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Bigadiç)	38
Şekil 2.2.	Elek altı 45 µm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Bigadiç)	39
Şekil 2.3.	Elek altı 38 µm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Bigadiç)	39
Şekil 2.4.	Elek altı 28 µm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Bigadiç)	39
Şekil 2.5.	Elek altı 20 µm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Bigadiç)	40
Şekil 2.6.	Elek altı 10 µm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Bigadiç)	40
Şekil 2.7.	Enjeksiyon kalıbının önden görünüşü.....	47
Şekil 2.8.	Çekme numunesi üzerinden SENB numunesi çıkarılan bölge	50
Şekil 2.9.	Üç nokta eğme (SENB) numunesi ölçülerinin belirlenmesi.....	50
Şekil 2.10.	ISO 13589 (2003) standardına göre hazırlanmış kompakt çekme numunesinin	53
Şekil 3.1.	Elek altı 38 µm tane boyutlu kolemanit dolgulu ve %2 Maleik Anhidrit katkılı Boralies marka polipropilen randaom kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü	55
Şekil 3.2.	Kolemanit (elekaltı 45 µm) ve talk dolgulu maddelerinin polipropilen random kopolimer malzemenin (Sabic marka) kırılma şiddeti faktörüne etkisi.....	56
Şekil 3.3.	Kolemanit dolgu miktarına ve talk miktarına bağlı polipropilen random kopolimer malzemeye kırılma şiddeti faktörü	57
Şekil 3.4.	Polipropilen random kopolimer malzemenin dolgu tane boyutunun kırılma şiddeti faktörüne etkisi	57

Şekil 3.5.	Elek altı 38 µm tane boyutlu kolemanit dolgulu ve %2 Maleik Anhidrit katkılı Boralies marka polipropilen random kopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü.....	58
Şekil 3.6.	Kolemanit (elek altı 45 µm) ve talk dolgulu maddelerinin polipropilen random kopolimer malzemenin (Sabic marka) gerilme şiddet faktörüne etkisi	59
Şekil 3.7.	%10 Kolemanit ve %7 talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin dolgu tane boyutunun gerilme şiddeti faktörüne etkisi	60
Şekil 3.8.	Kolemanit ve talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemeye gerilme şiddet faktörüne etkisi.....	60
Şekil 3.9.	Elek altı 45 µm tane boyutlu ve % 2 Maleik Anhidrit katkılı Ecolen marka polipropilen homo polimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü ..	61
Şekil 3.10.	%35 Kolemanit dolgulu polipropilen homopolimer malzemenin dolgu tane boyutunun kırılma şiddeti faktörüne etkisi	62
Şekil 3.11.	Kolemanit (elekaltı 45 µm) ve kalsit dolgulu maddelerinin polipropilen homopolimer malzemenin (Petoplen -Petkim marka) kırılma şiddeti faktörüne etkisi	62
Şekil 3.12.	Elek altı 45 µm tane boyutlu ve %2 Maleik Anhidrit katkılı Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü ..	63
Şekil 3.13.	Polipropilen homopolimer malzemenin elek altı dolgu tane boyutunun gerilme şiddeti faktörü	64
Şekil 3.14.	Kolemanit (elekaltı 45 µm) ve kalsit dolgulu maddelerinin polipropilen homopolimer malzemenin (Petkim Marka) gerilme şiddeti faktörüne etkisi	65
Şekil 3.15.	%13 oranında Kalsiyum Stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %5,5 Talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktörü	66
Şekil 3.16.	%13 oranında kalsiyum stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %5,5 Talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktörü	67
Şekil 3.17.	%13 oranında kalsiyum stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %20 kaplı kalsit dolgulu Moblen marka polipropilen homopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü	68
Şekil 3.18.	%13 oranında Kalsiyum Stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %20 kaplı Kalsit dolgulu Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemenin kritik kırılma şiddet faktörü.....	68
Şekil 3.19.	%13 oranında Kalsiyum Stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %20 kaplı Kalsit dolgulu Ecolen ve Petkim marka polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü	69
Şekil 3.20.	%13 oranında Kalsiyum Stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %20 kaplı Kalsit dolgulu Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü.....	70

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Moplen HP500N polipropilen homopolimere ait üretici verileri	35
Tablo 2.2. ECOLEN HZ10K polipropilen homopolimere ait üretici verileri.....	36
Tablo 2.3. PETOPLN MH 418 polipropilen homopolimereait üretici verileri	36
Tablo 2.4. RAE130E polipropilen random kopolimer ait üretici verileri	36
Tablo 2.5. Vestolen P 9421 polipropilen random kopolimere ait üretici verileri	37
Tablo 2.6. Kolemanit bor maddesi özellikleri.....	37
Tablo 2.7. Mikronize toz kalsiyum karbonat maddesine ait üretici verileri	41
Tablo 2.8. Mikronize pudra talk maddesine ait üretici verileri.....	41
Tablo 2.9. Kaydırıcı PE - Wax maddesine ait üretici verileri.....	42
Tablo 2.10. Maleik anhidrit maddesine ait üretici verileri	42
Tablo 2.11. Kalsiyum stearat malzemesine ait üretici verileri.....	43
Tablo 2.12. Çift vidalı ekstrudere ait teknik bilgiler (EMAŞ, 2007)	45
Tablo 2.13. ALLROUNDER 370 CMD model enjeksiyon makinesinin teknik özellikleri (ARBURG, 2007).....	46
Tablo 2.14. HTF90W (MA900/300) model enjeksiyon makinesinin teknik özellikleri (HAITIAN, 2007).....	47
Tablo 2.15. Deney numunesi üretiminde kullanılan enjeksiyon ayarları ile soğutma suyu sıcaklıkları (ALLROUNDER 370 CMD).....	48
Tablo 2.16. Deney numunesi üretiminde kullanılan enjeksiyon ayarları ile soğutma suyu sıcaklıkları (HTF90W MA900/300)	48
Tablo 2.17. Polipropilen random kopolimer, Polipropilen homopolimer, kolemanit, talk, kalsit hibrit kompozit miktarları	49

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

a	: Çatlak derinliği, (mm)
B	: Numune kalınlığı, (mm)
C	: Komplians, (mm/N)
CaCO ₃	: Kalsiyum karbonat
E	: Elastisite modülü, (GPa)
e _b	: Kopma uzaması, (mm)
G	: Enerji boşalma miktarı, (kJ/m ²)
G _{IC}	: Kritik enerji boşalma miktarı, (kJ/m ²)
K	: Gerilme şiddeti faktörü, (MPa√m)
K _I	: Mod I gerilme şiddeti faktörü, (MPa√m)
K _{IC}	: Kritik gerilme şiddeti faktörü, (MPa√m)
K _{II}	: Mod II gerilme şiddeti faktörü, (MPa√m)
K _{III}	: Mod III gerilme şiddeti faktörü, (MPa√m)
L	: Çentiksiz bölgenin uzunluğu, (mm)
m	: Plastik sınırlandırma faktörü
P _{max}	: Yük-uzama eğrisindeki maksimum yük, (N)
r	: Çatlağa olan mesafe, (mm)
R	: Çatlak ilerleme direnci, (kJ/m ²)
r _p	: Çatlak ucu plastik bölgenin yarıçapı, (mm)
T _g	: Camsı geçiş sıcaklığı, (°C)
u	: x yönündeki yer değiştirme, (mm)
U	: Enerji, (kJ)
v	: Poisson oranı, (mm/mm)
v	: y yönündeki yer değiştirme, (mm)
W	: Numune genişliği, (mm)
w	: z yönündeki yer değiştirme, (mm)
δ	: Çatlak açılma mesafesi, (mm)
ε	: Gerinim (genleme), (mm/mm)
θ	: Yüzey çatlağı parametrik açısı, (°)
σ	: Gerilme, (MPa)
σ _n	: Maksimum net kesit gerilmesi, (MPa)
σ _y	: Akma gerilmesi, (MPa)
σ _{zz}	: Eksenel gerilme bileşeni, (MPa)
τ	: Kayma gerilmesi, (MPa)

Kısaltmalar

BOREN	: Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü
COD	: Crack Opening Displacement (Çatlak Açılma Mesafesi)
CTOD	: Crack Tip Opening Displacement (Çatlak Ucu Açılma Mesafesi)
EPKM	: Elasto Plastik Kırılma Mekanikliği

GŞF	: Gerilme Şiddeti Faktörü
JIC	: J Integral Control (J İntegral Kontrolü)
LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekanîği
PE	: Polietilen
PP	: Polipropilen
PPH	: Polipropilen homopolimer
PPR	: Polipropilen random kopolimer
PS	: Polistiren
PVC	: Polyvinylchloride (Polivinilklorür)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SENT / SENB	: Single Edge Notched Tension (Tek Kenardan Çentikli Çekme)
YYPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen

KOLEMANİT KATKILI POLİPROPİLEN MALZEMELERİN KIRILMA DAVRANIŞI

ÖZET

Polimer malzemelerin kararsız çatlak ilerleme direncini belirlemede kullanılan LEFM analiz yöntemi ISO 13586 (2003) standardı uygun olacak şekilde bu çalışmada kullanılmıştır. Elekaltı tane boyu 45 µm olan kolemanit ile kalsiyum karbonat (CaCO_3) mikropartikülden farklı miktarlarda takviyeli Polipropilen homopolimer malzeme ve elekaltı tane boyu 38 µm ve 45 µm olan kolemanit ile talk mikropartikülden farklı miktarlarda takviyeli Polipropilen random kopolimer malzeme kullanılmıştır. Çift vidalı birbirine paralel dönen ekstrüderde, farklı yüzde ağırlık oranlarında ilave yapılarak elde edilmiş olan dolgulu ve dolgusuz granüller, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle eğme numunesi basılmıştır. Üç nokta eğme deneyleri, Instron 4411 makinesinde 10 mm/dk eğme hızı kullanılarak yapılmış ve K_{1c} (kritik gerilme şiddeti faktörü) ile G_{1c} (kritik enerji boşalma oranı) değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar kolemanit bor maddesinin, kalsiyum karbonatın ve talkın değişen ağırlık oranları için malzemenin kırılma özelliklerini etkilediğini göstermiştir. Bu değişim ve malzemenin maruz kalacağı servis şartları süresince göstereceği performans dikkate alınarak tasarımların yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Kırılma yüzeyleri makro görüntüler ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kırılma, Kolemanit, Mineral Dolgu, PPH, PPR.

FRACTURE BEHAVIOR OF COLEMANITE FILLED POLYPROPYLENE MATERIALS

ABSTRACT

LEFM analysis, which is an analysis used to determine the unstable fracture progress resistance of polymer materials, has been used in this study in an appropriate way for ISO 13586 (2003) standard. After sieve 38 μ m particle sized colemanite reinforced with calcium carbonate (CaCO_3) microparticles in various amounts Polypropylen homopolymer and after sieve 45 μ m particle sized colemanite reinforced with talc microparticles various amounts Polypropylen Random Copolymer material were used. In double threaded parallel spinning extruder, filled and unfilled granules obtained by reinforcing various at percentage rates were pressed into the bending sample via injection molding method. Three point bending tests have been done using Instron 4411 machine at 10mm/min bending velocity and then K_{Ic} (critical stress intensity factor) and G_{Ic} (critical energy release rate) have been calculated. Results indicated that changing weight rates of colemanite bor material and talc effect the diffraction properties of the material. It is emphasized that designs must be done considering this change and the performance that material is going to display under service conditions. Diffraction surfaces have been examined via macro images.

Keywords: Fracture, Colemanite, Mineral Fillers, PPH, PPR.

GİRİŞ

Bu çalışma 2009-Ç0227 numaralı “Mikro Taneli Ham Kolemenit İle Polipropilen Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Yurtiçi Tüketim Miktarının Arttırılması” isimli Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) destekli olarak yürütülen projenin temel konularından birini ele almak üzere gerçekleştirilmiştir.

Seramik, metal, kağıt ve camların yerine plastik malzemelerin tercih edilmesinden dolayı, plastik sektörü çok hızlı şekilde büyümeye başlamıştır. Plastik malzemeler paketlenme, otomobiller, elektriksel aletler ve mobilyalar başta olmak üzere bir çok sektörde kullanılmaktadır. Onların diğer malzemelere oranla tercih edilmesinin nedenleri arasında düşük ağırlık, üretim kolaylığı, kırılma dayanımı ve bitmiş üründe oluşan fiyat azalması yer almaktadır.

Mukavemeti yüksek, kimyasallardan etkilenmeyen, 100°C’ nin üzerinde ısı dirence sahip ve ucuz olması sebebiyle diğer ticari termoplastik malzemelerin arasında ayrı bir yeri olan polipropilenin yukarıda bahsedilen endüstriyel alanlarda ve günlük hayattaki kullanımı oldukça geniştir.

Endüstriyel ihtiyaçların sürekli gelişmesinden dolayı iyileştirilmiş malzemelere olan ihtiyaçta artmaktadır. Yüksek dayanım ve modül, yüksek ısıl sönümlenme özelliği, yüksek ısıl deformasyon sıcaklığı, kolay üretilebilirlik ve düşük fiyatlar nedeniyle dolgu maddesi katkılı polipropilen kullanımı tercih edilmektedir. İstenen bu özelliklerin bazıları olumlu yönde olurken, bazıları ise olumsuz yönde gerçekleşmektedir. Bu nedenle uygun dolgu maddesi seçimi ve kullanım miktarı, son ürün için istenilen özelliklere göre yapılmalıdır.

Bu çalışmada çeşitli yapı ve içerikteki dolgu maddelerinin ve bu dolgu maddelerinin hibrit karışımlarının polipropilen daha verimli şekilde kullanılması açısından kırılma davranışına olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla plastiklerin kırılma davranışlarını karakterize edebilmek için, kritik kırılma şiddeti faktörü (K_{IC}), gerilme şiddeti

faktörü (G_{IC}) değerleri, birkaç farklı statik kırılma tokluğu yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır.

Bölüm 1’de polimer malzemelerin özellikleri, sınıflandırılması, kullanım alanları gibi genel konulara değinilmiştir. Kırılma olayının anlaşılması için kullanılan yöntemler ve deneylerin açıklandığı kırılma mekaniğinden de yine bu bölümde bahsedilmiştir.

Bölüm 2’te deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri, deney numunelerinin hazırlanması, deney parametrelerinin belirlenmesi ve deneylerin uygulanışı hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 3’te SENB ve Kompakt çekme deney sonuçları ayrı ayrı, polipropilen random kopolimer ve polipropilen homopolimer olarak iki ana gruba ayrıldıktan sonra kendi içinde kırılma şiddeti faktörü (K_{IC}) ile gerilme şiddet faktörü (G_{IC}) grafiksel olarak sunulmuş ve ardından yorumlanmıştır.

Bölüm 4’de deney bulgularından çıkarılan sonuçlar açıklanmış ve çalışmanın geliştirilmesi için ileride yapılacak araştırmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Polimer Malzemeler

Polimer ismi, yunancada çok anlamına gelen “poly” ve parça anlamına gelen “meros” sözcüklerinin birleşmesi ile meydana gelmiştir. Polimerler, karbon iskelet üzerinde genellikle kovalent bağlı radikal grupları içeren ve birbirini tekrar eden ünitelerden oluşan zincir molekülleridir (Övençoğlu, 1999).

Plastikler monomer denilen kimyasal ünitelerden meydana gelen, yüksek molekül ağırlığına ve zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemelerdir. Bir polimer polimerizasyon yoluyla başka monomer molekülleriyle birleşerek; tekrarlanan yapılardan oluşan çok uzun zincir şeklinde bir makromolekül meydana getirmektedir. Böylece çeşitli monomerler veya monomer kombinasyonu kullanılarak çeşitli tipte plastikler elde edilmektedir (Ekrem 2006, Armağan 2011).

Plastiklerin kendilerine has özellikleri ve düşük yoğunlukları onların birçok uygulamada seramik ve metallere alternatif olarak karşımıza çıkmasını sağlamaktadır. Bunun yanında kolay şekillendirilebilmeleri, toklukları, korozyon ve aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayıları temel avantajları olarak sayılmaktadır. En son kullanıcıya sunulacak üründe malzeme olarak plastik seçildiğinde, mekanik özelliklere büyük önem verilmelidir. Sadece mekanik özellikler değil elektriksel, optik ve termal özelliklerine de kullanım şekline bağlı olmakla birlikte büyük önem vermek gerekmektedir (Saçak 2005, Batur 2009).

Metallere göre polimerlerin yoğunluklarının düşük, korozyon dirençlerinin yüksek olması avantaj teşkil ederken mekanik özelliklerindeki zayıflık bu malzemelerin kullanımında karşılaşılan önemli dezavantaj olarak kendini göstermektedir. Bununla birlikte, polimerlere bazı kimyasal veya fiziksel işlemler uygulanarak mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yapılabilmektedir (Akkurt 1991, Balkan 2006).

Günümüzde büyük oranda petrol endüstrisine dayalı olan plastik sektöründe hızlı bir gelişme yaşanmakta ve yeni plastik türleri kullanıma sunulmaktadır. Ayrıca; grafit, cam ve karbon elyafları ile karıştırılması neticesi elde edilen yeni ürünler, plastiklerin gelişiminde önemli bir aşama olmuştur. Bu tür malzemelerin mekanik özellikleri metallere yaklaşmıştır. Özellikleri geliştirilen plastik malzeme çeşitleri taşıdıkları avantajlar nedeniyle diğer mühendislik malzemelerine göre tercih edilerek, gelecekte de insan yaşamına önemli katkılarda bulunacaktır (Çetinel 2000, Yılmaz 2010).

Polimer zincirlerinden oluşan bir kütleye (polimer madde) ısı şeklinde enerji verildiğinde, polimer zincirlerinin hareketliliğinde artışlar meydana gelir. Başlangıçta polimer zincirinin küçük parçalarında oluşan bu hareketlilik, ısı arttıkça giderek büyük parçaları kapsar ve tümüne yayılır. Bu konumda polimer zincirleri birbiri üzerinden kaymaya başlayacak ve katı polimer, eriyerek akacaktır. Polimerleri şekillendirirken; polimer malzemenin belli sıcaklık değerlerinde sıvı hale geçmesi olayından yararlanıyoruz. Böylece karışım, daha sonra ters işlemle (sıcaklığın azaltılması ile) soğutulup katılaştırılmakta ve plastik parça kalıptan çıkartılarak kullanıma sokulabilmektedir. Bazı plastiklerde istenildiğinde bu katı plastik, tekrar ısıtılıp ergitilebilir-soğutulup katılaştırılabilir ve tamamen fiziksel ve tersinir olan bu dönüşüm tekrarlanabilir. Bu tür plastiklere; (Latince ısı ile şekillendirilebilen anlamına gelmek üzere) "termoplastik" adı verilmektedir. Çok yaygın kullanılan polimerlerin hemen hepsi (PE, PVC, PS gibi) termoplastiktir (Akdemir,1992).

Termoplastiklerde sıcaklık arttıkça moleküllerin arasındaki zayıf bağlar kopar. Zincirler birbirleri üzerinde kayarak sıvı hale geçer. Zincirlerin bütünlüğü sıvı halde de korunur. Soğurken zayıf bağlar tekrar oluşur (Akar 1989, Onaran 2003).

Bunun yanı sıra, ısı ile farklı bir davranış gösteren ikinci grup polimer ailesi de bulunmaktadır. Isı ile bir kez şekil verildikten sonra tekrar ısıtıldıklarında bozunan bu grup "termoset" polimerlerdir ve bunlar ısıtıldıklarında yumuşamaz ve erimezler. Isının yükselmesine karşın ilk katı konumlarını korurlar. Ancak polimer sistemini oluşturan polimer zincirlerindeki bağlar, ısıtmaya karşı bir sınır değere kadar direnebilir. Belli yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığında bağlar kopabilir ve termoset malzeme bozularak tersinmez şekilde tepkime verir. Yani termoset

plastikler, klasik yöntemle (ısıtılıp-soğutularak) şekillendirilemezler. Bunlar, özel olarak şekillendirilecekleri kalıpta tepkimeye sokulup termoset malzeme üretimi sağlanabilir. Aslında, bazı özel uygulamalarda (elektrik prizleri ve malzemeleri gibi) termoset malzemeye de gerek duyulmaktadır. Isıtılarak yumuşatılıp ergitilemeyen bu tür polimer maddelere fenol-formaldehit veya üre-formaldehit polimerleri (fenolik polimerler) ve çapraz bağlı polietilen örnek olarak verilebilir. Fenolik polimerler, genellikle, başlangıçta, lineer ve akışkan bir kademede elde edilirler ve daha sonra, kimyasal maddeler, ısıma, sıcaklık ve/veya basıncın etkisiyle çapraz bağlanarak sertleştirilip, son kullanım şekillerine sokulurlar (Güven 1984, Shenoy 1999).

Sıcaklık artışı ile yumuşayarak şekillendirilebilen ancak sıcaklık artışına devam edilmesi durumunda molekül zincirinde dallanma ve karşılıklı bağlanma gerçekleşen polimerlerdir. Isıtma ile sertleşme ve mukavemet kazanımı gerçekleşebilir. Çapraz bağ oluşumu nedeniyle malzemenin kimyasal doğasında tersinmez değişimler meydana geldiğinden, bu tip malzemeler tekrar ısıtma ile ergitilemez, şekillendirilemezler. Tekrar ısıtma malzemenin yanmasına ve bozulmasına neden olabilir. Termoset polimerlere örnek olarak fenol formaldehit reçineleri (bakalit), melamin, epoksi reçineleri, poliisopren, stiren bütadien kauçuk, nitril kauçuk ve poliüretan sayılabilir (Rauwendal, 1990).

1.2. Polipropilen

Tüm dünyada en çok kullanılan polimerler arasında olan polipropilenin (PP) ilk ticari uygulaması 1958 yılında Giulio Natta tarafından geliştirilmiştir. Polipropilen, polietilen gibi poliolefinler grubuna aittir. Yarı kristalin yapısı, birim hacme düşen düşük maliyeti, kolay işlenebilme gibi geniş özelliklere sahip, genel amaçlı bir termoplastiktir. Polipropilen monomeri, üzerinde bir adet metil (CH_3) grubu bulunduran etilen meri olarak tanımlanabilir (Kansu, 2005).

Polipropilen sanayide geniş kullanım alanı olan kolay işlenebilirliği ve iyi mukavemet performansı, kimyasal ve aşınmaya karşı yüksek direnci sebebiyle en yaygın kullanılan plastiklerdir (Chand ve Dwivedi, 2006).

Polipropilen, propilen monomerlerinin katılma polimerizasyonu ile elde edilen yarı kristalin bir termoplastik malzeme olup, YYPE' e benzetmekle beraber birçok

koşullara daha dirençli ucuz ve kaliteli bir mühendislik plastiğidir. Yoğunluğu 0.900 ile 0.910 g/cm³ arasında olan mum beyazı görünümünde rijit bir üründür. Yüksek mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra, düşük sıcaklıklarda darbe dayanımı üretim ve deney koşullarına bağlı olarak değişim gösterir.

Polipropilen yapısındaki atomların dizilişlerine göre ataktik, izotaktik ve sindiotaktik olmak üzere üç gruba ayrılırken, polipropilen monomerlerinin diziliş çeşitlerine göre de homo polipropilen, blok kopolimer, random kopolimer ve seçenekli (alternatif) kopolimer olarak gruplandırılır.

Ataktik polipropilen molekülleri gelişigüzel dizilmiş olup aralarında herhangi bir simetri bulunmaz. Molekül ağırlığı ve yönelme arttıkça gerilmelere dayanımı düşer. İzotaktik polipropilen ise soğuma esnasında soğuma aralığının uzun tutulmasından, atomların dizilme meydana getirecek formda olmasından ve atomlar arası bağ mukavemetlerinin kuvvetli olmasından dolayı kristalin bir yapıya sahiptir. Sindiotaktik polipropilende izotaktik gibi kristal yapılı olup, tek farkı düşük sıcaklıktaki polimerizasyonla elde edilmesidir. İzotaktik ve kısmende sindiotaktik PP polimerik malzeme olarak sıklıkla kullanılırken, ataktik PP nin kullanım alanı uygun olmayan özellikleri nedeniyle kısıtlıdır (Öksüz 2000, Koca 2009).

PP, oda sıcaklığında mükemmel fiziksel, mekanik ve termal özelliklere sahiptir. Nispeten sert ve yüksek ergime noktasına, düşük yoğunluğa sahiptir ve göreceli olarak darbeye dayanıklıdır. Bu özellikler, zincirlerin düzenini, içeriğini, dağılımını ve ortalama zincir uzunluğunu değiştirilmesi ve polimer zincirine örneğin etilen gibi bir komonomerin eklenmesi, resin malzemeye darbe düzenleyici eklenmesi gibi basit yöntemlerle değiştirilebilir.

1.2.1. Polipropilen homopolimer

Kimyasal yapıya bağlı olarak polimerler homopolimer ve kopolimer olmak üzere iki grupta sınıflandırılırlar. Homopolimerlerde zincir boyunca tekrar eden birim aynıdır. Homopolimer polipropilenin (PP-H) kopolimere nazaran yüksek camsı geçiş sıcaklığına (T_g) sahiptir ve düşük sıcaklıklarda tatmin edici olmayan özellikler (zayıf darbe dayanımı gibi) sergilerler. PP'ın üretim proseslerinden bir tanesi olan Novolen gaz fazı prosesi üretiminde katalizör sistemi ve polimerizasyon reaksiyon şartlarına

bağlı olarak dizilim şeklinin değiştirilerek random veya blok kopolimer yapmak mümkündür (Fındık, 2009).

Kristalleşmesi yada hangi ölçüde kristalleşeceği sıvı fazdan katı faza geçerken polimer zincirlerinin birbirine dolanış şekline yada ısıtılıp yumuşamış malzemenin fiber çekme gibi daha ileri bir işlem sırasında ne kadar gergin olduğuna bağlıdır.

Homopolimer PP'lerin tipik uygulamaları; araç ön camı, yıkama tankları, vantilatör mahfazaları ve direksiyon kolonları, saç kurutma makineleri, sterilizatörler, ütüler, kahve makineleri, tost makineleri, vb. gibi ev aletleri olup; homopolimer PP fiberleri ve filamentleri ekstrüze edilerek halıcılık, mefruşat, giyim, geotekstil, çocuk bezi, medikal sargı ve otomobil iç döşemelerinde kullanılmaktadır (Mappleston, 1995).

1.2.2. Polipropilen random kopolimer

Kopolimerler iki veya daha fazla değişik tür monomerden elde edilmektedir. Monomerlerin reaktivitesi, katalizör doğası, polimerizasyon prosedürü ve reaksiyon parametrelerine bağlı olarak kopolimerler random (rastgele), alternatif (ardarda), blok ve graft (aşı) olmak üzere kendi içerisinde gruplara ayrılırlar (Cornelia 2000, Uyanık ve diğ. 2002).

Genel olarak mekanik özelliklerinin iyi olmasına rağmen PP'lerin düşük sıcaklıklarda darbe özelliği zayıftır. Değişik polimerler veya elastomerler ile harmanlamalar yapılarak toklaşma verimi artırılabilir. Polipropilenin bu şekilde harmanlanmasında uyumluluk önemli bir faktördür. PP, PE ile sertleştirilebilir ve PP kopolimerlerinin özellikleri fiziksel olarak karıştırılmış PP-PE karışımından çok daha iyidir. Bunun sebebi kopolimerde zincir zincire bağlantı elde edilmesidir (Wang, 1996).

PP'nin random kopolimer zincirleri, propilen birimleri arasına gelişigüzel dağılmış az sayıda (~%1.5-6) etilen veya yüksek olefin birimleri (bütilen, heksan, vb.) içermektedir. Polimer zincirinde etilen varlığı kristalleşme eğilimini azaltmakta ve bunun sonucu olarak darbe dayanımı geliştirmekte, yumuşak bir his vermekte, geniş aralıkta ısı tutabilme kapasitesine sahip olmakta, buruşmaya dirençli olmakta ve yüksek berraklık kazandırmaktadır. Homopolimerin doğal rijitliği kopolimerizasyon

ile yok olmaktadır. Düşük kristallilikten dolayı random kopolimerler daha düşük ergime derecesine ve özgül ağırlığa sahiptir. Bu kombinasyon enjeksiyon kalıplaması ile üretilen ev eşyaları, ısıtılma şekillendirme (thermoforming), germe-üfleme kalıplamaları ve filmler için kopolimerleri cazip kılmaktadır. Random kopolimer yiyecek paketlenme ve kırıtaşıye uygulamalarında PVC, PS ve PET'in yerine kullanılabilir (Paulik ve diğ. 1996, Harper 2004).

Düşük sıcaklıklarda olağanüstü derece yüksek tokluk PP'nin elastomerlerle modifiye edilmesiyle sağlanabilmektedir. Bunun için PPH ile PPR ağırlıkça %6-15 arasında etilen içerecek şekilde polimerize edilir. Burada yapıya yüksek tokluk kazandıran en önemli faktör etilen miktarı olmakla birlikte, molekülün büyüklüğü, şekli ve PPR'nin yapıdaki dağılımı da etkilidir (Baker ve diğ. 2004, Baydar 2011).

1.3. Mikronize Dolgu Maddeleri

Dolgu maddeleri plastik, boya ve kağıt gibi malzemelere hacimlerini, ağırlıklarını, fiyatlarını ve teknik performanslarını düzeltmek için yüksek oranlarda eklenebilen katı katkılarıdır. Plastiklerde istenilen amaca uygun mineral dolgu maddeleri kendi aralarında inorganik ve organik olmak üzere iki grupta toplanır. İnorganik dolgular, organik dolgu maddelerine oranla daha fazla kullanılmaktadır. İnorganik dolgu maddeleri içerisinde talk, kolemanit, mika, wollastonit, kaolin, kalsiyum karbonat (kalsit) termoplastik malzemeler ile beraber kullanılanlar arasında sayılabilir. Bunlar içerisinde talk ve kalsit en çok kullanılanlardır.

Talk, kristal suyu içeren bir magnezyum silikat ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) olup iğnesel şekilli partiküller, plakalar veya mikro boyutlu fiberler şeklinde polivinilklorür (PVC) ve polipropilen termoplastiklerinde ısıtılma distorsiyon sıcaklığını arttırmak amacıyla kullanılır.

Aktif dolgu maddeleri kullanılarak işlenen plastik dolgusuz polimerlerden daha pahalı olabilir. Bunun sebepleri arasında karışım metodunun pahalılığı, yüksek stabilizatör fiyatları, özel katkılara olan ihtiyaç, işçilik ve hizmet fiyatlarının yüksekliği görülebilir. Ayrıca, çoğu dolgu maddesinin özgül ağırlığının polimerden yüksek olması nedeniyle oluşan üründe yoğunluk olarak artış meydana gelir. Bundan

dolayı, dolgu maddesi kullanılan ürünlerde birim hacim başına düşen fiyat yüksektir (Hohenburger, 2003).

Plastiklerin hem maliyetlerini düşürüp kalitelerini yükseltmek hem de kullanım alanlarını ve oranlarını genişletmek için ana polimer içine birtakım dolgu ve katkı maddeleri katılmaktadır. Doğru ve uygun oranlarda kullanılan bu katkıların yararını maksimize etmek için bir zorunluluktur.

Mineral dolgu maddelerinin termoplastik malzemelerin fiziksel, kimyasal, elektriksel ve maliyet özelliklerini farklı şekillerde etkilerler. Polimerlerin bazı özelliklerini olumlu etkilerlerken bazılarının da ise istenmeyen sonuçlara yol açarlar. Bu nedenle ideal bir polimer dolgu maddesi bulunmamaktadır. Malzeme seçimi yapılırken dolguların hangi özellikleri nasıl etkiledikleri araştırılmalı ve son üründe istenen özelliklere göre bir optimizasyon yapılmalıdır. Bu optimizasyonu, dolgu maddesi ağırlığı yada taneciklerin hacmi, partikül şekli, partikül büyüklüğü, matrisin tabiatı ve dolgu maddesinin partiküllerine yapışması belirlemektedir. Bu faktörlerin altında sınırlayıcı tabaka yapışması birinci önemli faktördür ve polimerlerin elastik bölgesini görünür ölçüde etkilenmektedir (Katz ve diğ. 1987, Sahnoune ve diğ. 1999).

Son yıllarda dolgulu plastikler ve kompozit malzemeler özellikle teknik uygulamalarda artan önemli bir rol oynamaktadırlar. PP malzemelere dolguların ilave edilmesi sertliğini, elastisite modülünü, eriyik viskozitesini arttırır. Buna karşılık uzama, darbe dayanımı, eriyik indeksinde genellikle düşüş elde edilmiştir. Belirli oranlara kadar dolgu yüklemesinin yararları olduğu gibi limit değerlerin üzerine çıkılması durumunda topaklaşmalardan dolayı özelliklerin kötüleşmesine neden olmaktadır (Marisa ve diğ., 2005).

Bunların yanısıra, plastik eriyiklerin ekstrüzyonu esnasında önemli üretim parametreleri bulunmaktadır. Bu parametrelerin de incelendiği örnek çalışmalar, Polipropilen/diatomit (Diotomit: Silis bazlı sert bir mineral) kalıp geometrisinin ve ekstrüzyon koşullarının (sıcaklık, yük vb.) üretim parametresine etkileri incelenmektedir (Liang ve diğ., 1999).

1.4. Mikronize Dolgu Maddelerinin Polipropilen Malzemelerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

1.4.1. Darbe dayanımına etkisi

Talk mineralinin (ortalama partikül çapı $5\mu\text{m}$ – $6,3\mu\text{m}$) saf olarak PP içerisine katkılanırılması sonucu elastisite modülünü arttırma, akma ve çekme dayanımını düşürme etkisi bulunmaktadır. Akma ve kopma uzaması da paralel olarak düşmektedir. Bunların yanısıra katkının artmasıyla kopmadaki uzaması önemli ölçüde düştüğünden darbe dayanımının zayıfladığı görülmektedir (Chuah ve diğ. 2000).

Talk mineral dolgu maddesinin varlığının darbe dayanımına etkisi birçok çalışmada bilim adamlarınca incelenmiştir. Almeida ve arkadaşlarının düşük (ağırlıkça %1-%4) talk mineral dolgusuyla yapılan çalışmada, talk mineralinin dinamik hasar mekanizmalarında çok önemli rolü olduğu üç boyutlu hacimsel deformasyon gradyanlarının incelendiği yöntemle saptamışlardır. Talk mineralinin PP'ye ağırlıkça %6'dan fazla takviye edilmesiyle beraber darbe dayanımı düşmektedir (Almeida ve diğ. 2008).

1.4.2. Kırılma tokluğuna etkisi

Malzemelerin kullanım şartlarına göre statik, dinamik ve darbe tipi zorlanmalara maruz kalmaktadır. Polimerlerin çekme ve akma dayanımları zamana bağımlıdır. Bu mekanik özelliklerin aynı şekilde malzemenin kırılma özelliklerini de etkilemesi beklenmektedir. Mineral ile katkılanırılan malzemelerin mekanik özelliklerinin değişmesi aynı zamanda kırılma özelliklerinin de değişmesine neden olabilecektir (Williams, 1987).

Tokluk çeşitli darbe testleri ve kırılma enerjisi ölçümleri ile değerlendirilir. Darbe kuvveti çeşitli faktörlere bağılıdır. Bu faktörler arasında dolgu maddesinin şekli ve büyüklüğü, polimer tipi, sıcaklık, dolgu maddesi yüklenmesi, en/boy oranı, yüzey enerjisi, katkıları, pigmentler yer alır. Darbe özellikleri, darbe kuvvetini arttırıcı maddeler veya kauçuk ile güçlendirilmiş polimer matris ilavesiyle düzeltilebilir (Gachter ve diğ. 1990, Hohenberger 2003).

Yüzeyi silan ile kaplı ve kapsız cam kürenin polipropilenin darbe kırılma enerjilerine etkilerini incelemişlerdir. Kompozitlerin darbe yüzey enerjilerinin artan cam küre oranı ile arttığı, yüzey kaplaması ilavesiyle ise değişmediği görülmüştür (Liang ve diğ., 1999).

Saf talk minerali ve polipropilen blok kopolimerin kompozit için kullanılmasının yanı sıra uygulamada ve deneysel çalışmalarda talk mineralenin kimyasal yüzey işlemlerine tabi tutulduğu görülmektedir. Ayrıca talk ve polipropilenin meydana getirdiği kırılma kompozitin elastisite modülünü düşürmek ve kırılma dayanımı arttırmak amacıyla hacimsel olarak %20'lere kadar elastomer ilavesi yapılmaktadır. Bu işlemler sayesinde talk mineralinin serbest yüzey enerjisi başta olmak üzere polimer matrisi ile etkileşimi artırılmakta ve daha iyi yapışma sağlanmaktadır (Alonso ve diğ. 1996).

1.5. Yüzey Modifikasyonu

1.5.1. Ca-Stearat bağlayıcılar ile yüzey modifikasyonu

Metal sabunu olarak adlandırılan kalsiyum stearatlar, iç ve dış yağlayıcı özelliği ile çekirdeklenme etkisi sağlayan ajanların yanında ısı stabilizatör olarak kullanılır. Kalsiyum stearat, aynı zamanda kalıp ayırıcı olarak bilinmektedir.

Stearat kaplanmış kalsiyum karbonat nanopartikülleri ile çekirdeklenmeye teşvik eden polipropilenin sistemetik olarak incelendiği çalışmada tek bir tabaka halinde kaplanan kalsiyum karbonat katkı maddesinin atomik ve optik mikroskoplarla görüntülenmesi sonucunda, polipropilenin kristalizasyon sıcaklığında çekirdekleştirici etkisi açıkça görülmüştür. Yetersiz veya aşırı kaplamanın çekirdeklenme yeteneğini zayıftır. Bunun sebebi ise PP/CaCO₃ arayüzünün yüksek sıcaklıklarda yumuşak bir tabak oluşturmasıdır. Tek tabaka kaplanması nanopartiküllerde güçlü bir çekirdeklenme etkisi yapmaktadır. Tek tabaka kalsiyum stearat kaplı ağırlıkça %40 kadar nanopartiküllerde kristalleşme derecesinde artış sağlamaktadır (Lin ve diğ. 2010).

1.6. Kırılma Mekanikği

1.6.1. Giriş

Malzemelerin kırılma davranış, insanoğlunun var olduğu günden itibaren hayatın kalitesini de etkilemiştir. İlk insanlar, taştan aletler yapmak üzere gevrek kırılmayı kullanmışlardır. Mısırlıların ve Romalıların yaptığı pek çok yapının hala ayakta kalabilmesi, ilk mimarların ve mühendislerin başarılarının birer ölçüsüdür. Hala ayakta kalabilen tarihi yapılar hiç şüphesiz ki başarılı dizaynların birer örnekleridirler. Romalıların yaptıkları köprüleri test etmek için, tasarımcıyı köprünün altında bırakıp, üzerinden top arabaları geçirdikleri bilinmektedir.

Makine parçaları, yanlış tasarımlar, malzeme hataları, beklenmeyen yükler, üretim hataları ve diğer karmaşık ve pek de anlaşılamayan nedenlerden dolayı kırılabilirler. Aynı hatanın tekrarı istenmiyorsa hasarın nedeninin anlaşılması çok önemlidir (Yayla, 2005).

Kırılma mekanikğinin en önemli yönü, gerilme altındaki malzemelerde çatlak ve gerilme konsantrasyonunu artırıcı faktörleri göz önüne alarak kırılma problemlerinin incelenmesidir. Makine ve konstrüksiyonlarda kullanılan malzemelerin çoğunda imalat sırasında meydana gelen mekanik çatlaklar olabilir. Malzemelerin üretimi sırasında da çeşitli nedenlerden dolayı kılcal çatlaklar bulunabilir. Bu çatlaklar civarında gerilme konsantrasyonu oluşur ve kırılmaya sebep olur. Gerilme konsantrasyonu sebebiyle meydana gelen çatlaklar, kullanılan malzemenin akma gerilmesinden daha düşük gerilmelerde de olabilir. Yapısında kılcal çatlaklar ve plastik deformasyona uğrayan iri boşluk ihtiva eden malzemeler genellikle gevrek kırılma gösterirler (Kayalı, 1983).

Kırılma mekanikği, hemen hemen tümüyle kırılmayla belirlenen hasarları inceler. 1920 yılında Griffith malzemelerin teorik mukavemetleri ile deneysel değerlerden elde edilen mukavemetlerin arasındaki farkı açıklamaya çalışmıştır. Griffith'in geliştirmiş olduğu modele göre malzemelerde değişik doğrultularda ve çeşitli boyutlarda mikroçatlaklar bulunmaktadır. Gerilme anında bu mikroçatlakların ucunda yüksek gerilmeler oluşur, yüksek gerilmelerin varlığı ile mikroçatlakların ilerleyip birleşmeleri ile malzemelerin hasara uğramasını sağlamaktadır. Griffith'in

tanımlamış olduğu mikroçatlak kavramı ile kırılmayla ilgili bir problemin ilk başarılı analizini sağlamış bulunmaktadır. Griffith analizinde camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlemiş, sistemin toplam enerjisindeki azalmayla önceden var olan bir çatlağın ilerlemeye başlayacağını formüle etmiştir. Griffith'in oluşturduğu enerji dengesi yaklaşımına göre gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik germe enerjisinde azalma olur ve bu enerji yeni çatlak yüzeylerinin oluşmasını sağlar. Griffith böyle gevrek malzemelerin teorik mukavemetlerinin tahminini sağlamış olup kırılma mukavemetiyle hata boyutu arasındaki ilişkiyi bulmuştur.

Genel olarak, malzemenin genişliği ve çatlak civarındaki düzlem ölçüleri plastik bölgeye göre yeterince büyükse, büyüme başlangıcındaki K değeri sabittir ve bu onun minimum değeridir. Bu tanım düzlem şekil değiştirme faktörü olarak adlandırılır ve malzemenin K_I değeridir. K_I özellikle malzeme seçiminde önemli bir faktördür çünkü tokluğun diğer ölçülerinden farklı olarak malzemenin şeklinden bağımsızdır.

Irwin, Griffith'in enerji dengesini irdelemiş olup G ile sembolize edilen bir malzeme özelliği tanımlamıştır. G , birim kalınlık başına çatlak uzunluğundaki birim artış için absorbe edilen toplam enerjidir. G , şekil değiştirme için enerji boşalma miktarı olarak ifade edilebilir.

1950'lerin ortalarında Irwin'in enerji yaklaşımıyla gerilme yoğunluğu yaklaşımı arasında denklik olduğunu bulması, kırılma mekaniği açısından önemli bir gelişmedir. Çatlak ucundaki gerilme şiddeti ile uygulanan gerilme ve elemanın geometrisi arasındaki bağıntının değeri bulunabilmiş, K , olarak sembolize edilip kırılma şiddeti faktörü olarak adlandırılmıştır. Buna göre çatlak ucunda, kritik bir gerilme dağılımına erişildiğinde kırılma olmaktadır. Böylece kritik gerilme şiddeti (yoğunluğu) faktörü K_C veya enerji terimiyle G_C , kritik şekil değiştirme enerji boşalma miktarı değerleri olarak adlandırılan malzeme özellikleri ortaya çıkmıştır (Uğuz, 1996).

1.6.2. Lineer elastik kırılma mekaniği

Malzeme içinde mikro çatlak ve benzeri kusurlar doğal olarak mevcut olmaktadır. Kırılma mekaniğinin incelenmesinde kullanılan ve malzemedeki tüm davranışların

elastik sınırlar içinde kalması prensibinden hareketle geliştirilen analitik ifadelerin bütününe Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) denir. Bu metodun temel prensibi çatlak ucunda oluşan gerilmelerin parçaya uygulanan gerilmeye, çatlağın uzunluğuna ve yönüne bağlı olarak ifade edilmesidir. Buna göre; bir çatlağın ilerleyebilmesi iki şekilde hesaplanabilir:

- Yükleme sonucu parçada depolanan enerji kritik bir değeri aşmış ise,
- Çatlak ucundaki gerilmenin değeri kritik bir değere ulaşmış ise,

Bu iki metodun uygulanmasında iki yaklaşım söz konusudur;

- Enerji dengesi yaklaşımı,
- Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı.

Kırılma çok karmaşık bir proses olup bu kavram altında, mikro ve makro boşlukların veya çatlakların oluşumunu ve gelişimini, dislokasyon mekanizmasını, kayma bantlarını malzemenin geometrisi gibi konuların bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir. Kırılma olayını ortaya koymada bütün bu mekanizmaları bir arada değerlendiren kesinleştirilmiş genel bir teori olmamakla beraber malzemelerde kırılma olaylarını anlamada ve açıklamada kullanılan önerilmiş pek çok teori vardır. Bunlardan biri de Enerji Teorisi'dir.

Basit çekme durumunda cismin birim hacminde depolanan elastik enerji;

$$U_o = \frac{\sigma^2}{E} \quad (1.1)$$

şeklindedir.

İçinde çatlak bulunan bir sistemin bir F kuvveti etkisi altında tutulması durumunda sistemin toplam enerji dengesi şu şekilde yazılacaktır;

$$U_e = U_s + U_k + U_d \quad (1.2)$$

Buradaki U_e =Dış enerji, U_s =Gerilme enerjisi, U_k =Kinetik enerji ve U_d =Kaybolan enerji (kırılma enerjisi) olarak tanımlanır.

Statik veya yarı statik durumda $U_k=0$ alınabileceğinden birim genişliğinde bir levhada bulunan çatlakın ilerlemesi durumunda:

$$\frac{\partial}{\partial a}(U_e - U_s) = \frac{dU_d}{da} = G \quad (1.3)$$

yazılabilir. Burada G değerine “enerjisi boşalma miktarı” (energy release rate) veya “çatlak ilerleme enerjisi” denir. Ayrıca $R = \partial U_d / \partial a$ değeri de çatlak ilerleme direnci olarak bilinir. Kırılma mekaniğinde G değeri çatlakın birim alanı kadar ilerlemesi sonucu harcanan enerji olmak üzere $2\gamma = G$ yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial a}(U_e - U_s) = \gamma \frac{dA}{da} \quad (1.4)$$

burada ∂A , çatlakın ∂a kadar ilerlemesi sonucu oluşan çatlak yüzeylerinin alanıdır. Şekil 1.1’deki gibi genişliği B olan bir levhaya bir F kuvveti uygulandığında kuvvetin uygulandığı nokta v kadar yer değiştirecektir. Bu durumda çatlak ∂a kadar uzama gösterdiğinde kuvvetin uygulama noktası dv kadar yer değiştirecektir. Böylece dış kuvvetler tarafından yapılan iş $U_e = F \cdot dv$ olacaktır. Denklem 1.4 birim genişliğinde bir levha için yazılmıştı. B genişliğindeki bir levhada çatlakın ilerlemesi durumunda Denklem 1.5’e göre G değeri hesaplanır.

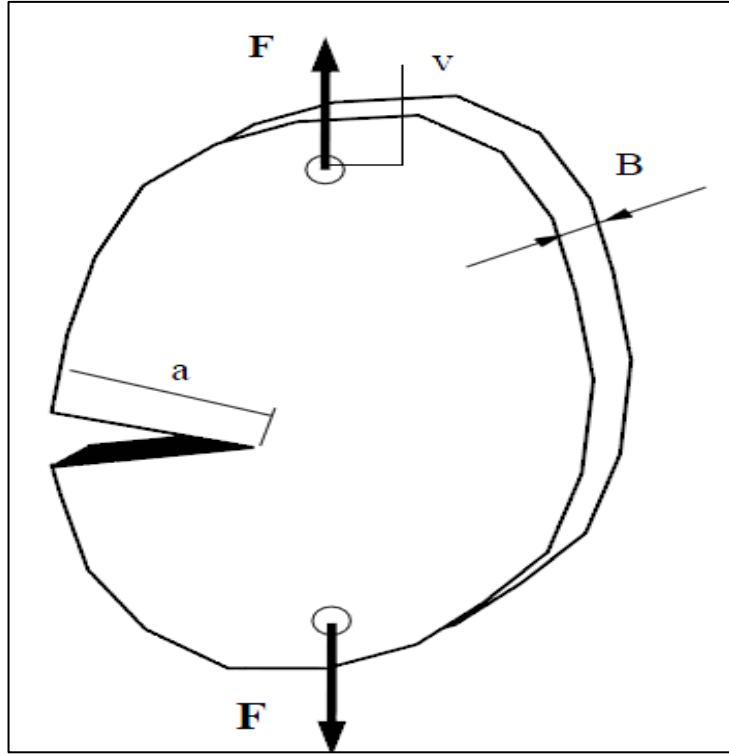
$$G = \frac{\partial}{\partial a}(U_e - U_s) = \frac{1}{B} \left(F \frac{\partial v}{\partial a} - \frac{\partial U_s}{\partial a} \right) \quad (1.5)$$

Şekil 1.1’deki gibi yük altında bulunan bir sistemde çatlak ilerlemediği sürece meydana gelen v uzaması, uygulanan kuvvetle doğru orantılıdır. Komplians olarak da bilinen bu ilişkiyi şu şekilde ifade etmek mümkündür;

Kuvvet = Rijitlik x Deplasman

$$F = kv = \frac{1}{C} v \quad \text{veya} \quad v = C \cdot F \quad (1.6)$$

dir. Burada C ’ye levhanın kompliansı denir.



Şekil 1.1. F kuvveti etkisi altındaki levha (Broek, 1982)

Böylece bir elastik plakanın şekil değişimi enerjisi;

$$U_s = \frac{1}{2} Fv = \frac{1}{2} CF^2 \quad (1.7)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklem (1.5) ve Denklem (1.6)'dan;

$$G = \frac{1}{B} \left(F^2 \frac{\partial C}{\partial a} + CF \frac{\partial F}{\partial a} - \frac{1}{2} F^2 \frac{\partial C}{\partial a} - F^2 \frac{\partial C}{\partial a} \right) = \frac{F^2 \partial C}{2B \partial a} \quad (1.8)$$

Böylece çatlak boyuna bağlı olarak C değeri elde edildiğinde bu noktaların oluşturduğu eğrinin eğimi ($\partial C / \partial a$) hesaplanarak Gc değeri hesaplanmış olur. Burada verilen “enerji boşalma miktarı” G kritik bir değere ulaştığı zaman çatlak hareket etmeye başlar. Bu G değerinin birimi kJ/m² 'dir. Dolayısıyla kuvvet altında çatlağın davranışı şu şekilde ifade edilebilir:

- $G = R$ ise kararlı çatlak ilerlemesi var,

- $G < R$ ise çatlak ilerlemesi yok,
- $G > R$ ise kararsız çatlak ilerlemesi var,

Griffith, gerilme analizinden yararlanarak kuvvet altında tutulan birim kalınlığındaki bir levhada a uzunluğu kadar bir çatlak oluşması durumunda sistemde meydana gelen elastik enerji değişikliğini:

$$\frac{dU_d}{da} = G = \frac{\pi a \sigma^2}{E} \quad (1.9)$$

şeklindedir (düzlem gerilmede). Düzlem genlemede E yerine $E/(1-\nu^2)$ yazılabileceğinden;

$$\frac{dU_d}{da} = G = (1-\nu^2) \frac{\pi a \sigma^2}{E} \quad (1.10)$$

bağıntısı ile ifade edilmiştir (düzlem genlemede).

Benzer şekilde bir levha içinde bulunan ve levhaya etki eden σ gerilmesi altında gerilmeye dik durumunda $2a$ uzunluğundaki çatlak oluşumunda elastik enerjideki azalma;

$$U_d = \frac{(\pi^2 a^2 \sigma^2)}{(E)} \quad (1.11)$$

şeklindedir. Çatlak ilerlemesi durumundaki kritik gerilme ise;

$$\sigma_c = \left[\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right]^{(0,5)} \quad (1.12)$$

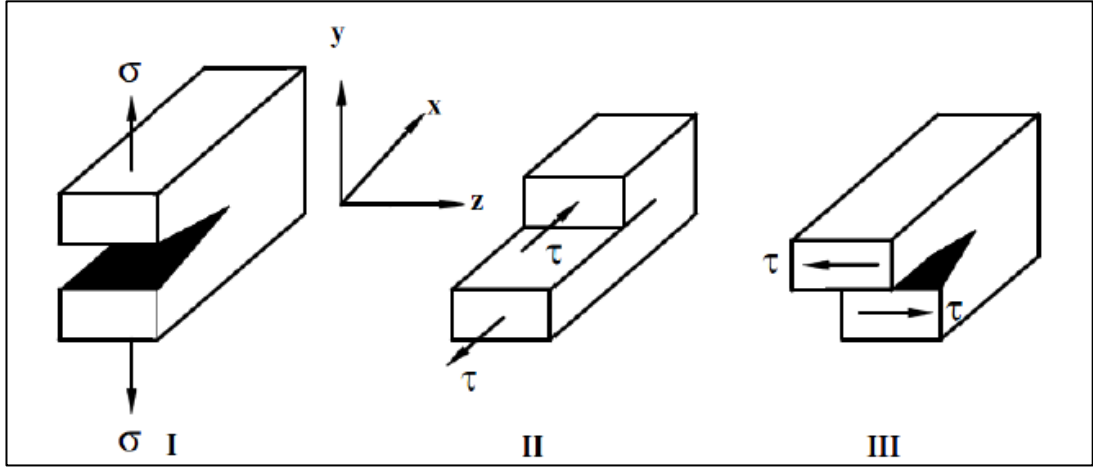
şeklindedir.

Kırılma tokluğu ölçülürken, kırılmada üç model düşünülür.

- Çatlak açılma deformasyon tipi (Mode I)
- Çatlak kayma deformasyon tipi (Mode II)

iii. Çatlak yırtılma deformasyon tipi (Mode III)

Bu üç model Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Malzemelerde çatlak ilerlemesi, yükleme durumuna bağlı olarak, bu modlardan sadece birisiyle verilen türde olabileceği gibi farklı modların bir birleşimi şeklinde de olabilir. Çatlağın gerilme analizinin yapılabilmesi için bu modların bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 1.2. Çatlak ilerleme modları;I-Açılma modu , II-Kayma modu, III-Yırtılma modu (Arıkan, 2002)

Çatlak ilerlemesinde en çok görülen ve en fazla deformasyona uğratan çatlak ilerleme türü Mod I’dir. Uygulanan yük çatlak yüzeyine dik yönde etki (y eksen yönünde) etmekte olup oluşan kırılma yüzeyleri birbirine zıt (açılma hareketi etkisi) yönde ayrılmaktadır. Mod II’de uygulanan yük çatlak yüzeyine paralel yönde (x eksen yönünde) etkimekte olup oluşan kırılma yüzeyleri birbirine paralel yönde (kayma hareketi etkisi) ayrılmaktadır. Mod III’te uygulanan yük çatlak yüzeyine x-y ve x-z düzlemleri yönünde simetrik olarak etki etmekte olup kırılma yüzeyleri z eksen doğrultusunda çatlağın dik kenarına paralel şekilde (yırtılma hareketi etkisi) ayrılmaktadır. Çatlak ucu elastik alanının büyüklüğünün tanımlanmasında “K” şeklinde ifade edilen gerilme şiddeti faktörü (GŞF) söz konusudur. Lineer elastik kırılma davranışının bulunduğu bir ortamda K, malzemelerde çatlak ilerleyişi ile kırılma davranışı arasındaki ilişkiyi ele alır.

$$K=\sigma\sqrt{\pi a} f(a/W) \quad (1.13)$$

şeklinde verilir. Burada $f(a/W)$, numunenin ve çatlak geometrilere bağlı boyutsuz bir parametredir. Çatlak ağzındaki GŞF, sonsuz genişlikteki bir numunede, her üç mod için aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a}, \quad K_{II} = \tau_{II} \sqrt{\pi a} \quad \text{ve} \quad K_{III} = \tau_{III} \sqrt{\pi a} \quad (1.14)$$

burada, K_I , K_{II} ve K_{III} sırasıyla Mod I, Mod II ve Mod III' e göre GŞF dir. Mod I çatlak ağzı gerilme bölgeleri dağılımı ve koordinat sistemi gösterimi Şekil 1.3'deki gibidir. Çatlak ağzındaki gerilmeler Denklem 1.15'deki gibidir;

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left(2\nu \cos \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (1.15)$$

Şekil 1.3'deki gibi açılan çatlak, r mesafesindeki noktadaki şekil değiştirmeleri aşağıdaki gibidir. Burada ν : poisson oranı, σ_{xx} : x eksenindeki gerilme değeri, σ_{yy} : y eksenindeki gerilme değeri ve σ_{zz} : z eksenindeki gerilme değeridir. K_I : Mod I için gerilme şiddet faktörü, E : Elastisite modülü ve θ : r 'nin x eksenine yaptığı açıdır. u , v , w ise sırası ile x , y , z eksenlerindeki deplasmanlarıdır.

$$u = \frac{K_I}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} (1 + \nu) \left[(2K - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$v = \frac{K_I}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} (1+v) \left[(2K+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$w = -v^* \frac{K_I}{E}$$

$$v = v^*, K = \frac{(3-v)}{(1+v)} \quad (\text{Düzlem gerilme hali için})$$

$$v^* = 0, \quad K = (3-4\nu) \quad (\text{Düzlem genleme hali için}) \quad (1.16)$$

şeklinde bulunur.

Mod II durumu için gerilmeler;

$$\sigma_{xx} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{zz} = \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

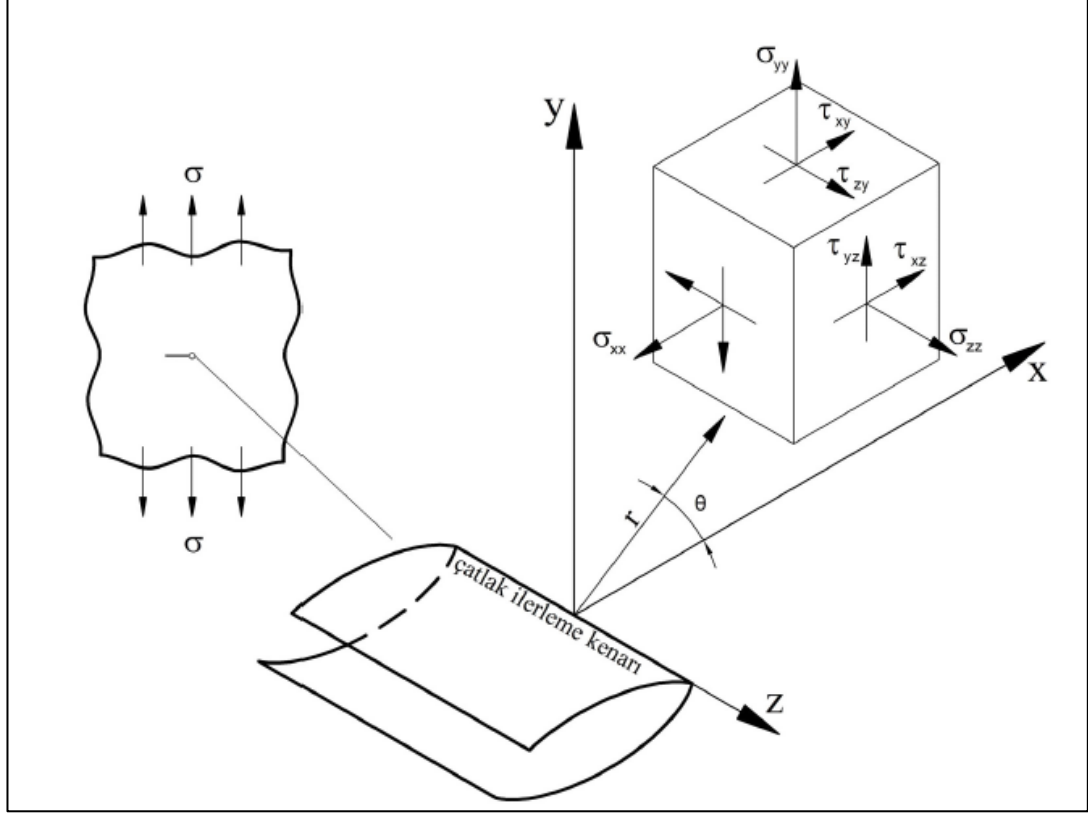
$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (1.17)$$

Deplasman Denklem 1.18' deki gibi bulunur;

$$u = \frac{K_{II}}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + 2\nu \cos^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$$v = \frac{K_{II}}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[-1 + 2\nu \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$$w = 0 \quad (1.18)$$



Şekil 1.3. Çatlak ağzı gerilme dağılımı (Yılmaz, 2010)

Mod III durumu için gerilme ve deplasmanlar;

$$\tau_{xz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\sigma_{yz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2}$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0$$

$$w = \frac{K_{III}}{E} \left[\left(\frac{2r}{\pi} \right)^{1/2} \right] \left(\sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (1.19)$$

bulunur.

G ile K arasındaki ilişki şu şekildedir;

$$K^2 = EG \quad (\text{Düzlem gerilme})$$

$$K^2 = \frac{EG}{(1-\nu^2)} \quad (\text{Düzlem genleme}) \quad (1.20)$$

Üç eksenli düzlem genleme ve düzlem dışı genleme için genel durumda;

$$G = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E} (1-\nu^2) + \frac{(1+\nu)}{E} K_{III}^2 \quad (1.21)$$

Düzlem gerilme durumu (Mod I ve Mod III);

$$G = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E} \quad (1.22)$$

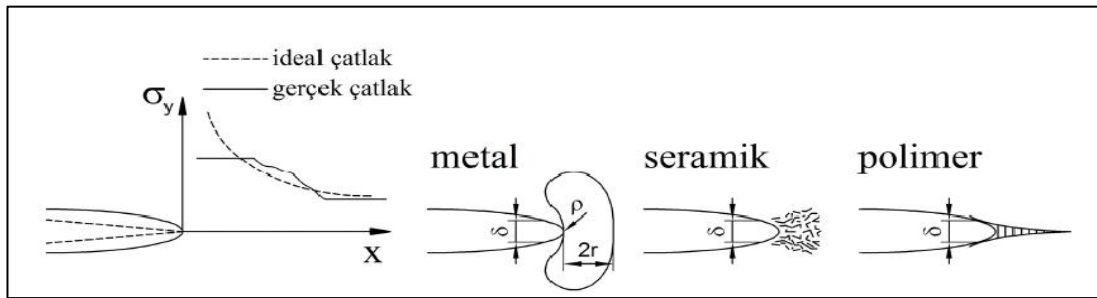
1.6.3. Elasto plastik kırılma mekaniği

Lineer elastik kırılma mekaniği daha ziyade "gevrek" malzemelere uygulanır. Tipik kullanım alanları cam, sert çelik, mukavemetli alüminyum alaşımlarıdır, hatta sünekgevrek sıcaklığının altındaki düşük karbonlu çelikler bu şekilde analiz edilebilirler.

Tüm malzemelerin kırılma davranışını LEKM ile izah etmek hemen hemen imkansız olup, alternatif bir kırılma modeli gereklidir. EPKM, lineer olmayan davranış (plastik deformasyon gibi) gösteren malzemeler için uygulanır. Elastik– plastik davranışı karakterize eden parametrelerden biri çatlak ucu açılma miktarı (crack tip opening displacement, CTOD), diğeri ise J-integraldir. CTOD ve J integralin kritik değeri, boyuttan bağımsız kırılma tokluğu ölçümü ve büyük miktardaki çatlak ucu plastik davranışı verir (Anderson 1991, Çolak 2006).

Teorik olarak çatlak ucunda oluşan gerilmenin sonsuz değerine karşılık pratikte malzemelerde çatlak ucunda gerilmeler sonsuz olamaz. Uygulanan gerilme çok fazla değil ise, yani çatlak ucunda oluşan maksimum gerilme malzemenin akma

mukavemetini aşmıyor ise, malzeme çatlakların varlığına müsaade edebilir. Sünek malzeme grubunda olan metalik malzemelerde, çatlakların etrafında geniş plastik deformasyona maruz kalmış bölgeler oluşmaktadır. İşte malzemenin plastik deformasyona uğradığı bu bölgeye çatlak ucu plastik bölge denilmektedir. Keskin çatlak uçlarında oluşan aşırı deformasyona uğratılmış bölgede çatlak ucu artık körelmiş ve keskinliği azalmıştır. Bu bölgede gerilme artık sonsuz olmayacak ve çatlak ucu kapalı kalmayıp δ kadar açılacaktır. Bu δ değerine çatlak ucu açılma mesafesi (CTOD) denilmektedir (Perez, 2004).



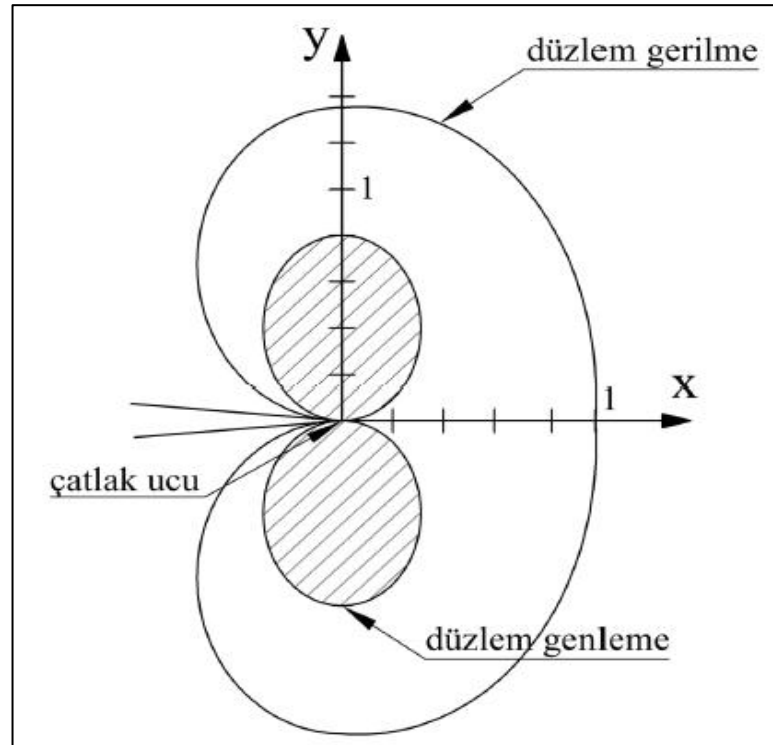
Şekil 1.4. Malzemelerde çatlak ucunda plastisite, mikro çatlama ve craze (sır çatlağı) sonucu (Perez, 2004)

Çatlak ucunda oluşan sonsuz gerilme için çatlak ucunda farklı malzemeler farklı tavır sergileyeceklerdir (Şekil 1.4). Polimerin bir kısmında çatlak ucunda boşluklar ve bu boşluklar arasında çekilmiş lifler oluşacaktır. Bu bölgeye sır çatlağı bölgesi denir. Seramik gibi gevrek malzemelerde ise bu bölgede küçük boyutta ve farklı yönlerde küçük çatlakların yoğun olduğu bir proses bölgesi meydana gelir. Bu üç durumda da çatlak ucu aşırı bir deformasyona maruz kalır ve yakın bölgelerde ayrılmalar oluşur. Teorik olarak çatlak ucunda olması gereken yüksek gerilme daha geniş bir alana yayılır yeniden bir dağılım gösterir.

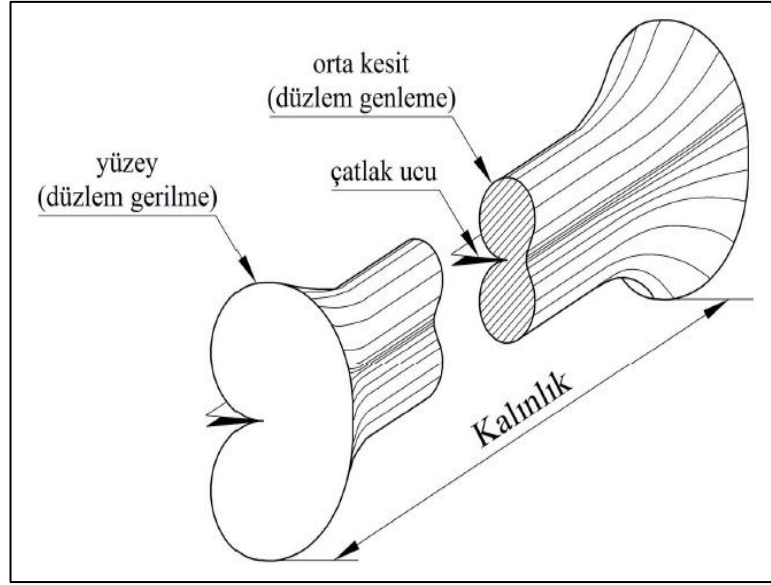
Çatlak ucundaki gerilme değerlerinin çok yüksek olması dolayısıyla pratikte malzemelerde bu yüksek gerilme değerlerine ulaşamaz. Çünkü malzemede akma gerilmesi bu değerlerin çok altındadır. Bu yüzden bilhassa sünek malzemelerde çok daha belirgin olan çatlak ucu gerilmelerinin malzemenin akma dayanımını aştığı yerlerde plastik şekil değişimine uğramış bir bölge oluşur. Bu bölgeye çatlak ucu plastik bölge denir (Şekil 1.5 ve Şekil 1.6).

Çatlak içeren bir numune gerilmeye maruz kaldığında çatlak geometrisi nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşur. Ancak çok ince numunede (levha şeklinde) x ve y yönlerinde gerilmeler mevcutken z, yani kalınlık yönünde gerilme yoktur ($\sigma_z=0$) çünkü bu yön serbesttir. Böyle bir geometride gerilmeler iki eksenli (düzlemsel) olduğundan düzlem gerilme hali söz konusudur.

Kalın numunelerde numune yüzeylerinde yine düzlem gerilme hali söz konusudur ve numune üç boyutta deformasyona uğrar. Z yönünde numune içine ilerledikçe üç eksenli gerilmeler ortaya çıkar. Ancak bu defa şekil değiştirme iki boyutludur; numune x-y düzleminde şekil değiştirir. Bunun da nedeni, numune içine ilerledikçe malzeme, z eksenli boyunca kendini çevreleyen malzeme tarafından tutulur ve z yönünde deformasyonu engellenir ($\epsilon_z=0$). Bu durumda da düzlem genleme hali söz konusudur (Janssen ve diğ. 2005).



Şekil 1.5. Düzlem gerilme ve düzlem genleme durumlarında çatlak ucu plastik bölge (Yayla, 2005)



Şekil 1.6. Düzlem gerilme ve düzlem genleme durumlarında çatlak ucu plastik bölgenin kalınlık boyunca değişimi(Yılmaz 2010, Armağan 2011)

1.6.4. Kırılma tokluğu deneyleri

Kırılma tokluğu deneylerinin yapılması malzemelerin kırılma davranışlarının belirlenmesinde önemlidir. Bu önem kırılmaya karşı direncin kritik gerilme şiddeti faktörünün (K_{IC}) tespitinde kullanılmaktadır. Kırılma tokluğu deneylerinde yüklemenin türü ve malzemenin karakteristik davranışı bu deneylerin farklı açılardan gelişmesini ve kullanılmasını sağlamıştır. Ana hatlarıyla bu deneyler; yüklemenin türüne göre statik veya dinamik kırılma tokluğu deneyleri, malzemenin sünek veya gevrek oluşuna göre Lineer elastik ve Elasto-Plastik kırılma tokluğu deneylerin olarak ayrılmaktadır.

1.6.4.1. Düzlem genleme kırılma tokluğu (K_{Ic})

Kırılma tokluğu testlerinin geliştirildiği 1950 ve 1960'lı yıllarda kararsız çatlak ilerleme direncini belirlemede LEFM analiz yöntemi ortaya konmuştur. Kırılma olayında, çoğu yapısal malzemenin tamamen elastik bir tarzda kırılmadığı gözlenmekle birlikte çatlak ucu plastik bölgenin sınırlı olması şartı ile büyük yapılardaki kararsız çatlak ilerleme olayını belirlemekte küçük numuneler kullanılabilir. İlerleyen yıllarda çatlak ucundaki plastik bölgenin kırılma

mekaniğinde daha fazla dikkate alınıp hesaplamalara dahil edilmeleri ile birlikte daha gerçekçi ve isabetli yaklaşımlar elde edilmiştir. Özellikle polimer esaslı malzemelerde çatlak ucunda meydana gelen plastik deformasyonlar ve morfolojik değişimlerin kırılma davranışlarını ciddi anlamda etkiledikleri tespit edilmiştir.

1950'lerin ortalarında Irwin'in, enerji yaklaşımıyla gerilme yoğunluğu yaklaşımı arasında denklik olduğunu bulmasının ardından çatlak ucundaki gerilme şiddeti ile uygulanan gerilme ve elemanın geometrisi arasındaki bağıntının değeri bulunabilmiş ve "K" olarak sembolize edilip gerilme şiddeti faktörü olarak adlandırılmıştır. Buna göre çatlak ucunda, kritik bir gerilme dağılımına erişildiğinde kırılma olmakta ve böylece kritik gerilme şiddeti (yoğunluğu) faktörü K_C veya enerji terimiyle G_C , kritik şekil değiştirme enerji boşalma miktarı değerleri olarak adlandırılan malzeme özellikleri ortaya çıkmıştır. Standart numuneler ile yaptığımız denetlerde K_C değerinin bulunmasıyla mevcut yapılarda ve belirlenen şartlar altında malzemede hangi hatalara izin verilebileceği belirlenebilir.

K_C değerini belirlemek için birçok numune geometrisi ve test metodları göz önüne alınmıştır. 1960'lı yıllarda yorulma çatlağı için çentik özellikleri, levha kalınlığı, kırılma yüzeyi ve gerilme seviyesi gibi birçok parametre göz önüne alınmış ve bu konuda standart "düzlem gerilme kırılma tokluğu" testleri ortaya konulmuştur. Bu testler statik kırılma tokluğu deneyleri adı altında en yaygın olarak kullanılan test tekniklerinden olan;

- Üç nokta eğme deneyi
- Kompakt çekme

deneyleridir. Yapılan çalışmalara göre bu metodlar kullanılarak, %5'lik bir sapma ile K_C değerinin hesaplanabileceği ortaya konmuştur.

Malzemelerin minimum kırılma direnci olan "kırılma tokluğu" nu elde etmek için numunelere yorulma çatlağı açılmalıdır. Bu çatlağın doğru bir şekilde oluşmasını ve ilerlemesini sağlamak için numuneye çentik açılır.

Malzemenin kırılma direncini ortaya koyan K_C değerin doğruluğu, gerilme şiddeti faktörünün yorulma çatlaklarının hemen ucunda oluşan gerilme–genleme değerlerine bağlıdır. Numunenin önemli büyüklükleri şu şekildedir;

- a : Çatlak boyu,
- B : Numune genişliği,
- $W-a$: Çentik ucundaki kalan kısmın uzunluğu

Kapsamlı bir şekilde yapılan deneysel çalışmalardan, düzlem genleme davranışlarının oluştuğundan emin olmak için aşağıdaki minimum uzunluklar belirlenmiştir.

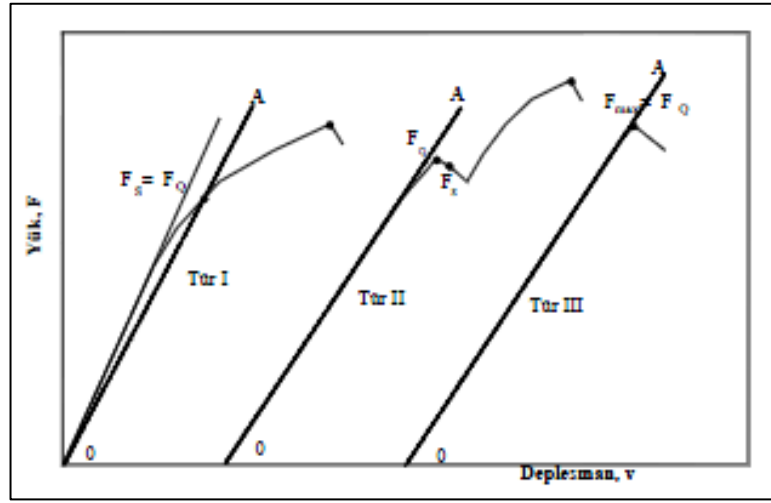
$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2, \quad B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2, \quad W \geq 5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (1.23)$$

Bu bağıntılarda yer alan σ_{ys} malzemenin akma mukavemetini ifade etmektedir. Öte yandan düzlem gerilmede ; numunenin a , B ve W boyutlarının belirlenmesi için K_C değerin önceden bilinmesi veya tahmin edilmesi gerekmektedir. Bunu da, K_C değerini olduğundan fazla öngörerek, mümkün olduğunca büyük ve kalın numune kullanarak veya yüksek mukavemetli malzemelerden σ_{ys}/E oranına bağlı olarak a ve B değerlerini belirlemektir.

Çentikli eğme ve kompakt çekme testlerinde kullanacak test aparatları ISO 13586 standartında belirtilmiştir. Test cihazına bağlanan numunenin yükleme hızı ve numune üzerinde yapılacak son ölçümlerde bazı önemli noktalar göz önüne alınmalıdır. Yükleme hızının, meydana gelen gerilme şiddeti faktörünü $0.55-2.75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ civarında olması sağlanmalıdır. Bu değer statik yüklemeye karşılık gelmektedir.

Herbir test sonucunda, yük hücrelerinden elde edilen kuvvet (F) ile klip geyçten elde edilen deplasman (v) çıktısı ile ($F-v$) diyagramı elde edilir. Bu eğrinin bağlangıcındaki eğimi $0.7-1.5$ arasında olmalıdır.

Kuvvet–deplasman diyagramları farklı şekillerde olabilirler. Bu diyagramların en önemlileri Şekil 1.7’ de verilmiştir. Başlangıçta deplasman, kuvvet arttıkça lineer olarak artar. Birçok durumda sürekli artan bir non–lineer (Şekil 1.7a) veya ayrı çatlak ilerlemesi ve durma (pop-in) ve devamında bir non–lineer (Şekil 1.7b) ortaya çıkabilir. Non–lineer plastik deformasyon sonucu hızlı çatlak öncesi oluşan çatlak ilerlemesi ortaya çıkar. Malzemede tam elastik şekilde davranıyor ise (Şekil 1.7c) deki gibi diyagram elde edilir.



Şekil 1.7. Kırılma tokluğu deneylerinde rastlanabilen yük-deplasman türleri(Uğuz, 1996)

Gerçekleştirilen testlerden geçerli bir K_C ‘nin elde edilip edilmediğini belirlemek için önce bir aday K_Q değeri hesaplanmalıdır. Daha sonra bu K_Q değerinin numunenin ölçüleri ve malzemenin akma mukavemetinden aşağıdaki (Denklem 1.24) kullanılarak hesaplanan K_Q değeri ile uyumlu olup olmadığı belirlenmelidir. Deneyin geçerli olması için $K_Q = K_C$ olmalıdır.

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2, \quad B \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2, \quad W \geq 5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (1.24)$$

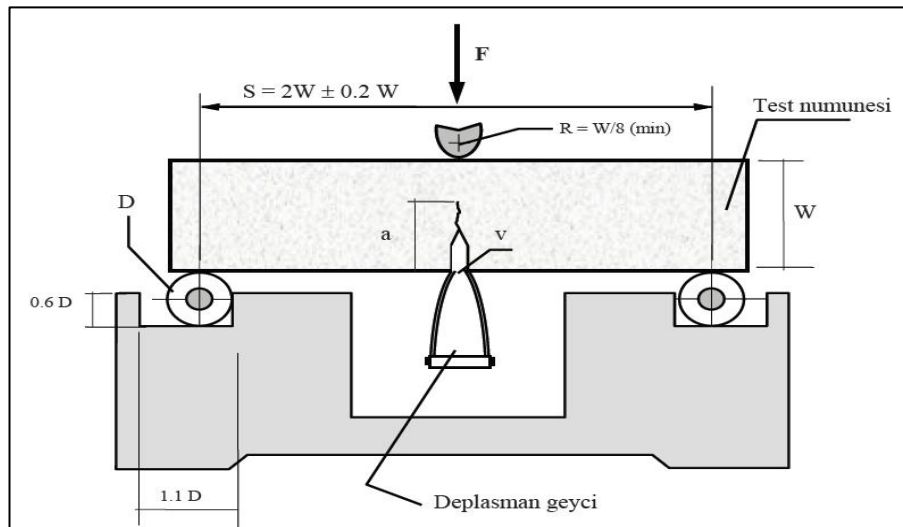
Kuvvet – deplasman eğrileri farklı şekillerde olabilir. K_C değerini hesaplamak için kullanılan F kuvvetini belirlemede birçok kriter vardır. F kuvvetini, %5 ‘lik bir eğimin kritik gerilme gerilme şiddeti faktörü olan K_C değerini hesaplamada yeterli olabileceği bu eğimde de çatlakın başlangıçtaki efektif uzunluğunda %2 ‘lik bir

artışın ortaya çıktığı eğim olduğu tespit edilmiştir. Bu tanımlama standart SENB ve CT numunelerinde plastisitenin kararlı çatlak ilerlemesinin aşağı yukarı efektif çatlak ilerlemesinin %2 artış gösterdiği bir uzunlukta ortaya çıktığı belirlenmiştir (Uğuz 1996, Yayla 2005).

1.6.4.2. Üç nokta eğme deneyi

Eğme deneyi malzemelerin özellikle plastik şekil değiştirme kabiliyeti hakkında fikir veren deneylerdir. Eğme deneyinde malzemeye ait şekil değişimi kabiliyeti hakkında sağlanan kalitatif bilginin yanı sıra eğme dayanımı (σ_e) ve elastisite modülü (E_e) gibi kantitatif değerlerde bulunur. Bu deneydeki amacımız kullandığımız numunelerin eğme dayanımını bulmaktır. 3 noktalı eğme deneyinin test düzeneği Şekil 1.8’de verilmiştir.

Eğme iki desteğe serbest olarak oturtulan dikdörtgen kesitli bir deney parçasının ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değiştirmesidir. Değişik yöntemlerin hepsinde amaç, malzemeyi çatlayıncaya kadar tek yönde eğmektir. Eğme deneyinde deney yapılacak numuneye bir kuvvet uygulandığında, numune kesitinin bir kısmında basma gerilmesi, kesitin geri kalan kısmında çekme gerilmesi meydana geliyorsa numune eğilme halindedir. Eğilme halindeki numunelerin kesitinde, iç yüzeye yakın bölgede basma gerilmeleri, dış yüzeye yakın bölgelerde ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir.



Şekil 1.8. Üç nokta eğme deneyinde kullanılan kırılma tokluğu deney parçası ve aparatının şematik gösterimi (Yayla, 2005)

Eğme deneyi çekme cihazında gerçekleşir. Eğme düzeneği olarak mesnetler bir tabla üzerine, yükleme bloğu denilen mandrel ise cihazın üst kısmına yerleştirilir. Eğme düzeneğinde mandrel çapı ve mesnetlerin çapı önemlidir. Bu değerler, kullanılacak malzemeye göre ve bu malzemeye ait olan standartlara uygun olarak deneye başlamadan önce kumpasla ölçülür.

Ayrıca mesnetler arası açıklıkta yine standartlara uygun ayarlanır. Düzenek ayarlandıktan sonra mesnetler üzerine numune yerleştirilir ve numune bir yükün uyguladığı mandrel yardımıyla eğilir. Eğme deneyi sonucunda, malzemenin eğme momenti, eğilme dayanımı ve elastisite modülünün hesabı için numunenin kırıldığı andaki maksimum yükünü ve deney sırasında yükün uyguladığı noktada numunenin başlangıçtaki duruma göre düşey eksenindeki değişme miktarı olan eğilme miktarının değeri deney cihazına bağlı gösterge ve kayıt düzenlerinden faydalanılarak kaydedilir (Batur 2009, Şardan 2009).

Tek çentik kenarlı eğme test numunesi kullanılarak gerilme şiddeti faktörü Denklem (1.25) ile hesaplanır.

$$K_I = \frac{FL4B}{BW^{3/2}} f(a/W) \quad (1.25)$$

Burada;

$$f(a/W) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{0,5} \left[1,99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 393 \frac{a}{W} + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right) \right]}{2 \left(1 + 2 \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{0,5} \right)} \quad (1.26)$$

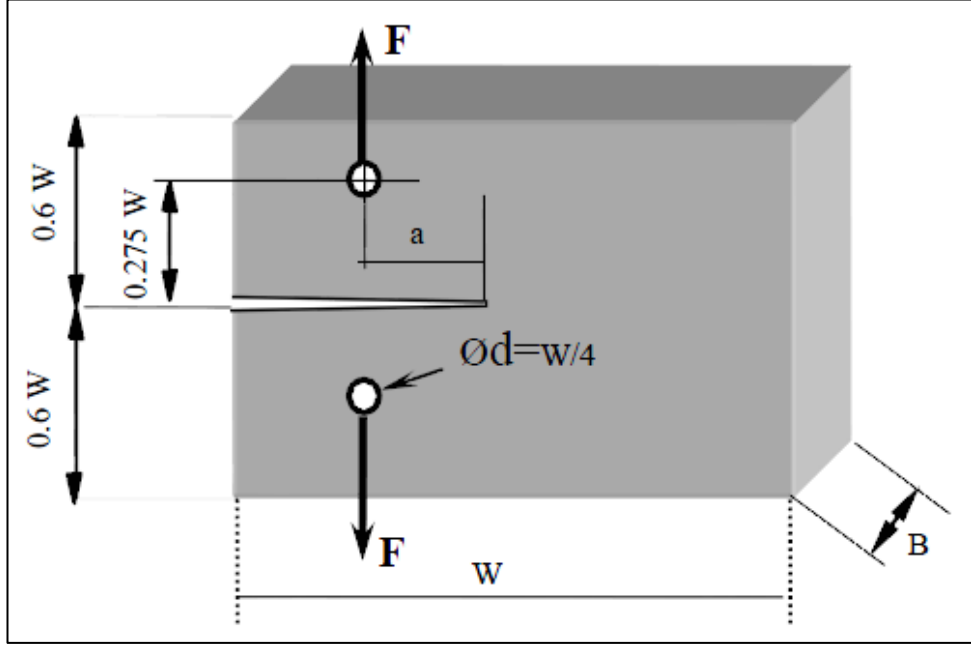
şeklinde hesaplanır. Burada $0.4 \leq a/W \leq 0.6$ sağlaması koşulu ile gerilme şiddeti faktörü:

$$K_I = 3,75 \frac{FW}{B(W-a)} \quad (1.27)$$

Denklem (1.27) ile bulunur.

1.6.4.3. Kompakt çekme deneyi

Bu deneyde kullanılan kompakt çekme (Compact tension – CT) numunesi Şekil 1.9’de verilmiştir.



Şekil 1.9. Kompakt çekme numunesi (Compact tension - CT) (ISO 13586)

Benzer şekilde kompakt çekme (Compact tension – CT) numunesi kullanılarak gerilme şiddeti faktörü;

$$K_I = \frac{FW}{BW^{3/2}} f(a/W) \quad (1.28)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada;

$$f(a/W) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0,886 + 4,64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13,32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \quad (1.29)$$

şeklinde hesaplanır.

Burada $0.3 \leq a/W \leq 0.8$ ön şartı sağlaması koşuluyla gerilme şiddeti faktörü:

$$K_I = 1,17 \left[1,5 - \left(\frac{a}{W} \right) + 0,66 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right] \frac{F(2W+a)}{B(W-a)^{1/2}} \quad (1.30)$$

ile hesaplanır.

1.6.5. Literatür çalışmaları

Kolay şekillendirilmesi, kolay üretilmesi ve geri dönüştürülebilir olması nedeniyle termoplastik polimer malzemeler son yıllarda yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Polimer malzemelerin mekanik özelliklerinde olan kırılma tokluğu davranışı ve bu özelliğin belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemler büyük önem kazanmaktadır. Bu deneysel çalışmalardan aşağıda sırasıyla bahsedilmiştir.

Tane boyutu küçük olan dolguların yapışma yüzey alanları daha fazla olduğundan tane boyutu büyük olan dolgulara nazaran daha iyi bir etkileşim göstererek istenen özellikleri daha iyi sağladığı gözlemlenen çalışmada, tane boyutu küçüldükçe dolgunun kompozit içerisinde topaklaşma eğilimi artmakta ve homojen olmayan bir yapıya sebebiyet vermektedir. Bağlayıcı ajanlar vasıtası ile ara yüzeyler arasındaki yapışma artırılır ve dolgu partiküllerinin karışım içerisinde homojen olarak dağılımı sağlanırsa topaklaşmaların önüne geçilmiş olur ve mekanik özelliklerden kırılma tokluğu davranışı olumlu yönde geliştirilmekte ve buna bağlı olarak ta kompozitin performansı artırılabilir (Chuah ve diğ. 2000).

Üç farklı parçacık büyüklüğündeki CaCO_3 dolgulu polipropilenin mekanik özelliklerindeki değişiminin incelendiği deneyde, elastik modül ve gerilme dayanımının dolgu maddesi içeriğinin artmasıyla arttığı, dolgu maddesinin parçacık boyutunun artmasıyla ise azaldığını tespit etmişlerdir (Mitsubishi ve diğ. 1985).

Cam küre ve talk dolgusunun isotaktik ve sindiyotaktik polipropilenin mekanik ve ısıl özelliklerine etkilerini incelenen araştırmada, sindiyotaktik polipropilen ile yüksek young modülü ve gerilme dayanımı elde etmişlerdir. Artan dolgu maddesi miktarı ile de polipropilenin kristallenme derecesinin düştüğü tespit edilmiştir (Stricker ve diğ. 1997).

Talk, CaCO_3 ve kaolin dolgulu polipropilenin mekanik ve yüzeysel özelliklerini incelendiği çalışmada, dayanım ve sertlik olarak talkın diğer dolgulardan daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Talk ve CaCO_3 'ın hibrit karışımları ve tek dolgu maddesi katkılı karışımlarını da incelemişlerdir. Hibrit etkisinin olumlu olarak sonuç verdiği belirlenmiştir. Karışımlardan hazırlanan numuneler altı ay açık havada bırakılıp, çevre şartlarının etkileri de incelemişlerdir. Çevre etkisinden dolayı mekanik özelliklerin azaldığı görülmüştür. Hibrit karışımların ise diğerlerine oranla daha iyi sonuçlara sahip olduğu belirlenmiştir (Leong ve diğ. 2004).

Altıgen petek (bal peteği) yapılı kompozit levhaların eğilme davranışları incelenen çalışmada; kompozit levhaların yüzey örtüsü, polyester/cam fiberden üretilmiş olup petek hücre malzemesi olarak polyester emdirilmiş kâğıt ve alüminyum kullanılmıştır. Farklı hücre boyutlarında aynı hacme sahip petek yapılı levhalar üç nokta eğilme deneyine maruz bırakılarak hücre yoğunluğu ve petek malzemesinin eğilme dayanımına etkisi araştırılmıştır. Sonuçta levhaların eğilme dayanımı, petek hücrelerin kayma rijitlikleri ve modülü tespit edilmiştir (Solmaz ve diğ. 2010).

Sisal lifleri ile katkılanmış yüksek etkili polistiren malzemenin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada; çekme ve kırılma testleri yarı-statik ve darbe yükleme koşulları altında performansı değerlendirilmiştir. Kırılma testlerinde tüm malzemeler için kırılma yüzeyleri ile doğrusal olmayan yük-deplasman eğrileri çizilmiştir. Bu nedenle kullanılan malzemelerin kırılma davranışını karakterize etmek için lineer olmayan elastik kırılma mekaniği kullanılmıştır. Düz matrise göre %10 Sisal lifleri ile katkılanmış polistiren malzemenin kırılma tokluğu davranışının daha yüksek çıktığı gözlenmiştir (Antich ve diğ. 2006).

Enjeksiyon kalıplama yöntemiyle elde edilmiş talk dolgulu polipropilen malzemenin kırılma davranışının incelendiği çalışmada, hacimce % 0-20 aralığında katkılanılan polipropilen malzeme, katkılanılmamış polipropilen malzeme ile karşılatırılmıştır. Deneyler için lineer elastik kırılma mekaniği (LEFM) numuneleri hazırlanmış ve kırılma tokluğu özelliklerinden K ve G parametrelerinin, talk ile dolgulandırılmanın polipropilen malzeme üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak akma dayanımının arttığı gözlenmiştir. Tüm sonuçlar morfolojik ve mikroyapısal yönden yorumlanarak açıklanmıştır (Velasco ve diğ. 1997).

Plastik malzemelerin kırılma tokluğu ölçümlerinde, tek kenar çentikli eğme (SENB) idaelidir, fakat termoset reçinelerin için çatlak başlatma özünde zor bir işlemdir. Bu problemin incelendiği çalışmada SENB numunelerinde çatlak standartlara uygun olarak oluşturulmuştur ve elde edilen kırılma tokluğu değerlerin doğru ve tekrarlanabilir olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar ve geliştirilen yöntem, kırılğan termoset kırılma tokluğu testleri için klavuz görevindedir (Ma, Bayley ve diğ. 2007).

İzoaktik polipropilen ve ağırlıkça %15 etilen içeren polipropilen kauçuk malzemenin; kompakt test numunelerinin; 0,1 mm/sn ve 14 mm/sn aralığında değişen test hızlarında yapılan deneylerde sünek- gevrek geçişinde test hızıyla olan ilişkisi gözlemlenmiştir (Gensler, Plummer ve diğ. 2000).

Termoplastik polimer malzemenin, kompakt test numunesinde, numune kalınlığının ve test sıcaklığının kırılma tokluğu davranışına olan etkisinin incelendiği çalışmada ortam sıcaklığında 5mm ‘den daha büyük kalınlıkta ki numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları gösteriyor ki, kırılma tokluğu parametrelerinden olan K_{1c} ve G_{1c} değerleri bu kalınlığının üstündeki değerler için bağımsızdır. Diğer taraftan kırılma sertliği sıcaklığa duyarlıdır. Çalışmada G_{1c} değerinin sıcaklığa bağımlılığı, plastik defrosmasyonun meydana geldiği çatlak ucunda ve kırılma yüzey morfolojisinde görülmektedir (Kım, Ye, 2004).

Polibütenin iki farklı derecedeki DCB ve SENB numnuneleri üzerinde farklı sıcaklık ve test hızında kırılma performansı incelenen çalışmada kırılma ilerleyişi optik metodlar yardımıyla kaydedilmiştir. Yapılan testlerin sonuçları kırılma mekaniği çerçevesinde yorumlanmıştır; zaman-sıcaklık süperpozisyonu çatlağını tanımlamak için bir analiz modeli hazırlanmıştır. Bu analiz modeli uygulanarak deneysel kırılma verilerinden, basınçlı boruların ömrü tahmin edilebilmiştir (Andena ve diğ. 2009).

Çift vidalı ekstrüder ile birleştirilen nano-CaCO₃ ve polistirenin uzama ve kompakt çekme testleri gösteriyor ki polistirenin dayanımı ve tokluğu nano-CaCO₃ parçacıkların eklenmesiyle azalmıştır. Kırılma yüzey analizi gösteriyor ki arayüzey ayrılması ve nano dolgu agloramesyon kusurları dayanımda ve toklukta meydana gelen azalmayı açıklamaktadır (Gao ve diğ. 2009).

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Kullanılan Malzeme

Bu çalışmada enjeksiyon ile üç farklı erime akış indeksine sahip homopolimer kullanılmıştır. Ekstrüzyon yöntemi için nihai ürün olan boru imalatı içinde polipropilen random kopolimer malzeme seçilmiştir. Seçilen polipropilen malzemeler farklı tane boyularında eleme yapılarak polipropilen malzemelerle dolgulandırılmıştır. Ayrıca polipropilen malzemedeki kullanılan geleneksel dolgu malzemelerinde (kalsiyum karbonat ve talk) malzemeye katkıda bulunduğu özelliklerde düşünülerek öğütülmüş kolemanit ile birlikte talk ve kalsiyum karbonat malzemelerle dolgulandırılma yapılmıştır.

2.1.1. Polipropilen malzemeler

2.1.1.1. Homopolimer

Resin malzeme olarak Basell firmasının ürünü Moplen HP500N polipropilen homopolimeri, Hellenic Petroleum firmasının ürünü ECOLEN HZ10K polipropilen homopolimeri ve Petkim firmasının ürünü olan PETOPLN MH 418 polipropilen homopolimeri de yerli ürün olarak kullanılmıştır.

Moplen HP500N ürün isimli ve kodlu polipropilen homopolimerin Tablo 2.1’de, ECOLEN HZ10K ürün isimli ve kodlu polipropilen homopolimerin Tablo 2.2’de ve PETOPLN MH 418 ürün isimli ve kodlu polipropilen homopolimerin Tablo 2.3’de, fiziksel ve mekanik özelliklerine ait üretici verileri görülmektedir.

Tablo 2.1. Moplen HP500N polipropilen homopolimere ait üretici verileri

Kimyasal Özellikler	Fiziksel Özellikler
Yoğunluk	0,9 g/cm ³
MFR, (230 °C/2,16kg)	12 g/10 dk.
Eğme modülü	1450 MPa
Akma Gerilmesi	33Mpa
İzod Darbe Dayanımı, (23°C)	

Tablo 2.2. ECOLEN HZ10K polipropilen homopolimere ait üretici verileri

Kimyasal Özellikler	Fiziksel Özellikler
Yoğunluk	0,9 g/cm ³
MFR, (230 °C/2,16 kg)	3,2 g/10 dk.
Eğme modülü	1450 MPa
Akma Gerilmesi	34 MPa
Kopma Uzası	% 13
İzod Darbe Dayanımı, (23°C)	45 kJ/m ²

Tablo 2.3. PETOPLN MH 418 polipropilen homopolimere ait üretici verileri

Kimyasal Özellikler	Fiziksel Özellikler
MFR, (230 °C/2,16 kg)	5 g/10 dk.
Akma Gerilmesi	43 MPa
Kopma Gerilmesi	35MPa

2.1.1.2. Random kopolimer

Resin malzeme olarak Borealis firmasının ürünü olan ve ürün adı ve kodu RA130E polipropilen random kopolimer Tablo 2.4 ile Sabic (Saudi Basic Industries Corporation) firmasının ürünü olan ve ürün adı ve kodu Vestolen P 9421 Tablo 2.5 polipropilen random kopolimer hammaddeleri kullanılmıştır.

Tablo 2.4. RAE130E polipropilen random kopolimer ait üretici verileri

Kimyasal Özellikler	Fiziksel Özellikler
Yoğunluk	0,905 g/cm ³
MFI, (230 °C/2,16kg)	0,25 g/10 dk.
Eğme Modülü	800 Mpa
Çekme Modülü	900 Mpa
Akma Gerilmesi	25 Mpa
Akma Uzası	% 13,5
Charpy Darbe Dayanımı	0°C'de 3,5 kJ/m ² 23° C'de 20 kJ/m ²

Tablo 2.5. Vestolen P 9421 polipropilen random kopolimere ait üretici verileri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
Yoğunluk		0,898 g/cm ³	
MFI, (190 °C/5kg)		0,5 g/10 dk.	
Eğme Modülü		800 Mpa	
Çekme Modülü		900 Mpa	
Akma Gerilmesi		27 Mpa	
Kopma Gerilmesi		32 Mpa	
Kopma Uzaması		% 50	
Charpy Darbe Dayanımı (23° C)		25 kJ/m ²	23° C’de 20 kJ/m ²

2.1.2. Öğütülmüş kolemanit bor maddesi

Öğütülmüş kolemanit bor maddesi Eti Maden Bigadiç tesislerinden Elek altı 75 mikron olarak temin edilebilmiştir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.6.’da gösterilmiştir.

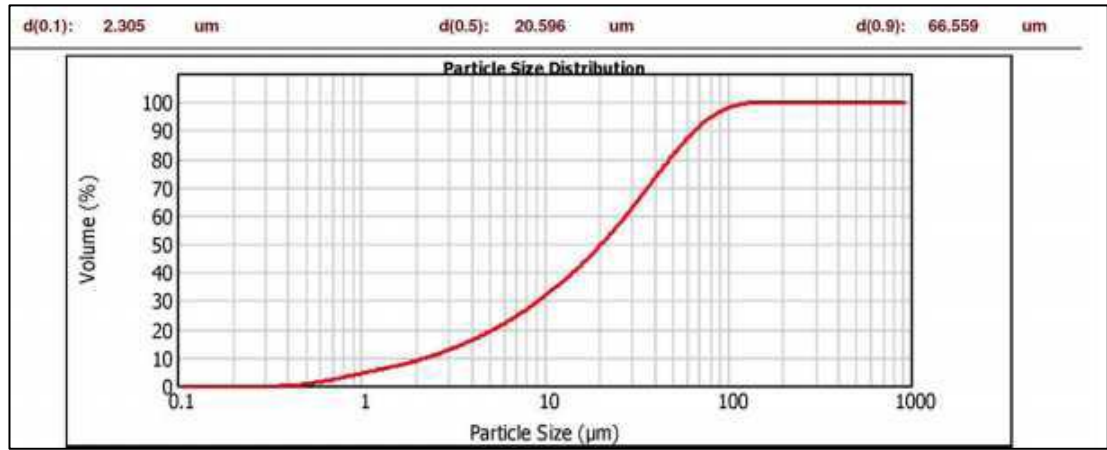
Tablo 2.6. Kolemanit bor maddesi özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
B ₂ O ₃	% 40	Özgül Ağırlık	0,80-1,00 ton/m ³
CaO	% 27	Birim Hacim Ağırlığı	1.02 gr/cm ³
SiO ₂	% 6,5	Partikül Boyutu	Ortalama Tane Boyu 20,596 µm
SO ₄	% 0,5	Partikül Boyutu	
Al ₂ O ₃	% 0,4	+600 µm	0,02
MgO	% 3	+250 µm	0,5
SiO	% 1,5	-75µm	87
As	35 (ppm)	-45µm	75

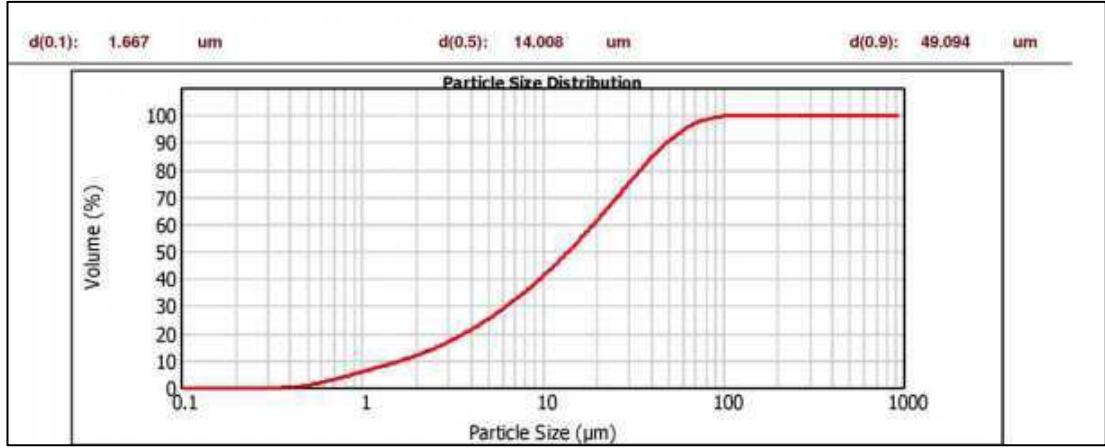
Tüm çalışmada kullanılan öğütülmüş kolemanit malzemelerin tane büyüklüğü dağılımları Şekil 2.1-6’da verilmektedir. Elek altı 75 µm ve 45 µm olan malzemeler

Biğadiç tesisinde hazırlanmıştır. Elek altı 75 μm öğütülmüş kolemanitten elek altı 38 μm ve 28 μm , elek altı 45 μm öğütülmüş kolemanitten ise 10 μm olan kolemanit malzemeler Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan laboratuvarlarında elenerek (kuru eleme ile) elde edilmiştir. Fakat elek altı 20 μm olan kolemanit malzeme için MTA/Ankara laboratuvarlarından hizmet alımı yapılmış olup elek altı 45 μm öğütülmüş kolemanitten sulu eleme ile elde edilebilmiştir. Sulu eleme sonucunda elde edilen kolemanit hammaddesi aşırı su emme özelliğinden dolayı kaya haline gelmiştir ve MTA' dan proje ekibine kaya halinde gönderilmiştir. Elek altı 20 μm olarak elde edilen bu ürünün kullanılabilmesi için tekrar öğütme işlemi laboratuvar koşullarında yapılmıştır. Fakat tane boyutu analizinde de görüldüğü gibi bu yöntemle yapılan eleme kolemanit hammaddesinin topaklanmasına sebep olmuştur. Elek altı 20 μm tane boyutlu kolemanit malzemenin ortalama tane boyutu elek altı 28 μm tane boyutlu kolemanit malzemedan daha büyük çıkmıştır.

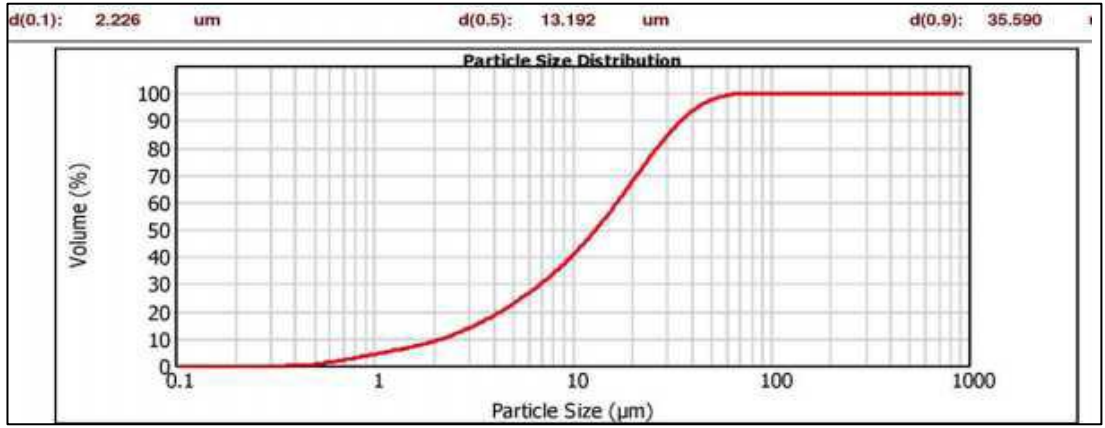
Tüm öğütülmüş kolemanit malzemelerin tane boyu analizleri Eti Maden Biğadiç tesislerinde ölçülmüştür.



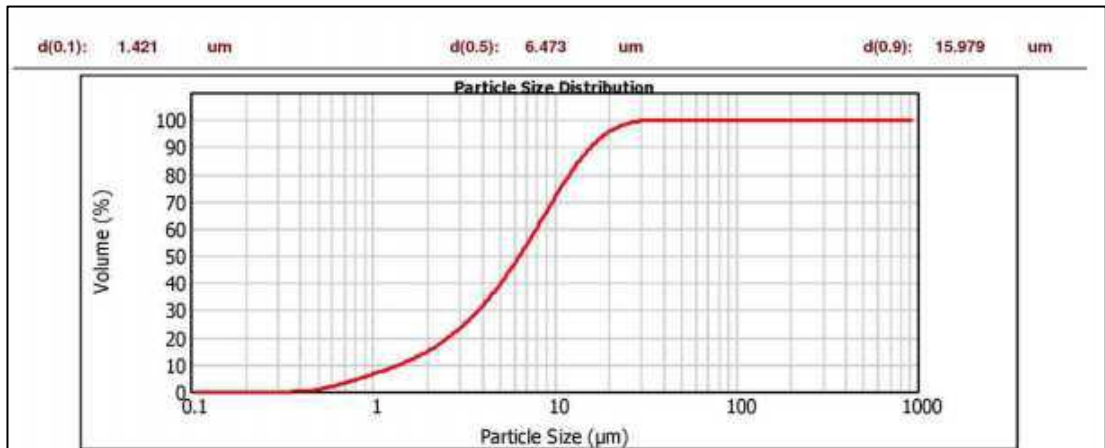
Şekil 2.1. Elek altı 75 μm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Biğadiç)



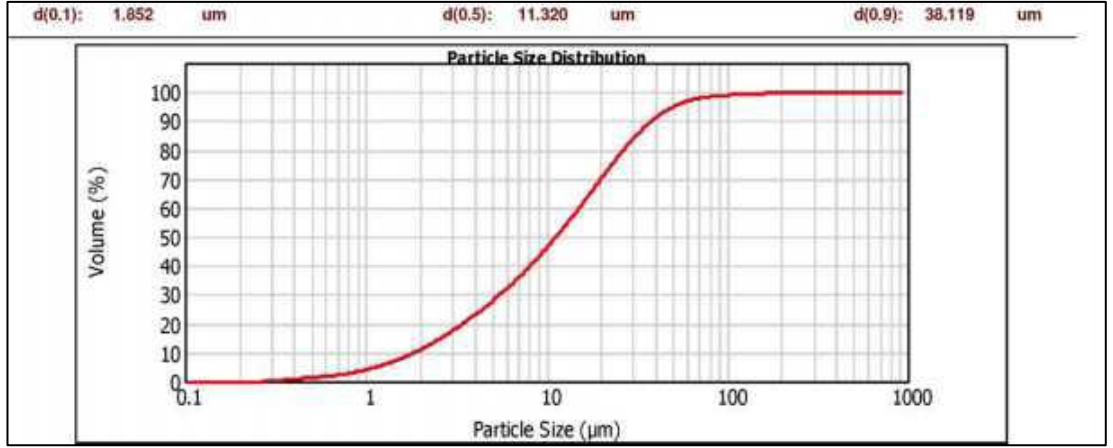
Şekil 2.2. Elek altı 45 µm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Bigadiç)



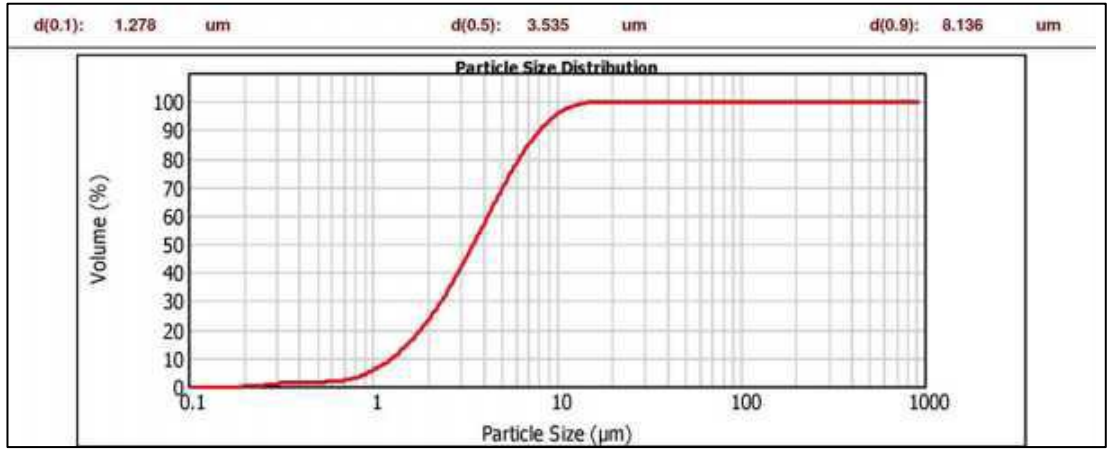
Şekil 2.3. Elek altı 38 µm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Bigadiç)



Şekil 2.4. Elek altı 28 µm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Bigadiç)



Şekil 2.5. Elek altı 20 µm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Bigadiç)



Şekil 2.6. Elek altı 10 µm olan öğütülmüş kolemanitin tane boyu analizi (Eti-Maden Bigadiç)

2.1.3. Mikronize toz kalsiyum karbonat maddesi

Yüksek saflıkta beyaz mermerden elde edilen, doğal, yüzeyi kaplanmış, çok ince, çok kolay dağılan kalsiyum karbonat (kalsit) tozu kullanılmıştır. Omya Madencilik A.Ş. firmasının ürün adı ve ürün kodu OMYACARB 3T-KA olan kalsit mineralinin bazı fiziksel özelliklerine ait üretici verileri Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7. Mikronize toz kalsiyum karbonat maddesine ait üretici verileri

	Test Metodu	Birim Sistemi	Omyacarb 3T-KA
Ortalama tane boyu (d50)	ISO 787-7	µm	3
En büyük tane (d98)	ISO 787-7	µm	16
2 µm altı tanecikler	ISO 787-7	%	39
Parlaklık (Ry, C/2°)	DIN 53163	%	95
Yağ emme oranı	ISO 787-5	g/100g	14
Fabrika Çıkış Nem	ISO 787-2	%	0,3 (kaplı)
pH değeri	ISO 787-9	-	9,5
45 µm elek bakiyesi	ISO 787-7	%	0,1

2.1.4. Mikronize pudra talk maddesi

Türkiye’de, hem plastik sektörüne mikronize pudra talk maddesi temin (sevk) eden hemde ilgili sektörde mikronize pudra talk maddesini yarı mamül ve/veya mamül üretimlerinde katkı ve/veya dolgu maddesi olarak tercih eden firmaların yetkililerinin önerileri de dikkate alınarak, Mondo Minerals OY firmasının Finntalc M05SL kodlu ve isimli mikronize pudra talk maddesi kullanılmıştır. Mikronize pudra talk mineralinin bazı fiziksel özelliklerine ait üretici verileri Tablo 2.8’de bir araya getirilmiştir.

Tablo 2.8. Mikronize pudra talk maddesine ait üretici verileri

	Test Metodu	Birim Sistemi	Finntalc M05SL
Yoğunluk	ISO 787-10	g/cm ³	2,75
Ortalama tane boyu (d50)	ISO 787-7	µm	2
En büyük tane (d98)	ISO 787-7	µm	15
2 µm altı tanecikler	ISO 787-7	%	50
Parlaklık (Ry, C/2°)	DIN 53163	%	90
Yağ emme oranı	ISO 787-5	g/100g	50
Fabrika Çıkış Nem	ISO 787-2	%	0,2
pH değeri	ISO 787-9	-	9,1

2.1.5. Kaydırıcı wax maddesi

Bu çalışmada hem bilhassa poliolefin borular için iyi bir yağlayıcı ve yüzey parlaklığı sağlayıcı görevi gördüğü için hemde homopolimerlerde partikül dağılımına faydalı olabileceğinden, teknik özellikleri Tablo 2.9’da verilen, polietilen (PE) temelli PE Wax kullanılmıştır.

Tablo 2.9. Kaydırıcı PE - Wax maddesine ait üretici verileri

	Birim Sistemi	PE-Wax
Yapı	-	$n_{av}=700$ (daha az moleküler polimer)
Görünüş	-	Beyaz -toz
Erime Sıcaklığı	°C	95-105
Hacim yoğunluğu	kg/cm ³	490 ± 20
Asit İndeksi	%	0,00
Soap indeksi	g/100g	0,00

2.1.6. Maleik anhidrit

Polipropilen ile dolgu veya katkı maddelerin arayüzeyini modifiye etmek için literatürdeki çalışmalar (Doufnoune ve diğ., 2005) incelenerek Maleik Anhidrit (Maleic Anhydride) kullanılması uygun görülmüştür.

Polydram Ram On firmasından ticari ismi Bondyram 1001 olan maleik anhidrit malzemesi polipropilen malzeme ile kolemanit madde arayüzeyini iyileştirici malzeme olarak kullanılmıştır. Bondyram 1001 ticari isimli maleik anhidrit malzemesine ait üretici verileri (Tablo 2.10)’de verilmektedir.

Tablo 2.10. Maleik anhidrit maddesine ait üretici verileri

	Test Metodu	Birim Sistemi	Bondyram 1001
Yoğunluk	ISO 1183	g/cm ³	0,9
MFI (190 °C/2,19kg)	ISO 1133	g/10 dk	100
Erime Sıcaklığı	DSC	°C	160
Maleik anhidrit	FTIR	%	1

2.1.7. Öğütülmüş kolemanit bor maddesi kaplama malzemeleri

Öğütülmüş Kolemanit bor maddesinin çalışmada kullandığımız polipropilen malzeme ile daha iyi bir ara yüzey oluşturması ve kolemanitin üretimden kaynaklanan soğutma suyundan etkilenmemesi için yüzeyin kaplanması gerektiği düşünülmüştür. Literatürde polipropilen malzemeyi dolgulandırmada kullanılan malzemelerin yüzeyi modifiye edildiğinde daha iyi bir üretim kolaylığı ve daha iyi mekanik özellikler elde edildiği görülmüştür.

Daha önce kolemanit ile yapılmış böyle bir çalışma olmadığı belirtilmiştir. Bu yüzden polipropilen malzemede kullanılan konvansiyel dolgu malzemelerinde esinlenilerek ara yüzey çalışması için Kocaeli Üniversitesinin laboratuvarları imkanları düşünülerek malzeme seçilmiştir (Kalsiyum Stearat) ve ön denemeleri yapılmıştır.

Kalsiyum stearat için kaplama yapıp yapılmadığı Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Laboratuvarlarında bulunan Shimadzu marka UV-2450 Uv Vis model Spectrophotometer ile belirlenmiştir. Fakat silanlama yapılmış numuneler için ODTÜ merkez laboratuvarında elektron Spektroskopisi (ESCA) analizi genel tarama yapılmıştır.

Kalsiyum stearat (Ca-Stearat) hidrofobik etkiye sahipken aynı zamanda iç yağlayıcı olarakta kullanılan ve tüm kauçuk ve plastik malzemeler için uyumlu olan bir malzeme olarak bilinmektedir. Bu nedenle öğütülmüş kolemanitlere hidrofobik özellik kazandırabilmek ve/veya kazandırmak amacıyla öğütülmüş kolemanitler, bazı üretici verileri Tablo 2.11’de görülebilen ve Tepe Kimya firması ürünü olan CA-30 ticari isimli Ca-Stearat malzemesi ile modifiye edilmeye çalışılmıştır ve/veya edilmiştir (kaplanmıştır).

Tablo 2.11. Kalsiyum stearat malzemesine ait üretici verileri

	Birim Sistemi	CA -30
Kalsiyum içeriği	%	7
Serbest yağ asidi	%	0,5’ den küçük
Erime noktası	°C	135
Kül miktarı	%	10

Öğütölmüş kolemanit maddesinin Ca-Stearat ile modifiye edilmesi (kaplanması) çalışmalarının ilk aşamasında, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından Balıkesir- Bigadiç maden sahasından büyük çuval (big bag) içinde yaklaşık 500 kg olarak gönderilen elek altı 45 µm partiköl ölçekli öğütölmüş kolemanit maddesinin yüksek nem ihtiva ettiğı (nemli olduğı) tespit edilmiştir. Bu tespit, öğütölmüş kolemanit maddesinin de kullanılan kalsit ve talk gibi geleneksel katkı ve dolgu maddeleri gibi hidrofobik özelliğıne sahip olmadığının bilakis aşırı nem absorbe etme kabiliyetine sahip olduğunun anlaşılmasına sebep olmuştur.

Bu nedenle öğütölmüş kolemanit ile yapılan ön çalışmalardan sonra, en az 10 kg en fazla 20 kg partilerdeki öğütölmüş kolemanit, Ca-Stearat ile modifiye (kaplama) işleminden önce, en az 100°C’de 2 saat en fazla 80°C’de 4 saatlik periyotlarda, nem alma ve/veya kurutma fırınında kurutma (nem alma) işlemine tabi tutulmalıdır ve/veya tutulmuştur. Akabinde hemen öğütölmüş kolemanit yüzey sıcaklığını ve/veya ısı yükünü kaybetmeden, yüksek dönme devrine sahip olmayan paletli bir karıştırıcıya aktarılmalıdır ve/veya aktarılmıştır. Yüzey sıcaklığını (ısı yükünü) koruyan öğütölmüş kolemanit maddesinin üzerine ilk denemede ağırlıkça yüzde 2 miktarında Ca-stearat serpilmiştir.

Karışım, en az 45°C karışım ortamı sıcaklığında en az 60 dakika ve en fazla 65°C karışım ortamı sıcaklığında ise en fazla 30 dakika karıştırılmalıdır ve/veya karıştırılmıştır. Karışım odası sıcaklığına (veya ısı yüküne) halen sahip olan ve bu şekilde yüzeyleri ve bu ağırlıkça yüzde 2 miktarında Ca-Stearat kaplanmış öğütölmüş kolemanit maddesi kullanılarak gerçekleştirilen PP/kolemanit kompozit hammadde üretiminde, üretim sonrası hammadde granüllerinin nemli (ıslak) elde edilebildiğı ve/veya edildiğı görölmüştür. Diğer bir ifadeyle bu işlem sıralı yöntemle, ağırlıkça yüzde 2 miktarındaki Ca-Stearat maddesiyle öğütölmüş kolemanit maddeleri modifiye edilememiştir (kaplanamamıştır).

Dolayısıyla, ikinci denemede aynı işlem sırasında ve şartlarında öğütölmüş kolemanit, ağırlıkça yüzde 7 miktarında Ca-Stearat ile modifiye edilmiştir (kaplanmıştır). Ağırlıkça yüzde 7 miktarında Ca-Stearat kaplı kolemanit maddesi kullanılarak gerçekleştirilen PP/kolemanit kompozit hammadde üretiminde, üretim

sonrası hammadde granüllerinin yine ancak ağırlıkça yüzde 2 Ca-Stearat ile kaplanmışlarla elde edilenlere göre daha az nemli (ıslak) olduğu görülmüştür.

Bundan dolayıdır ki, üçüncü denemede ise aynı işlem sırasında ve şartlarında öğütülmüş kolemanit, ağırlıkça yüzde 13 miktarında Ca-Stearat ile modifiye edilmiştir (kaplanmıştır). Bu sefer, PP/kolemanit kompozit hammadde granüllerinin nemsiz (kuruya yakın) şekilde üretilebileceği ve/veya üretildiği tespit edilmiştir. Burada anlatım kolaylığı açısından tercih edilerek kullanılan nemli (ıslak) kelimesinin kast (ifade) etmek istediği mana, nemin (ıslaklığın) hem dış yüzeyde hemde iç yüzeyde olabileceğine işaret etmektir.

2.2. Harmanlama ve Deney Numunesi Üretimi

2.2.1. Hammaddelerin üretimi

Mikronize taneli madde ilaveli PP esaslı kompozit hammaddesi üretimlerinde, Bursa’da yerleşik EMAŞ Plastik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi bünyesinde bulunan ve teknik özellikleri Tablo 2.12’ te verilen, Werner and Pfleiderer firması ürünü olan COPERION Marka ve ZSK 25 P8.2 E WLE model düşük kapasiteli birbirine paralel dönen çift vidalı ekstrüzyon makinesi kullanılmıştır.

Tablo 2.12. Çift vidalı ekstrudere ait teknik bilgiler (EMAŞ, 2007)

Makine Adı	Coperion ZSK 25 P8.2 E WLE
L/D	45
Burgu boyu (L)	1125 mm
Isıtma Zone (bölge) sayısı	10 Adet
Soğutma Şekli	Fitil Soğutma

Ağırlıkça farklı yüzde dolgu miktarlarına ve farklı tane boylarına göre yapılan kompozit üretimi sürekli (kesintisiz) üretim şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, homojen bir karışım elde edilebilmesi için kompozit karışımlarının ilk 3 kilogramlık miktarlarından sonra hammadde alınmıştır.

Hem çift vidalı hemde tek vidalı ekstrüzyon üretimlerinden ve ayrıca enjeksiyon kalıplama yönteminden doğabilecek, üretim ve/veya şekillendirme parametrelerinin

etkisi dikkate alınarak, sürekli üretim esnasında aynı üretim ve/veya şekillendirme parametrelerinin kullanılmasına azami özen gösterilmiştir.

2.2.2. Deney numunesi üretimi

Granül haldeki PP malzemeler, TSE'nin TS 1149-1 (1978) numaralı standardı dikkate alınarak, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle ilgili deneylere ait deney numuneleri üretilmiştir.

Enjeksiyon numunelerinden ISO 13856 (2003) numaralı standarta uygun olarak üç nokta eğme deney numuneleri ve kompakt çekme numuneleri elde edilmiştir.

2.2.2.1. Enjeksiyon kalıplama ile deney numunelerinin hazırlanması

Enjeksiyon numunelerinin üretiminde hem Bursa'da yerleşik EMAŞ Plastik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi bünyesinde bulunan ve teknik özellikleri Tablo 2.13'de verilen, ARBURG ALLROUNDER Enjeksiyon makineleri firmasına ait 370 CMD Model Enjeksiyon Makinesi hemde İstanbul'da yerleşik AKSU TOST Makinaları Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi bünyesinde bulunan ve teknik özellikleri Tablo 2.14'de verilen, HAITIAN PLASTICS MACHINERY Enjeksiyon makineleri firmasına ait HTF 90W Model Enjeksiyon Makinesi kullanılmıştır.

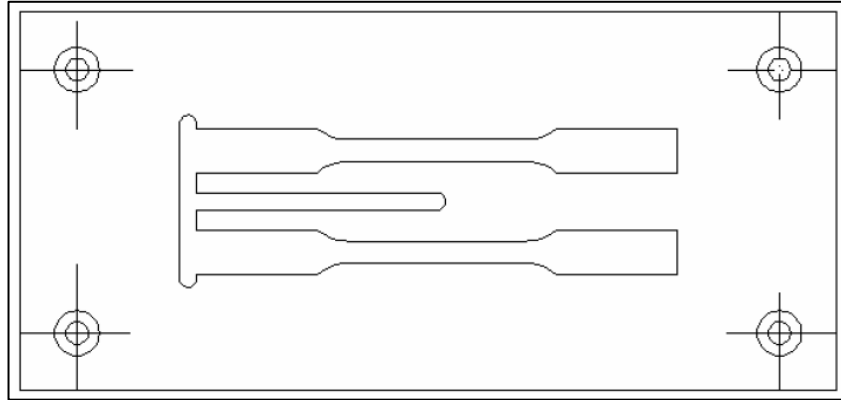
Tablo 2.13. ALLROUNDER 370 CMD model enjeksiyon makinesinin teknik özellikleri (ARBURG, 2007)

Enjeksiyon Ünitesi	Birim Sistemi	Boyutları
Vida çapı	mm	20 / 25 / 30
Etkili vida uzunluğu	L / D	25 / 20 / 16,7
Vida hızı	devir / dk	42 / 52 / 63
Vida stroku (max.)	mm	100
Maksimum enjeksiyon hacmi	cm ³	31 / 49 / 70
Spesifik enjeksiyon basıncı	kg /cm ²	2500 / 2240 / 1550
Enjeksiyon meme dayanma	kN	50
Eritme kapasitesi	kg / sa	5,5 / 8 / 9,5
Isıtma gücü	kW	4,3
Isıtma bölgesi	Bölge	4

Tablo 2.14. HTF90W (MA900/300) model enjeksiyon makinesinin teknik özellikleri (HAITIAN, 2007)

Enjeksiyon Ünitesi	Birim Sistemi	Boyutları
Vida çapı	mm	36
Etkili vida uzunluğu	L / D	20
Vida hızı	devir / dk	295
Vida stroku (max.)	mm	100
Maksimum enjeksiyon hacmi	cm ³	153
Spesifik enjeksiyon basıncı	MPa	197
Enjeksiyon meme dayanma kuvveti	kN	900
Eritme kapasitesi	kg / sa	12,6
Isıtma gücü	kW	6,2
Isıtma bölgesi	Bölge	4

Ön görünüşü Şekil 2.7’de verilen kalıba, Naturel PP hammaddeleri Tablo 2.13 ve 2.15’de ve katkılandırılmış PP hammaddeleri Tablo 2.14 ve 2.16’de verilen enjeksiyon ayarlarında ve kalıp soğutma suyu sıcaklıklarında iki adet çekme numunesinden oluşan çok amaçlı deney parçası grubuna basılmıştır.



Şekil 2.7. Enjeksiyon kalıbının önden görünüşü

Tablo 2.15. Deney numunesi üretiminde kullanılan enjeksiyon ayarları ile soğutma suyu sıcaklıkları (ALLROUNDER 370 CMD)

Üretim	Meme	1. Bölge	2. Bölge	3.Bölge	4.Bölge
Sıcaklık [°C]	225 ⁺⁵	225 ⁺⁵	220 ⁺⁵	220 ⁺⁵	215 ⁺⁵
Basınç ve hızlar	Enjeksiyon	Ütüleme Bas. (bar)			Ütüleme Hızı
	1450 bar	1	2	3	Enjeksiyon Hızı
		650	575	350	6 m /s
Bekleme	60 s	Soğutma Suyu Sıcaklığı			30 ° C

Tablo 2.16. Deney numunesi üretiminde kullanılan enjeksiyon ayarları ile soğutma suyu sıcaklıkları (HTF90W MA900/300)

Üretim	Meme	1. Bölge	2. Bölge	3.Bölge	4.Bölge	
Sıcaklık [°C]	235 ⁺⁵	235 ⁺⁵	230 ⁺⁵	225 ⁺⁵	220 ⁺⁵	
Basınç ve hızlar	Enjeksiyon	Ütüleme Bas. (bar)		Ütüleme Hızı	Enjeksiyon Hızı	
	1400 bar	1	2	5m /dak. ~ 12m/dak.	1	2
		700	500		45 m/dak	20 m/dak
Bekleme	60 s	Soğutma Suyu Sıcaklığı			30°C	

Ön görünüşü Şekil 2.7’de verilen kalıba, Naturel PP hammaddeleri Tablo 2.13 ve 2.15’de ve katkılandırılmış PP hammaddeleri Tablo 2.14 ve 2.16’de verilen enjeksiyon ayarlarında ve kalıp soğutma suyu sıcaklıklarında iki adet çekme numunesinden oluşan çok amaçlı deney parçası grubuna basılmıştır.

Deney numunelerinin şartlandırılması kısmen TS 720 (1999) numaralı standardında belirtilen şekli ile yapılmıştır. Numuneler üretildikten sonra uygun boyutlarda poşetlere yerleştirilip konfor şartlarında depolanmıştır

2.2.2.2. Deney numunelerinin kodlanması

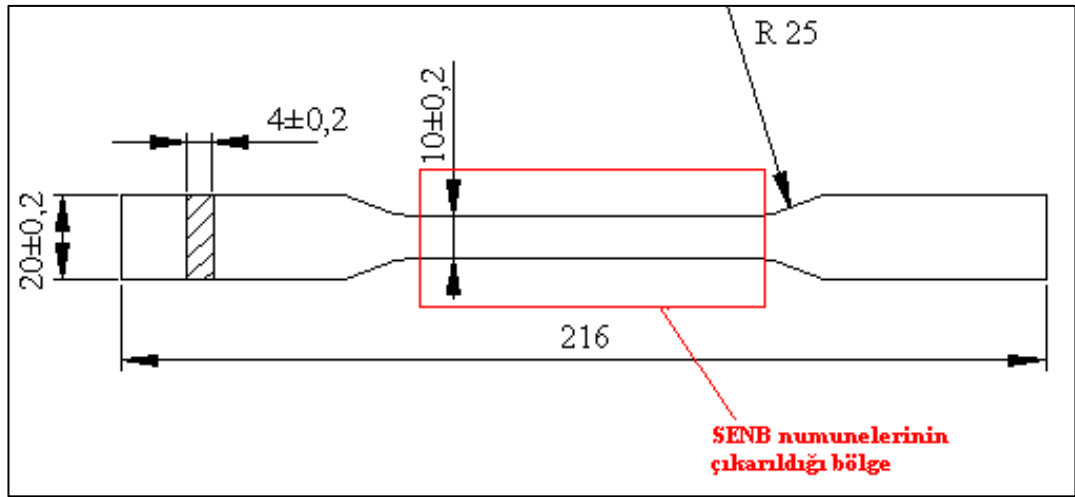
Tablo 2.17. Polipropilen random kopolimer, Polipropilen homopolimer, kolemanit, talk, kalsit hibrit kompozit miktarları

İsimlendirme	Tane Boyutu (μm)	Kolemanit (%)	Talk (%)	CaCO ₃ (%)	PE-Wax (%)	Maleik- anhidrit (%)
PHE12	45	10,00	-	20,00	-	-
PH13	45	10,00	-	20,00	-	-
PHPN	45	-	-	-	-	-
PPR (Nat)	38	-	-	-	-	-
PRS11	45	10,00	5,50	-	-	-
PRSN	45	-	-	-	-	-
PRSNB	45	-	-	-	-	2,00
PRSK4520	45	20,00	0,00	0,00	1,00	2,00
PRSKT45155	45	15,00	5,00	0,00	1,00	2,00
PRSKT45127	45	12,50	7,50	0,00	1,00	2,00
PRSKT451010	45	10,00	10,00	0,00	1,00	2,00
PRSKT45020	45	0,00	20,00	0,00	1,00	2,00
PRSKT4520	45	10,00	7,00	0,00	1,00	2,00
PRSKT2020	20	10,00	7,00	0,00	1,00	2,00
PRSKT1020	10	10,00	7,00	0,00	1,00	2,00
PPH6	45	30,00	-	0,00	1,00	-
PPH7	45	20,00	-	10,00	1,00	-
PPH8	45	10,00	-	20,00	1,00	-
PPH9	45	15,00	-	15,00	1,00	-
PPH10	45	0,00	-	30,00	1,00	-
PHEKK4535	45	35,00	-	-	1,00	-
PHEKK2035	20	35,00	-	-	1,00	-
PHEKK1035	10	35,00	-	-	1,00	-
PPR38B5	38	5,00	-	-	-	2,00
PPR38B10	38	10,00	-	-	-	2,00
PPR38B12	38	12,50	-	-	-	2,00
PHEB4510	45	10,00	-	-	-	2,00
PHEB4515	45	15,00	-	-	-	2,00
PHEB4517	45	17,50	-	-	-	2,00
PHEB4520	45	20,00	-	-	-	2,00

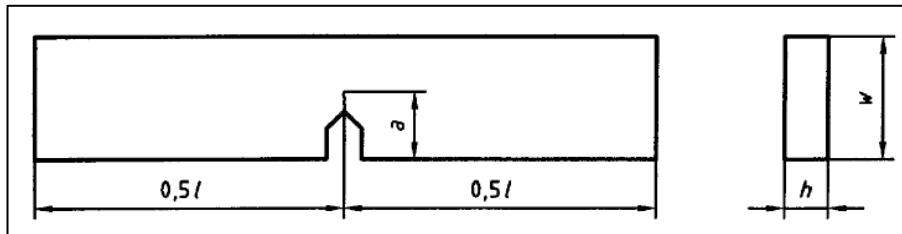
2.3. Deney Şartları, Araçlar, Makineler ve Donanımlar

2.3.1. Üç nokta eğme deneyi ve numunesi

TS 1398-2 (1997) veya ISO 527-2 (1993) standartlarına göre üretilen çekme numunelerinden üç nokta eğme deneyi için yine ISO 13586 standartında bir aralık içinde belirtilen ölçülerde numuneler çıkarılmıştır. SENB numunelerinin çıkarıldığı çekme numunesi ve numune çıkarılan bölge Şekil 2.8 gösterilmiştir. Bu numunelerin boyutları 80x10x4 mm olarak belirlenmesinde referans alınan SENB ölçülerinin ifadesi (Şekil 1.2) gösterilmiştir. Numunelerin çentikleri orta noktadan 5mm olarak freze tezgahında açılmıştır. Her dolgu miktarı için 5'er numune hazırlanmıştır.



Şekil 2.8. Çekme numunesi üzerinden SENB numunesi çıkarılan bölge



Şekil 2.9. Üç nokta eğme (SENB) numunesi ölçülerinin belirlenmesi

W :Test numunesinin eni

l :Test numunesinin uzunluğu $l > 4,2W$

h :Test numunesinin kalınlığı $W/4 < h < W/2$

a : Test numunesinin çentik derinliği $0,45W \leq a \leq 0,55W$

Üç nokta eğme testleri Instron 4411 çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar hafızasında bulunan Seri IX Otomatik Testleri Sistemi' nin (Series IX Automated Materials Testing Systems) 5.34.00 versiyonlu programı ile bilgisayar klavyesinden kumanda edilen cihaz, test süresince kuvvette ve sehim miktarında meydana gelen değişimleri saniyede 20 değer algılayarak hafızasına kaydetmektedir. Eğme test ekipmanının span aralığı 40 mm, test hızı 10 mm/min ve travel 12mm olarak belirlenmiş ve test sırasında kuvvet ve ilerlemedeki değişimler kaydedilmiştir.

Test sonuçlarından elde edilen datalar Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği (LEFM) kriterlerine uygun olarak değerlendirilmiş ve ISO 13586 standartında belirten formüller kullanılarak malzemenin kırılma tokluğu verileri olan (K_C)'ye Denklem (2.1)'den ve (G_c)'ye Denklem (2.4)'ten ulaşılmıştır.

$$K_C = \frac{FL4B}{BW^{3/2}} f(a/W) \quad (2.1)$$

Burada;

$$f(a/W) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{0,5} \left[1,99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 3,93\left(\frac{a}{W}\right) + 2,7\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right) \right]}{2\left(1 + 2\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{0,5}} \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanır. Burada $0.4 \leq a/W \leq 0.6$ sağlaması koşulu ile gerilme şiddeti faktörü:

$$K_I = 3,75 \frac{FW}{B(W-a)} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3) ile bulunur.

F : Test sırasında ulaşılan maksimum yük

B : Test numunesinin kalınlığı

W : Test numunesinin genişliği

a : Çentik derinliği

$f(a/W)$: Çentik derinliği a'ya göre değişen geometri düzeltme faktörü; $\alpha=(a/W)$ değeri olarak alınmıştır.

$$G_c = \frac{WB}{hw\phi(a/W)} \quad (2.4)$$

Bu eşitlikte;

W_B : Kırılma enerjisi

h : Test numunesinin kalınlığı

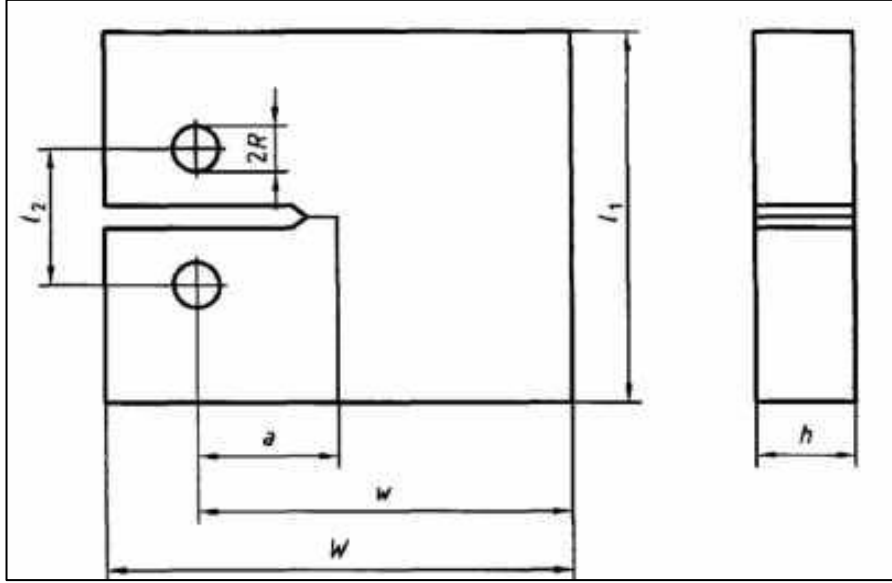
w : Test numunesinin genişliği

$\phi(a/W)$: Çentik derinliği a'ya göre değişen enerji düzeltme faktörü

Mineral partikül dolgulu enjeksiyon kalıplanmış plastik malzemeler için uygulanabilecek her hangi bir standart bulunmadığından, bu çalışmada kırılma tokluğu (K_C) ve (G_c) hesaplamalarında dolgusuz plastikler için ISO 13586'da belirtilen formüller üzerinden gidilmiş ancak F_Q olarak üç nokta eğme testi ile elde edilen F_{max} değeri (malzemede akma görüldüğü anda uygulanan yük) kullanılmıştır.

2.3.2. Kompakt çekme deneyi ve numunesi

Kırılma mekaniği ile malzeme hakkında alternatif yararlı bilgiler elde edilebilir. kırılma mekaniği testleri ile laboratuvar ortamında malzemenin kırılma özellikleri karakterize edilebilir ve bu malzeme ile üretilen son ürünlerin ömürleri hakkında tahminler yapmak mümkündür. Bu amaçla laboratuvar ortamında yapılan testlerden bir tanesi de kompakt çekme deneyidir. Kompakt çekme deneyinde kullanılan numuneler ISO 13589 (2003) standardına göre hazırlanmış ve Şekil 2.10'te temel boyutları gösterilmiştir.



Şekil 2.10. ISO 13589 (2003) standardına göre hazırlanmış kompakt çekme numunesinin şematik resmi

Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile basılan numune boyutları standarta göre belirlenmiştir: Tüm numune genişliği $W=30$ mm, genişlik $w=24$ mm, numune boyu $l_1=28,8$ mm, kalınlık $h= 10$ mm, çatlak yüzeyine simetrik olarak yerleştirilmiş iki deliğin merkezinin birbirine uzaklığı $l_2=13,2$ mm, yükleme pim delik çapı $2R= 6$ mm, çatlak boyu $a=11$ mm dir.

Kırılma mekanizmasının temel kavramı, her lineer elastik malzeme kritik gerilme yoğunluk faktörü (K_{IC}) olarak adlandırılan kırılma tokluğuna sahiptir. Çatlak ilerleme, gerilme yoğunluk faktörü (K_I), çatlak boyu, geometrisi ve uygulanan kuvvetin fonksiyonu gibi olan kırılma mekanizması parametreleri ile meydana gelecektir. Ortaya çıkan K_I değeri K_{IC} değerlerine eşit olabilir veya aşabilir (ISO 13586). Test sonuçlarından elde edilen datalar Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği (LEKM) kriterlerine uygun olarak değerlendirilir ve ISO 13586 standartında belirten formüller kullanılarak malzemenin kırılma tokluğu verilerine (K_C) ulaşılır.

Benzer şekilde kompakt çekme (Compact tension – CT) numunesi kullanılarak gerilme şiddeti faktörü;

$$K_I = \frac{F}{BW^{1/2}} f(a/W) \quad (2.5)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada;

$$f(a/W) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0,886 + 4,64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13,32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \quad (2.6)$$

şeklinde hesaplanır.

Burada $0.3 \leq a/W \leq 0.8$ ön şartı sağlaması koşuluyla gerilme şiddeti faktörü:

$$K_I = 1,17 \left[1,5 - \left(\frac{a}{W}\right) + 0,66 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right] \frac{F(2W+a)}{B(W-a)} \quad (2.7)$$

ile hesaplanır.

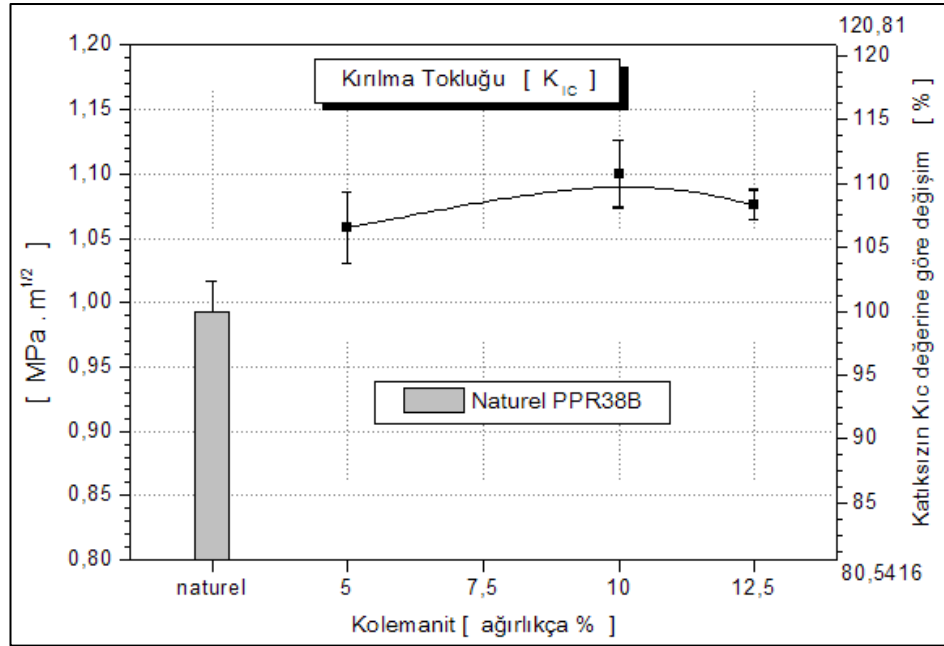
3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Üç Nokta Eğme Deneyi (SENB)

3.1.1. Polipropilen random kopolimer malzemenin üç nokta eğme deneyi (SENB) sonuçları

3.1.1.1. Polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü

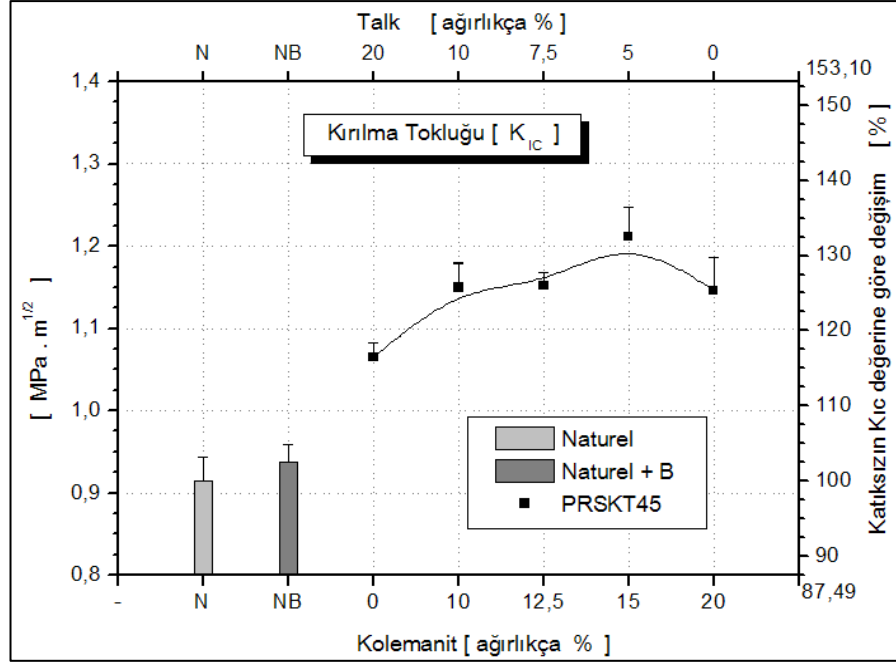
Elek altı 38 µm tane boyutlu kolemanit dolgulu Boralies marka polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü (Şekil 3.1)'de verilmektedir. Dolgulandırma naturel malzemeye göre kırılma şiddeti faktörünü %6 ile %11 aralığında artırmaktadır.



Şekil 3.1. Elekt altı 38 µm tane boyutlu kolemanit dolgulu ve %2 Maleik Anhidrit katkılı Boralies marka polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü

Sabic marka naturel polipropilen random kopolimer malzemeye ticari ismi Bondyram 1001 olan maleik anhidrit katkısı kırılma şiddetinde çok az artış sağlamaktadır. Sadece kolemanit dolgulandırılmış malzemenin kırılma şiddeti

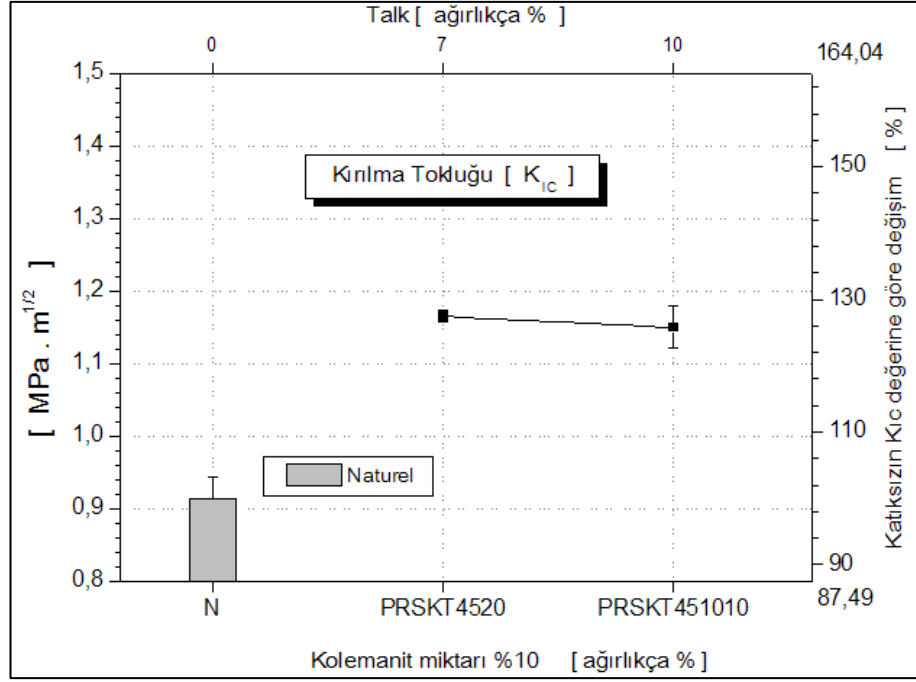
faktöründe %15 artış meydana gelmektedir. Bu artış artan talk dolgusuyla düşmeye devam etmektedir. %15 kolemanit ve %5 talk ile hibrit dolgulandırılan polipropilen random kopolimer malzemede kırılma şiddeti faktörü için maksimum değere ulaşılmıştır (Şekil 3.2).



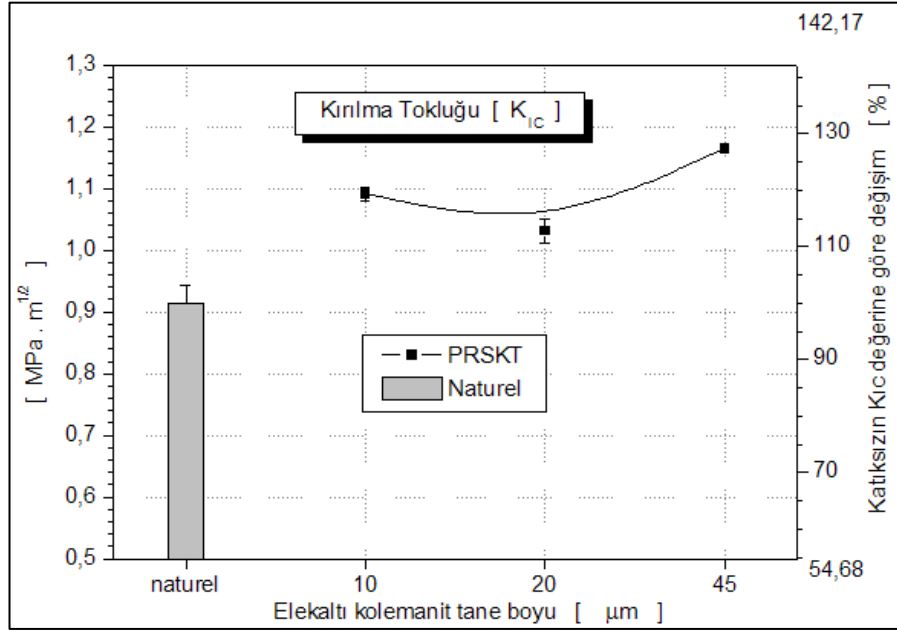
Şekil 3.2. Kolemanit (elekalı 45 µm) ve talk dolgulu maddelerinin polipropilen random kopolimer malzemenin (Sabic marka) kırılma şiddeti faktörüne etkisi

Elek altı 45 µm tane boyutlu %10 kolemanit miktarı için polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü talk miktarı artıka azalacağı (Şekil 3.3) de görülmektedir. Naturel malzemeye göre %10 kolemanit ve %10 talk ile dolgulandırılmasıyla kırılma şiddeti faktöründe %25 artış görülmektedir.

Polipropilen random kopolimer malzemenin dolgu tane boyutunun kırılma şiddeti faktörüne düzenli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Elek altı 20 µm tane boyutlu kolemanit malzemede meydana gelen düşüşün eleme sistemindeki olumsuz etkilerden dolayı oluştuğu düşünülmektedir (Şekil 3.4).



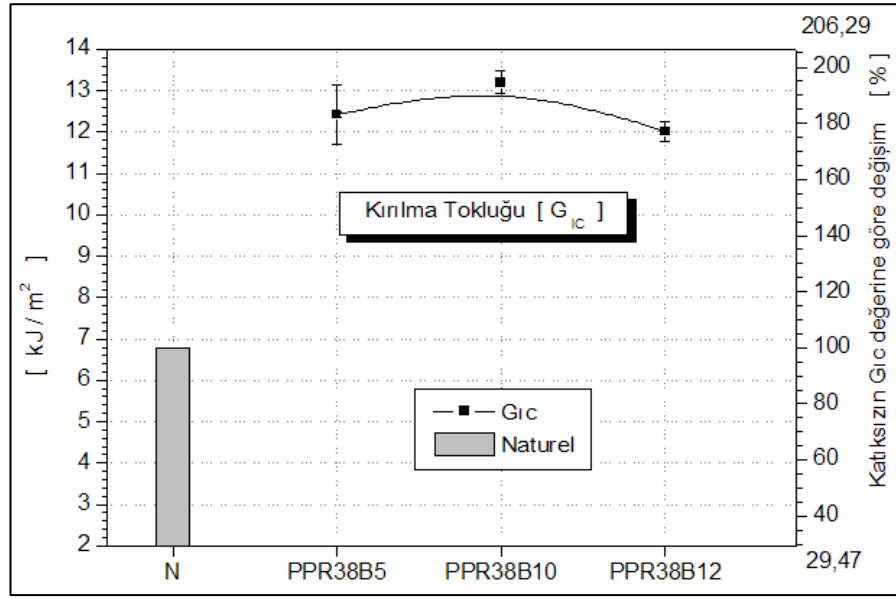
Şekil 3.3. Kolemanit dolgu miktarına ve talk miktarına bağlı polipropilen random kopolimer malzemeye kırılma şiddeti faktörü



Şekil 3.4. Polipropilen random kopolimer malzemenin dolgu tane boyutunun kırılma şiddeti faktörüne etkisi

3.1.1.2. Polipropilen random kopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü

Elek altı 38 µm tane boyutlu kolemanit dolgulu ve %2 Maleik Anhidrit katkılı Boralies marka polipropilen random kopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü (Şekil 3.5)'de görülmektedir. maleik anhidrit katkılı bu karışımlarda naturel malzemeye göre %80 gerilme şiddeti faktöründe artış görülmektedir. Bu artış artan dolgu miktarıyla büyük bir değişime sebep olmamaktadır.

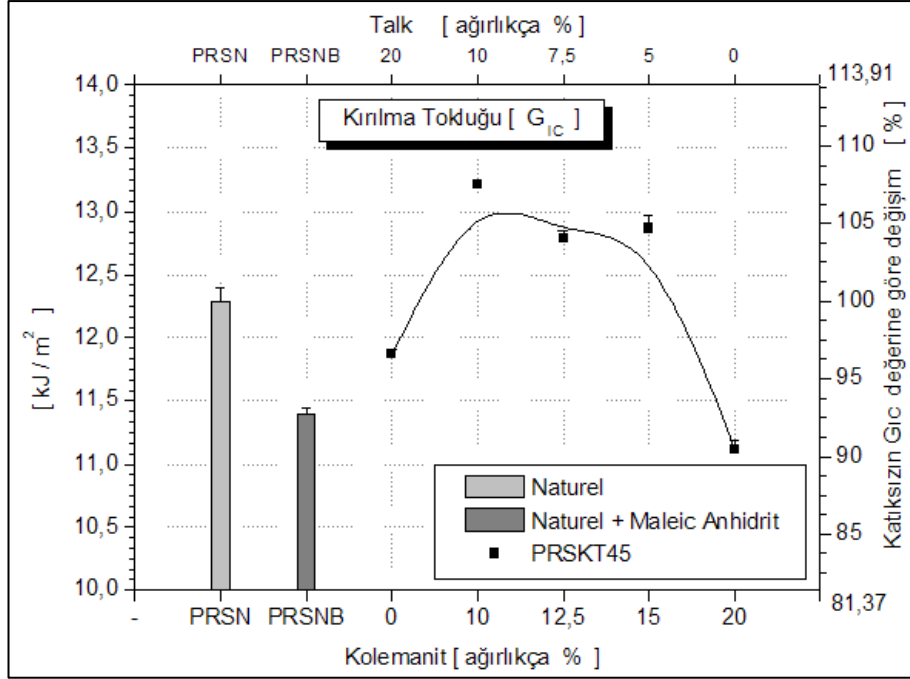


Şekil 3.5. Elek altı 38 µm tane boyutlu kolemanit dolgulu ve %2 Maleik Anhidrit katkılı Boralies marka polipropilen random kopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü

Kolemanit (elek altı 45µm) ve talk dolgulu maddelerin polipropilen random kopolimer malzemenin (Sabic marka) gerilme şiddeti faktörüne etkisi (Şekil 3.6)'da görülmektedir. Naturel malzemeye maleik anhidrit ilavesi gerilme şiddeti faktöründe %8 azalma görülmektedir. Talkın ve kolemanitin miktarındaki değişimler sırasıyla %5-%10 ile %10-%15 oranlarında hibrit bir şekilde dolgulandırıldığında naturel malzemeye göre artış sağladığı görülmeye karşın düzenli bir değişime sebep olmamaktadır. Toplamda %20 dolgulandırma gerilme şiddet faktöründe azalmaya sebep olmaktadır.

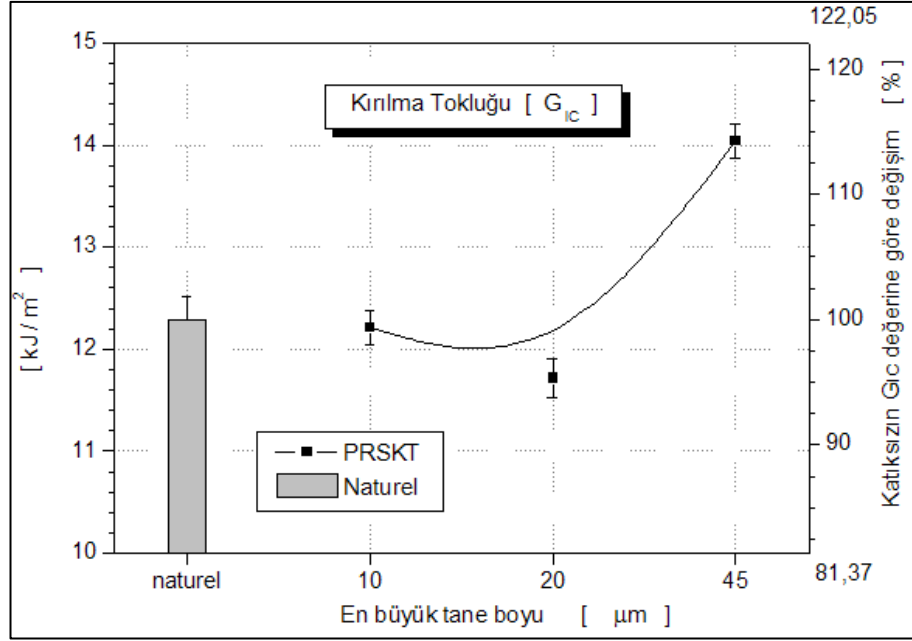
%10 kolemanit ve %7 talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin dolgu tane boyutunun gerilme şiddeti faktörüne etkisi (Şekil 3.7) 'de gösterilmektedir. Naturel malzemeye göre dolgulandırmak gerilme şiddeti

faktöründe %15 varan bir artışa sebep olmaktadır. Tane boyu arttıkça gerilme şiddeti faktöründe artış meydana gelmesine karşın, Elek altı 20 μm tane boyutlu kolemanit malzemede meydana gelen düşüşün eleme sistemindeki olumsuz etkilerden dolayı olduğu düşünülmektedir.

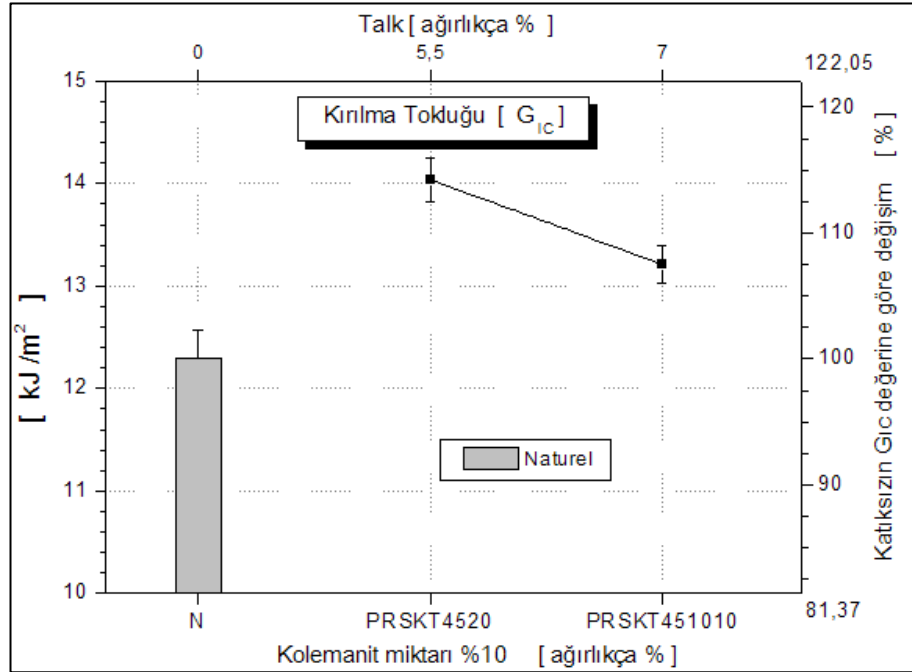


Şekil 3.6. Kolemanit (elek altı 45 μm) ve talk dolgulu maddelerinin polipropilen random kopolimer malzemenin (Sabic marka) gerilme şiddet faktörüne etkisi

Talk miktarı arttıkça %10 kolemanit dolgulu malzemelerde gerilme şiddeti faktöründe azalma meydana gelmektedir. Naturel malzemeye göre hibrit dolgulandırma malzemelerin gerilme şiddetinde artışa sebep olmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. %10 Kolemanit ve %7 talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin dolgu tane boyutunun gerilme şiddeti faktörüne etkisi

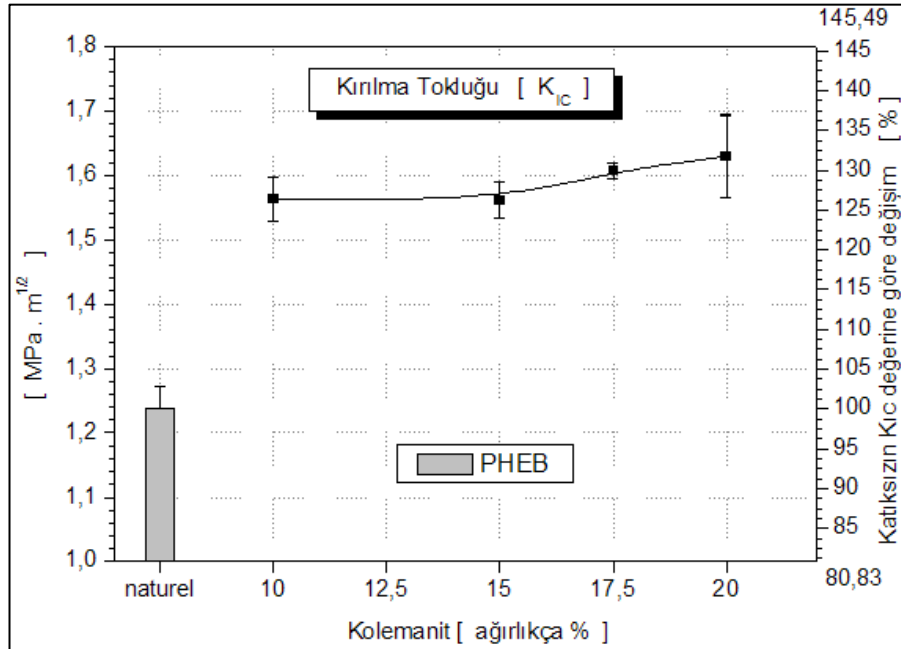


Şekil 3.8. Kolemanit ve talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemeye gerilme şiddet faktörüne etkisi

3.1.2. Polipropilen homopolimer malzemenin üç nokta eğme deneyi (SENB) sonuçları

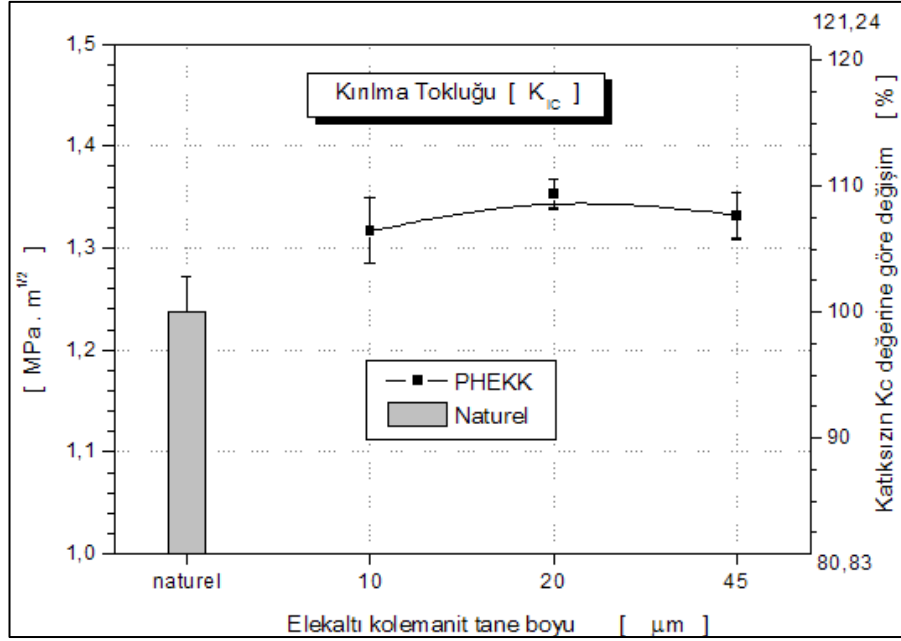
3.1.2.1. Polipropilen homopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü

Elek altı 45 μm tane boyutlu ve % 2 Maleik Anhidrit katkılı Ecolen marka polipropilen homo polimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü (Şekil 3.9) 'de görülmektedir. Naturel malzemeye göre dolgulandırmak kırılma şiddeti faktöründe %32 'ye varan bir artışa sebep olmaktadır. Bu artış artan kolemanit dolgulandırma miktarı ile artmaktadır.

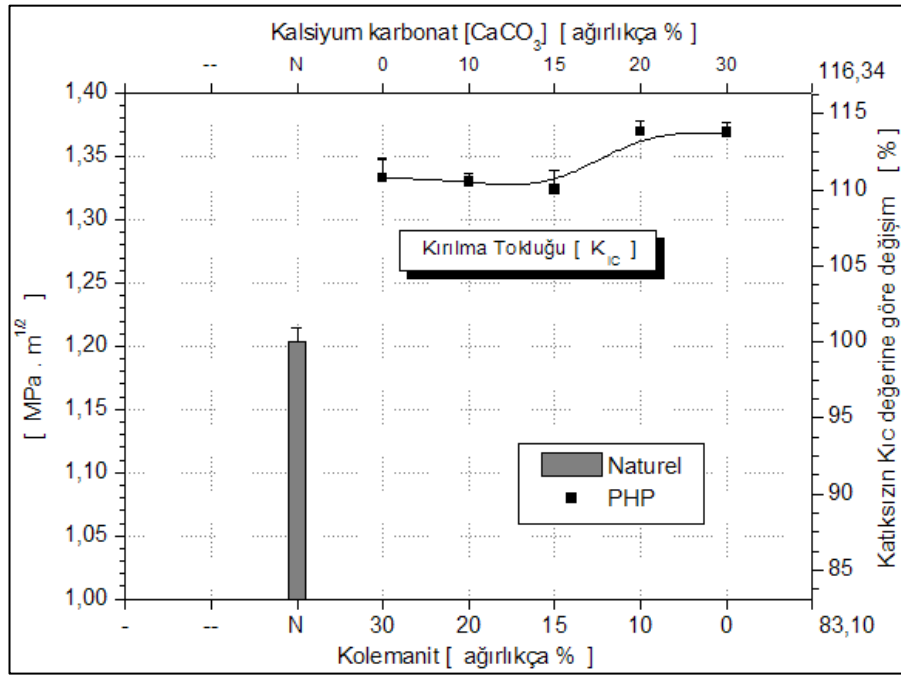


Şekil 3.9. Elek altı 45 μm tane boyutlu ve % 2 Maleik Anhidrit katkılı Ecolen marka polipropilen homo polimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü

%35 kolemanit dolgulu polipropilen homopolimer malzemenin dolgu tane boyutunun kırılma şiddeti faktörüne etkisi (Şekil 3.10) 'da görülmektedir. Naturel malzemeye göre kolemanit ile dolgulandırma grafikte belirtilen tane boyutlarının tümü için kırılma şiddeti faktöründe %8 ila %10 'luk bir artışa sebep olmaktadır. Elek altı kolemanit tane boyu arttıkça kırılma şiddeti faktörü artmaktadır.



Şekil 3.10. %35 Kolemanit dolgulu polipropilen homopolimer malzemenin dolgu tane boyutunun kırılma şiddeti faktörüne etkisi

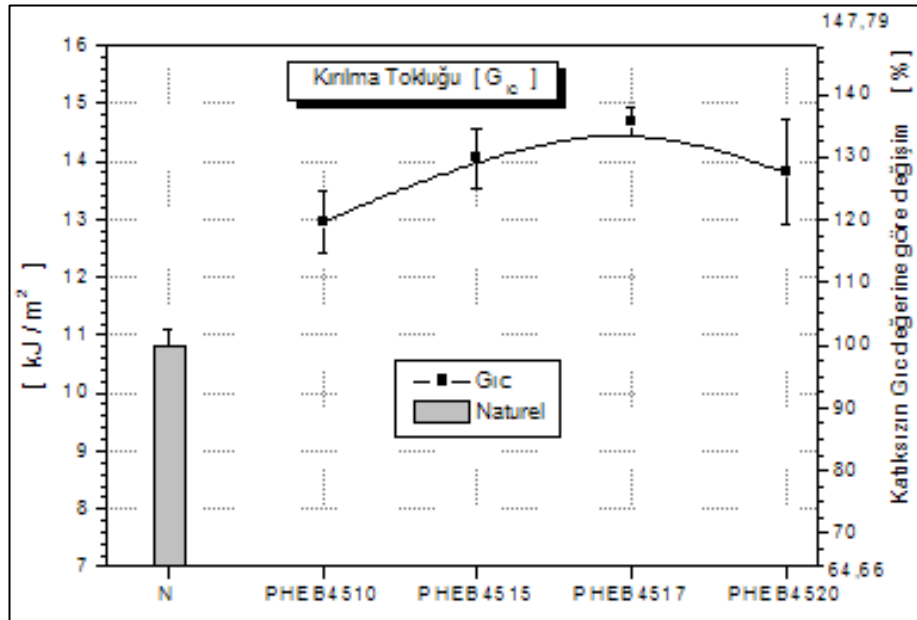


Şekil 3.11. Kolemanit (elektaltı 45 μm) ve kalsit dolgulu maddelerinin polipropilen homopolimer malzemenin (Petoplen -Petkim marka) kırılma şiddeti faktörüne etkisi

Elektali 45 μm tane boyutlu kolemanit ve kalsit dolgulu maddelerinin Petoplen (Petkim) marka polipropilen homopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörüne etkisi (Şekil 3.11) 'de görülmektedir. %30 kalsiyum karbonat (CaCO_3) dolgulandırılması naturel malzemeye göre kırılma şiddeti faktöründe %14 artış meydana getirmektedir. Bir diğ er %30 kolemanit dolgulandırılması naturel malzemeye göre kırılma şiddeti faktöründe %11 artış meydana getirmektedir. Bu artış artan kalsiyum karbonat dolgusu ile artmaya devam etmektedir.

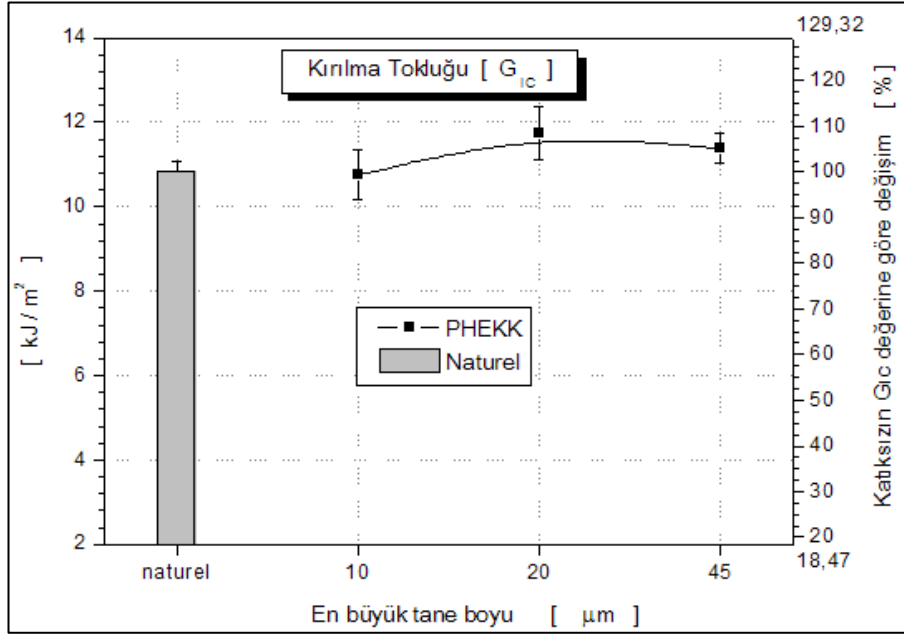
3.1.2.2. Polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü

Elek altı 45 μm tane boyutlu ve %2 maleik anhidrit katkılı Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü (Şekil 3.12)' de görülmektedir. Naturel malzemeye göre kolemanit ile dolgulandırma gerilme şiddeti faktöründe artışa sebep olmaktadır. % 17.5'luk kolemanit dolgu miktarına kadar gerilme şiddeti faktöründe %35 'e varan bir artış meydana gelmektedir. %20'lik kolemanit dolgulandırması ile meydana gelen bu artışta %7 lik bir düşüş meydana gelmektedir.



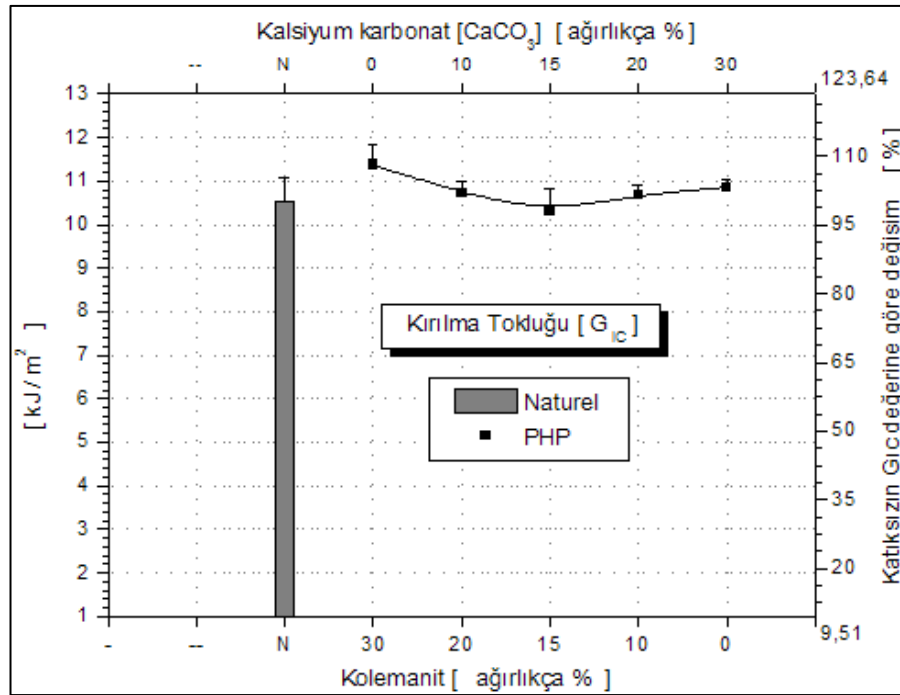
Şekil 3.12. Elektali 45 μm tane boyutlu ve %2 Maleik Anhidrit katkılı Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü

Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemeyi farklı tane boyutlarında ağırlıkça % 35 kolemanit dolgulandırıldığında gerilme şiddeti faktöründeki değişim (Şekil 3.13)'de gösterilmektedir. Naturel malzemeye göre %35 kolemanit dolgulandırılması gerilme şiddeti faktöründe %8 lik bir artışa sebep olmaktadır. Tane boyutundaki yükseliş gerilme şiddeti faktöründe önemli bir artışa sebep olmamaktadır.



Şekil 3.13. Polipropilen homopolimer malzemenin elek altı dolgu tane boyutunun gerilme şiddeti faktörü

Elektaltı 45 µm tane boyutlu kolemanit ve kalsit dolgulu maddelerinin Petoplen (Petkim) marka polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörüne etkisi (Şekil 3.14) de görülmektedir. %30 kolemanit dolgulandırılması naturel malzemeye göre gerilme şiddeti faktöründe %9 artış meydana getirmektedir. Bu artış, ağırlıkça %15 kalsiyum karbonat dolgulandırma miktarına kadar azalmaya sebep olmuştur. Bu %15 kalsiyum karbonat dolgulandırılmasına kadar olan azalma daha sonra artan dolgulandırma miktarı ile önemli bir artış göstermemektedir.



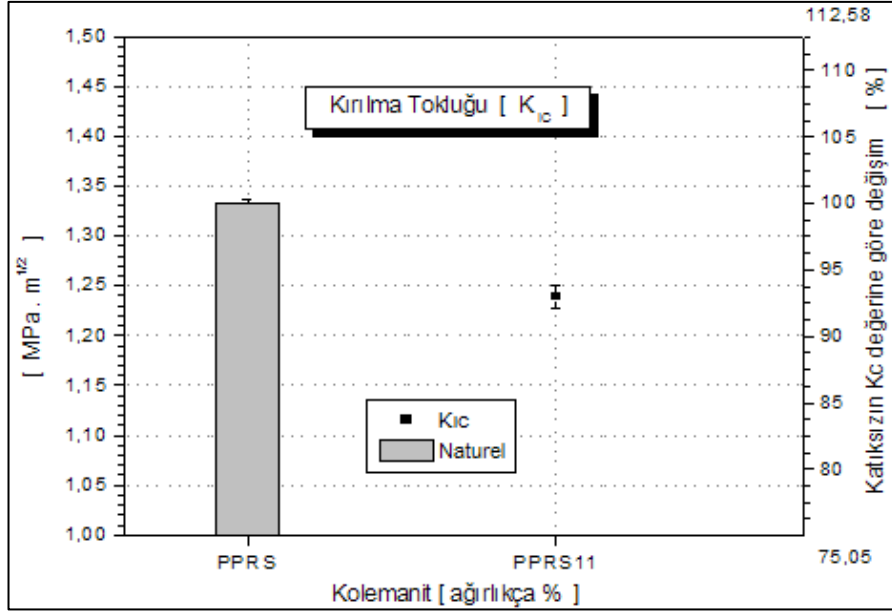
3.2. Kompakt Çekme Deneyi

3.2.1. Polipropilen random kopolimer malzemenin kompakt çekme sonuçları

3.2.1.1. Polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü

Kompakt çekme deneyleri enjeksiyon ve ekstrüzyon ürünü oluşturulan numunelere uygulanmaktadır. Elek altı 45 μm tane boyutlu kolemanit hammaddeli numuneler bu çalışmada kullanılmıştır.

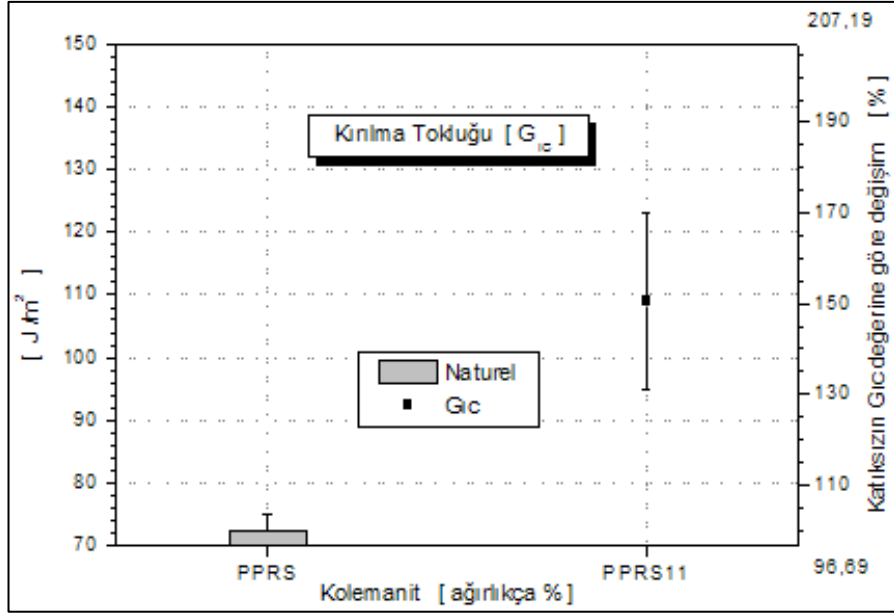
%13 oranında kaplı elek altı 45µm tane boyutlu ağırlıkça %10 kolemanit ve ağırlıkça %5.5 talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin naturel malzemeye göre kritik kırılma şiddeti faktörü (Şekil 3.15)'de görülmektedir. Boru üretimi yapılan bu malzemenin kritik kırılma şiddeti faktörü %7 azalmaktadır.



Şekil 3.15. %13 oranında Kalsiyum Stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %5,5 Talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktörü

3.2.1.2. Polipropilen random kopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü

%13 oranında kaplı elek altı 45 μ m tane boyutlu ağırlıkça %10 kolemanit ve ağırlıkça %5.5 talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin naturel malzemeye göre kritik kırılma şiddeti faktörü Şekil 3.15’ da görülmektedir. Boru üretimi yapılan bu malzemenin kritik kırılma şiddeti faktörün % 7 azalmaktadır. Gerilme şiddeti faktörü ise % 50 artmaktadır (Şekil 3.16).



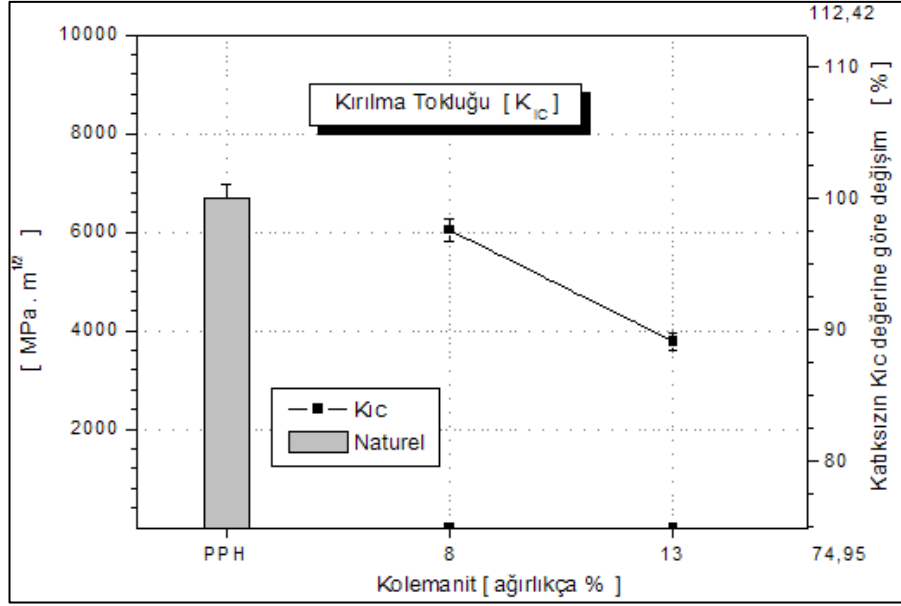
Şekil 3.16. %13 oranında kalsiyum stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %5,5 Talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin kritik gerilme şiddeti faktörü

3.2.2. Polipropilen homopolimer malzemenin kompakt çekme sonuçları

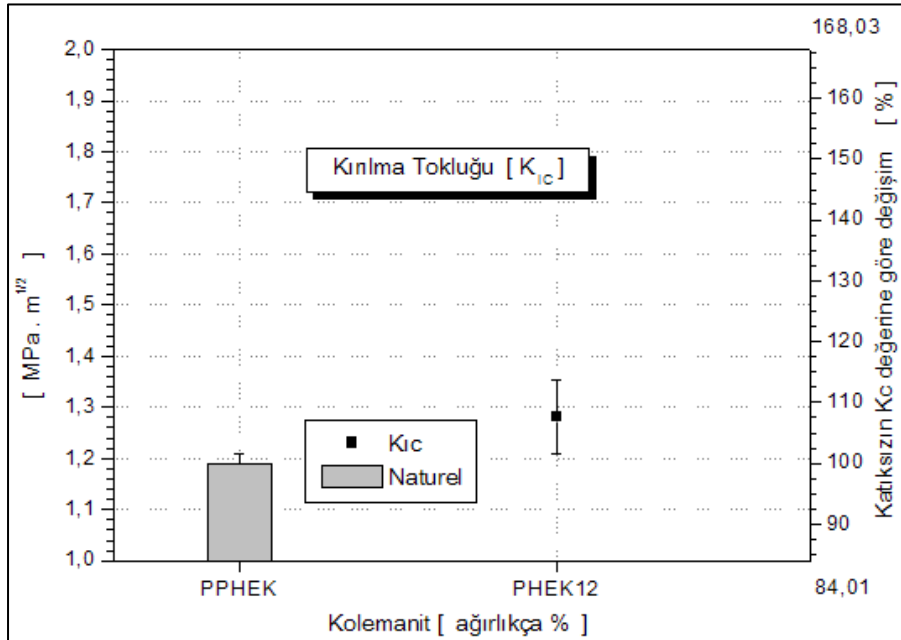
3.2.2.1. Polipropilen homopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü

Farklı iki MFR değerine sahip ve %10 kolemanit ve %20 kaplı kalsit dolgulu polipropilen homopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktörü karşılaştırılması Şekil 3.17’ de verilmektedir. MFR si yüksek olan Moplen marka polipropilen homopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktöründe %8 azalma görülmektedir.

Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemenin kırılma ve gerilme şiddeti faktörlerine Şekil 3.18’ de verilmektedir. %13 oranında kalsiyum stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %20 kaplı kalsit dolgulu Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktöründe % 10 artış görülmektedir.



Şekil 3.17. %13 oranında kalsiyum stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %20 kaplı kalsit dolgulu Moblen marka polipropilen homopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü

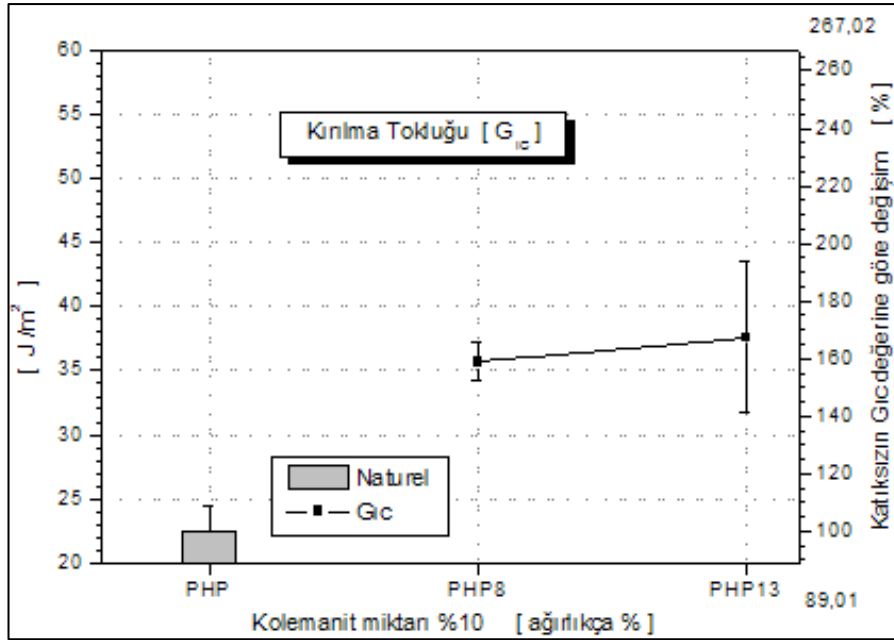


Şekil 3.18. %13 oranında Kalsiyum Stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %20 kaplı Kalsit dolgulu Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemenin kritik kırılma şiddet faktörü

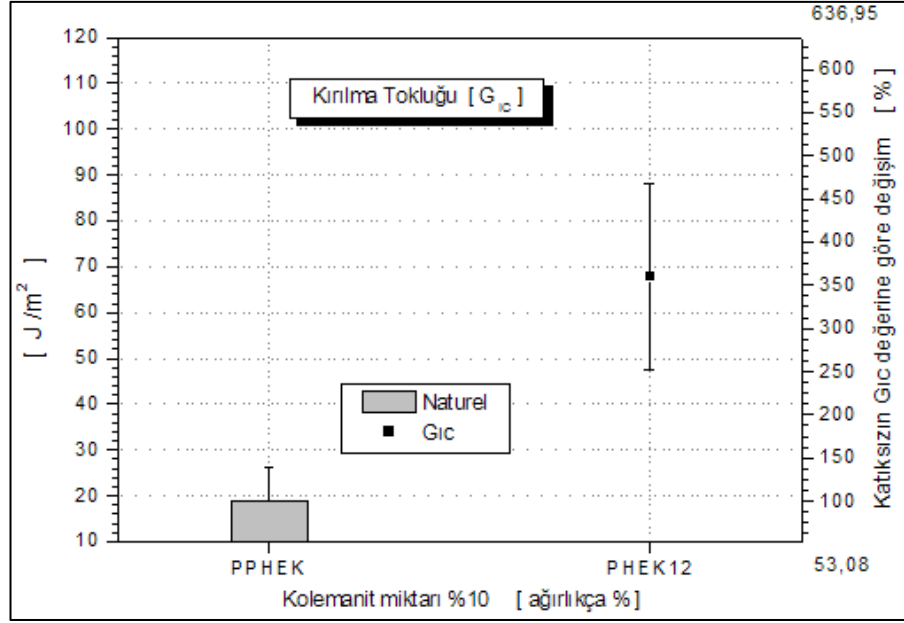
3.2.2.2. Polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü

Farklı iki MFR değerine sahip ve %10 kolemanit ve %20 kaplı kalsit dolgulu polipropilen homopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktörü karşılaştırılması (Şekil 3.17)' de verilmektedir. MFR si yüksek olan Moplen marka polipropilen homopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktöründe %8 azalma görülmektedir. Fakat gerilme şiddeti faktörü naturel malzemeye göre %50-65 arasında artmaktadır. MFR miktarının artması kritik gerilme şiddeti faktöründe %10 artış sağlamaktadır (Şekil 3.19).

Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemenin kırılma ve gerilme şiddeti faktörlerine (Şekil 3.18) ve (Şekil 3.20)' de verilmektedir. %13 oranında kalsiyum stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %20 kaplı kalsit dolgulu Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktöründe % 10 artış görülmektedir. Gerilme şiddeti faktöründe ise %22,5 artış görülmektedir.



Şekil 3.19. %13 oranında Kalsiyum Stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %20 kaplı Kalsit dolgulu Ecolen ve Petkim marka polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü



Şekil 3.20. %13 oranında Kalsiyum Stearat kaplı ağırlıkça %10 kolemanit ve %20 kaplı Kalsit dolgulu Ecolen marka polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

A) Polipropilen random kopolimer malzemenin, kırılma şiddeti faktörü ile gerilme şiddeti faktörünün (SENB) deneyi sonuçları;

A1) Polipropilen random kopolimer malzemenin, kırılma şiddeti faktörünün (SENB) deneyi sonuçları;

- Elek altı 38 μm tane boyutlu kolemanit dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktöründe, naturel malzemeye ait kırılma şiddeti faktörüne göre artış görülmüştür.
- Elek altı 38 μm tane boyutlu kolemanit dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörünün, artan kolemanit dolgu miktarı arttığı görülmüştür.
- Elek altı 45 μm tane boyutlu kolemanit dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktöründe, naturel malzemeye ait kırılma şiddeti faktörüne göre artış görülmüştür.
- Elek altı 45 μm tane boyutlu kolemanit ile ağırlıkça %10 dolgulandırılan polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörünün, artan talk dolgusu miktarı ile azaldığı görülmüştür.
- Elek altı 45 μm tane boyutlu kolemanit dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörü artan kolemanit miktarı ile artarken, talk dolgusu ile hibrit dolgulandırma yapılması ile artan talk dolgu miktarı ile kırılma şiddeti faktörünün azaldığı görülmüştür.
- Polipropilen random kopolimer malzemenin dolgu tane boyutunun kırılma şiddeti faktörüne düzenli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

A2) Polipropilen random kopolimer malzemenin, gerilme şiddeti faktörünün (SENB) deneyi sonuçları;

- Elek altı 38 μm tane boyutlu kolemanit dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörünün, naturel malzemeye göre %80 gerilme

şiddeti faktöründe artış görülmektedir. Bu artış artan dolgu miktarıyla büyük bir değişime sebep olmamaktadır.

- Elek altı 45µm tane boyutlu kolemanit ve talk dolgunun polipropilen random kopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörüne etkisi, talkın ve kolemanitin miktarlarının hibrit bir şekilde dolgulandırıldığında naturel malzemeye göre artış sağladığı görülmesine karşın düzenli bir değişime sebep olmamaktadır.
- %10 kolemanit ve %7 talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin, dolgu tane boyutunun gerilme şiddeti faktörüne etkisi naturel malzemeye göre dolgulandırılması ile gerilme şiddeti faktöründe artışa sebep olurken, tane boyu arttıkça gerilme şiddeti faktörüne düzenli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Talk miktarı artıkça, %10 kolemanit dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörü azalırken, naturel malzemeye göre hibrit dolgulandırma polipropilen random kopolimer malzemenin gerilme şiddetinde artışa sebep olduğu görülmüştür.

B) Polipropilen homopolimer malzemenin, kırılma şiddeti faktörü ile gerilme şiddeti faktörünün (SENB) deneyi sonuçları;

B1) Polipropilen homopolimer malzemenin, kırılma şiddeti faktörünün (SENB) deneyi sonuçları;

- Elek altı 45 µm tane boyutlu kolemanit dolgulu polipropilen homopolimer malzemenin, kırılma şiddeti faktörünün, naturel malzemeye göre arttığı görülmüştür. Bu artışın, artan kolemanit dolgulandırma miktarı ile arttığı görülmüştür.
- %35 kolemanit dolgulu polipropilen homopolimer malzemenin dolgu tane boyutunun kırılma şiddeti faktörüne etkisi, naturel malzemeye göre kolemanit ile dolgulandırma artışa sebep olmakla birlikte elek altı kolemanit tane boyutu arttıkça kırılma şiddeti faktörünün arttığı görülmüştür.
- Elekalı 45 µm tane boyutlu kolemanit ve kalsit maddeleri ile hibrit dolgulandırılmış polipropilen homopolimer malzemenin kırılma şiddeti faktörünün, naturel malzemeye göre arttığı görülmüştür. Bu artış artan kalsiyum karbonat dolgusu ile artmaya devam etmektedir.

B2) Polipropilen homopolimer malzemenin, gerilme şiddeti faktörünün (SENB) deneyi sonuçları;

- Elek altı 45 µm tane boyutlu polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörünün kolemanit ile dolgulandırılması ile naturel malzemeye göre gerilme şiddeti faktöründe artış görülmüştür.
- %35 kolemanit dolgulu polipropilen homopolimer malzemeyi farklı tane boyutlarında dolgulandırıldığında gerilme şiddeti faktörünün, naturel malzemeye attığı görülmüştür. Tane boyutundaki yükseliş, gerilme şiddeti faktöründe önemli bir artışa sebep olmadığı görülmüştür.
- Elekalı 45 µm tane boyutlu kolemanit ve kalsit maddeleri ile hibrit dolgulandırılmış polipropilen homopolimer malzemenin gerilme şiddeti faktörünün, naturel malzemeye göre arttığı görülmüştür. Bu artış, ağırlıkça %15 kalsiyum karbonat dolgulandırma miktarına kadar azalmaya sebep olurken, daha sonra artan dolgulandırma miktarı ile önemli bir artış göstermemektedir.

C) Polipropilen random kopolimer malzemenin, kırılma şiddeti faktörü ile gerilme şiddeti faktörünün (Kompakt Çekme) deneyi sonuçları;

C1) Polipropilen random kopolimer malzemenin, kırılma şiddeti faktörünün (Kompakt Çekme) deneyi sonuçları;

- Elek altı 45µm tane boyutlu ağırlıkça %20 kolemanit ve ağırlıkça %5.5 talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktörünün, naturel malzemeye göre azaldığı görülmüştür.

C2) Polipropilen random kopolimer malzemenin, gerilme şiddeti faktörünün (Kompakt Çekme) deneyi sonuçları;

- Elek altı 45µm tane boyutlu ağırlıkça %20 kolemanit ve ağırlıkça %5.5 talk dolgulu polipropilen random kopolimer malzemenin kritik gerilme şiddeti faktörünün, naturel malzemeye göre arttığı görülmüştür.

D) Polipropilen homopolimer malzemenin, kırılma şiddeti faktörü ile gerilme şiddeti faktörünün (Kompakt Çekme) deneyi sonuçları;

D1) Polipropilen homopolimer malzemenin, kırılma şiddeti faktörünün (Kompakt Çekme) deneyi sonuçları;

- Farklı iki MFR değerine sahip ve %10 kolemanit ve %20 kaplı kalsit dolgulu polipropilen homopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktörünün, naturel malzemeye göre azaldığı görülürken farklı iki MFR değerine sahip numuneler karşılaştırıldığında MFR si yüksek olan (numune 13) polipropilen homopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktörünün azaldığı görülmüştür.
- %10 kolemanit ve %20 kaplı kalsit dolgulu polipropilen homopolimer malzemenin kritik kırılma şiddeti faktörünün naturel malzemeye göre attığı görülmüştür.

D2) Polipropilen homopolimer malzemenin, gerilme şiddeti faktörünün (Kompakt Çekme) deneyi sonuçları;

- Farklı iki MFR değerine sahip ve %10 kolemanit ve %20 kaplı kalsit dolgulu polipropilen homopolimer malzemenin kritik gerilme şiddeti faktörü karşılaştırılması naturel malzemeye göre attığı görülmüştür. MFR miktarının artması kritik gerilme şiddeti faktöründe artış sağladığı görülmüştür.
- Ağırlıkça %10 kolemanit ve %20 kaplı kalsit dolgulu polipropilen homopolimer malzemenin kritik gerilme şiddeti faktöründe, naturel malzemeye göre artış görülmüştür.

4.2. Öneriler

Kolemanit, talk ve kalsiyum karbonat katkısının polipropilen kırılma tokluğu özelliklerine etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi bakımından çalışmalarda farklı üreticilere ait değişik özelliklerde katkı minerali kullanılması yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

Akar A., *Polimer kimyasına giriş*, 2.Baskı, DTÜ Fen Edebiyat Fakültesi Yayınları Basımevi, Dumlupınar, 1989.

Akdemir A., Yüzey çatlaklı cam takviyeli plastiklerde gerilmeli korozyon, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1992, 24874.

Akkurt S., *Plastik malzeme bilgisi*, 3.Baskı, Birsan Yayınevi, İstanbul, 1991.

Albano C., Ichazo M., González J., Delgado M., Poleo R., Effects of filler treatments on the mechanical and morphological, behavior of pp+wood flour and pp+sisal fiber, *Mat. Res. Innovat.*, 2001, **4**, 284–293.

Albano C., Papa J., Ichazo M., Gonzalez J., Ustariz C., Application of different macrokinetic models to the isothermal crystallization of pp/talc blends, *Composite Structures*, 2003, **62**, 291–302.

Almeida O. D., Lagattu F., Brillaud J., Analysis by a 3d dlc technique of volumetric deformation gradients: application to polypropylene / epr / talc composites, *Composites Part A*, 2008, **39**, 1210–1217.

Alonso M., Lasco J. I., Saja J. A., Constrained crystallization and activity of filler in surface modified pp-talc composites, *Eur. Polym. Journal*, 1996, **33**, 255-262.

Andena L., Rink M., Frassine R., Corrieri R., Fracture mechanics approach for the prediction of the failure time of polybutene pipes, *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, **76**, 2666-2677.

Anderson T. L., *Fracture mechanics fundamentals and applications*, 4th ed., CRC Press, Boston, 1991.

Antich P., Vazquez A., Mondragon I., Bernal C., Mechanical behavior of high impact polystyrene reinforced with short sisal fibers, *Composites*, 2006, **37**, 139-150.

Arıkan H., Çelik tel takviyeli polimer kompozitlerin kırılma davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2002, 128909.

Ariffin A., Leong Y. W., Ishak Z. A. M., Mechanical and thermal properties of talcum and calcium carbonate filled polypropylene hybrid composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, **91**, 3327- 3336.

Armağan M., Politetrafluoroetilen malzemede darbe kırılma tokluğunun esas kırılma işi metoduyla incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 290449.

Baker A., Dutton S., Kelly S., *Composite materials for aircraft structures*, 2nd ed., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Virginia, 2004.

Balkan O., Polipropilen kompozitlerin termoplastik elastomerler ile modifikasyonlarının mekanik özelliklerine etkisi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 185165.

Batur A., Plastiklere uygulanan mekanik deneyler ve ilgili standartlar, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 251887.

Baydar D. G., Sürekli cam fiber takviyeli polipropilen kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 296998.

Broek D., *Elementary engineering fracture mechanics*, 2nd ed., Martinus Nijhoff Publishers, London, 1982.

Chand N., Dwivedi U. K., Effect of coupling agent on abrasive wear behaviour of chopped jute fibre-reinforced polypropylene composites, *Wear*, 2006, **61**, 1057-1063.

Chuah A. W., Leong Y. C., Gan S. N., Effects of titanate coupling agent on rheological behaviour, dispersion characteristics and mechanical properties of talc filled polypropylene, *European Polymer Journal*, 2000, **36**, 789-801.

Çetinel H., Polietilen ve polipropilenin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2000, **3**, 79-87.

Çolak F. M., Üzerinde açılı çatlak bulunan cam-kumaş/epoksi kompozitlerde çatlak açısının kırılma davranışına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006, 183248.

Doufnoune R., Haddaoui N., Riahi F., Elaboration and characterization of an organic/inorganic hybrid material: effect of the interface on the mechanical and thermal behavior of pp/caco₃ composite, *International Journal of Polymeric Materials*, 2005, **91**, 95-152.

Ekrem M., Cam kumaş takviyeli termoplastik kompozitlerin mekanik özellikleri ve kırılma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006, 183054.

Fındık E., Talk mineral dolgu maddesi ile polipropilen blok kopolimer boruların kısa süreli iç basınç performans özelliklerinin optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 259409.

Fink E., Bank L., Pultruded glass fiber-reinforced plastic and paperboard composite tubes, *Engineering Drive*, 2006, **25**, 601-616.

Gachter R., Müller H., *Fillers and reinforcements, plastic additives handbook*, 3rd ed., New York, 1990.

Gao Y., Liu L., Zhang Z., Mechanical performance of nano-caco₃ filled polystyrene composites, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2009, **22**, 6-15.

Gensler R., Plummer C. J. G., Grein C., Kausch H., Influence of the loading rate on the fracture resistance of isotactic polypropylene and impact modified isotactic polypropylene, *Polymer*, 2000, **41**, 3809-3819.

Güven O., *Polimerlerin bazı termal özellikleri*, 5. Baskı, Tumka Basımevi, İstanbul, 1984.

Han C. D., Weghe T. V. D., Shete P., Haw J. R., Effects of coupling agents on the rheological properties, processability, and mechanical properties of filled polypropylene, *Polymer Engineering and Science*, 1981, **21**, 196-203.

Harper C. A., *Handbook of plastics, elastomers and composites*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 2004.

Hohenberger W., *Fillers and reinforcements, plastic additives handbook*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 2003.

Ichazo M. N., Albona C., González P. R., Candal M. V., Polypropylene/wood flour composites: treatments and properties, *Composite Structure*, 2001, **54**, 207-214.

Ishak Z. A. M., Ariffin A., Leong Y. W., Bahar M. B. A., Characterization of talc/calcium carbonate filled polypropylene hybrid composites weathered in a natural environment, *Polymer Degredation and Stability*, 2004, **83**, 411-422.

Janssen M., Zuidema J., Wanhill R., *Fracture mechanics*, 2nd ed., Taylor & Francis e-Library Publishers, London, 2005.

Kansu Y., Cam küre, caco₃ ve talk dolgulu polipropilen hibrit kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 198312.

Katz H. S., Milewski J. V., The selection and use of fillers, *Journal of Fillers for Plastics*, 1987, **17**, 1-19.

Kayalı E. S., *Metalik malzemelerin mekanik deneyleri*, 1. Baskı, İ.T.Ü. Yayınları, İstanbul, 1983.

Kim Y. K., Ye L., Effects of thickness and environmental temperature on fracture behaviour of polyetherimide, *Journal of Materials Science*, 2004, **39**, 1267-1276.

Koca N., Dolgu maddeli polimer malzemelerin taguchi yöntemi ile performans optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 259419.

Leong Y. W., Bahar M. B. A., Ishak Z. A. M., Ariffin A., Pukanszky B., Comparison of the mechanical properties and interfacial interactions between talc kaolin, and calcium carbonate filled polypropylene composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, **91**, 3315- 3326.

Lin Y., Chen H., Chan C. M., Wu J., Nucleating effect of calcium stearat coated CaCO_3 nanoparticles on polypropylene, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, **354**, 570-576.

Liang J. Z., Ness J. N., Influence of the extrusion conditions on the flow behaviour of polystyrene melts, *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, **69**, 50-54.

Liang J. Z., Li R. K. Y., Brittle - ductile transition in polypropylene filled with glass beads, *Polymer*, 1999, **40**, 3191-3195.

Liang J. Z., Li R. K. Y., Tjong S. C., Effects of glass bead content and surface treatment on viscoelasticity of filled polypropylene/elastomer hybrid composites, *Polymer Int.*, 1999, **57**, 1068-1072.

Liauw C. M., Lees G. C., Hurst S. J., Rotheron R. N., Ali S., 1998, Effect of silane-based filler surface treatment formulation on the interfacial properties of impact modified polypropylene/magnesium hydroxide composites, *Composites Part A*, 1998, **29**, 1313-1318.

Ma J., Qi Q., Bayley J., Du S., Mo S., Zhang L., Development of senb toughness measurement for thermoset resins, *Polymer Testing*, 2007, **26**, 445-450.

Mappleston P., Liquid injection opens medical and technical markets, *Modern Plastic International*, 1995, **25**, 44-47.

Marisa C. G. R., Antonio H. S., Fernanda M. B. C., Ana N. S., Study of composites based on polypropylene and calcium carbonate by experimental design, *Polymer Testing*, 2005, **24**, 1049-1053.

Mitsuishi K., Kodama S., Kawasaki H., Mechanical properties filled with calcium carbonate, *Polymer Engineering and Science*, 1985, **25**, 1059-1073.

Onaran K., *Malzeme bilimi*, 2. Baskı, Bilim Teknik Yayınevi, Ankara, 2003.

Öksüz M., Polipropilenin yapı ve özellik ilişkileri, *Plastik ve Ambalaj Teknolojisi*, 2000, **52**, 102-107.

Öveçoğlu L., *Metaldışı mühendislik malzemeleri ve üretim teknikleri*, 3. Baskı, Birsan Yayınları, İstanbul, 1999.

Paulik C., Gahlietner M., Neissel W., Flexible, tough and resilient polypropylene copolymers, *Kunststoffe Plast. Europe*, 1996, **86**, 1144-1147.

Perez N., *Fracture mechanics*, 3rd ed., Kluwer Academic Publishers, New York, 2004.

Radosha J. A., Trivedi N. C., *Handbook of fillers for plastics*, 2nd ed., London Press, London, 1987.

Rothon R., *Particulate-filled polymer composites*, 2nd ed., Smithers Rapra, New York, 2003.

Saçak M., *Polimer teknolojisi*, 6.Baskı, Gazi Kitabevi, Ankara, 2005.

Sahnoune F., Lopez J. M., Crespy A., Effect of elastomer interfacial agents on tensile and impact properties of CaCO_3 filled hdpe, *Journal of Materials Science*, 1999, **34**, 535-544.

Shenoy A. V., *Rheology of filled polymer systems*, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, London, 1999.

Solmaz M. Y., Kaman M., Turan K., Turgut A., Petek yapılı kompozit levhaların eğilme davranışlarının incelenmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2010, **22**, 1-11.

Stricker F., Bruch M., Mülhaupt R., Mechanical and thermal properties of syndiotactic polypropylene filled with glass beads and talcum, *Polymer*, 1997, **28**, 5347-5353.

Şardan B., Plastik matrisli hibrit kompozitlerde doku bileşenlerinin mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 243759.

Uğuz A., *Kırılma mekaniğine giriş*, 1. Baskı, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa, 2004.

Uyanık N., Savaşçı Ö. T., Akovaı G., *Ana hatları ile plastikler ve plastik teknolojisi*, 2. Baskı, Pagev Yayınları, İstanbul, 2002.

Velasco J. I., Saja J. A., Martinez A. B., Fracture behaviour of untreated and silane-treated talc-filled polypropylene composites, *Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures*, 1997, **20**, 659-670.

WANG Z., Toughening and reinforcing of polypropylene, *Journal of Applied Polymer Science*, 1996, **60**, 2239-2243.

Williams J. G., *Fracture mechanics of polymers*, 1st ed., Ellis Horwood Limited, John Wiley & Sons, London, 1987.

Yayla P., *Kırılma mekaniği*, 3.Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.

Yılmaz S., Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilenin hidrotermal yaşlandırma etkisi altındaki kırılma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 259427.

EKLER

Ek-A



PHE12, %10 Kolemanit, %20 Kalsit



PH13, %10 Kolemanit, %20 Kalsit



BUPLEN



PHPN



PPR(Nat)



PRS11, %10 Kolemanit, %5,5 Talk



PRSN



PRSNB



PRSK4520, %20 Kolemanit



PRSKT451010, %10 Kolemanit, %10 Talk



PRSKT4520, %10 Kolemanit, %7 Talk



PRSKT2020, %10 Kolemanit, %7 Talk



PRSKT1020, %10 Kolemanit, %7 Talk



PPH6, %30 Kolemanit, %0 Kalsit



PPH7, %20 Kolemanit, %10 Kalsit



PPH8, %10 Kolemanit, %20 Kalsit



PPH9, %15 Kolemanit, %15 Kalsit



PPH10, %0 Kolemanit, %30 Kalsit



PHEKK4535, %35 Kolemanit



PHEKK2035, %35 Kolemanit



PHEKK1035, %35 Kolemanit



PPR38B10, %10 Kolemanit



PHEB4510, %10 Kolemanit

Şekil A1. Enjeksiyon çekme numeneleri üzerinden alınan üç nokta eğme numunelerinin deney sonucu kırılma yüzeyleri

Ek-B



Moblen Marka (PPH)



(PPH8)



(PPHK13)



(PPHEK)



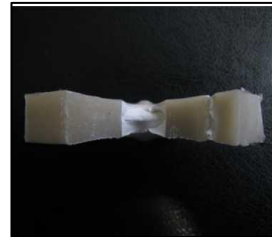
(PHEK12)



(PPRS)



(PPRS11)



(PPRS11)

Şekil B1. Kompakt çekme deneyi sonrası kırılma yüzeyleri

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Isparta’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Isparta’da tamamladı. 2005 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2010 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. Halen 2010 yılında girmiş olduğu Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde, Makine Mühendisliği Bölümü’nde öğrencidir.