



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

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONSTRÜKSİYONDA POLİMERİK MALZEME SEÇİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat DEMİRTAŞ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222304402 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Murat DEMİRTAŞ tarafından hazırlanan “**KONSTRÜKSİYONDA POLİMERİK MALZEME SEÇİMİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 5/12/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Murat DEMİRTAŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve tez sürecimde yardımlarını esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ' ye teşekkürlerimi borç bilirim.

Annem Mıhrıcan DEMİRTAŞ, eşim Büşra GÜRCÜ DEMİRTAŞ ve oğlum Alperen DEMİRTAŞ 'a sevgilerle.

Murat DEMİRTAŞ
AKSARAY, 2024

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Önemi	1
1.2 Tezin Amacı	2
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. TASARIMDA UYGUN MALZEMENİN BELİRLENMESİ	8
3.1 Kısıtlayıcılar	8
3.2 Malzemelerin Sınıflandırılması	9
3.2.1 Metaller	9
3.2.2 Seramikler	10
3.2.3 Polimerler	10
3.2.4 Kompozitler	11
3.3. Malzeme Seçimi	11
3.3.1 TOPSIS yöntemi	13
3.3.2 VIKOR yöntemi	13
3.3.3 ELECTRE yöntemi	14
3.3.4 AHP yöntemi	14
3.3.5 PSI yöntemi	15
3.3.6 PROMETHEE yöntemi	15
4. ASHBY MALZEME SEÇİM YÖNTEMİ	17
5. POLİMERİK MALZEMER İLE PSEUDO-ELASTİK DİZAYN	22
5.1 Doğrusal Viskoelastisite	25
5.2 Sünme	26
5.3 Boltzmann Süperpozisyon Prensibi	30
5.4 Viskoelastik Lineerliğin Belirlenmesi İçin İzokrono Gerilme - Gerinim İlişkisi	32
6. MATERYAL VE METOT	35
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	39
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	44
KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ	52

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KONSTRÜKSİYONDA POLİMERİK MALZEME SEÇİMİ

Murat DEMİRTAŞ

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

ÖZET

Polimer esaslı malzemelere uygulanan anlık deney sonuçları konstrüksiyon datası olarak kullanım açısından bir kısım sakıncalar içermektedir. Polimer esaslı malzemelerin mekanik davranışları zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden uzun dönemli test sonuçlarının tasarım datası olarak kullanılması gerekmektedir. Pratik tasarım hesaplamalarında bunun en güvenilir yolu sünme test sonuçlarını kullanmaktır.

Bu çalışmada, izotaktik polipropilen (PP) numuneler ile oda sıcaklığında sabit yükte çekme sünme testleri yapılmış ve isokrono eğriler ile lineerden lineer olmayan davranışa geçiş noktaları elde edilmiştir. Doğrusaldan doğrusal olmayana geçiş, maksimum gerilme seviyesinin %40 ila 50'si arasındaki değeri için gerçekleştiği gösterilmiştir. Başlangıçtaki sünme kompliyansını seviyesindeki azalış, gerinim seviyesinin artışı ile ters orantılı olarak gerçekleşmektedir. Bu hesaplamalarda zamana bağlı değişen parametrenin polimerik malzemeden yapılmış parçanın işletme ömrü ve müsaade edilebilir en yüksek gerinim seviyesindeki gerinimleri karşılaması dikkate alınmıştır.

Konstrüksiyonda polimerik malzeme seçimi ile ilgili bir literatür çalışması ortaya konarak, hem Asbhy yöntemi hem de pseudo elastik tasarım yöntemleri ile yapılan hesaplamaların sonucunda seçilen malzeme için karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Makine Tasarımı, Polimerik Malzeme Seçimi, Polipropilen, Sünme, İzokrono Eğri, İzometrik Eğri

Aralık, 2024; 52 sayfa

M.Sc. THESIS

POLYMERIC MATERIAL SELECTION IN DESIGN

Murat DEMİRTAŞ

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

ABSTRACT

Applying short-term test results to polymer-based materials in design have some problems in terms of use as design data. Since the mechanical behavior of polymer-based materials changes depending on time and temperature, long-term test results must be used as design data. The safest way to do this in practical design calculations is to use creep test results.

In this study, tensile creep tests were performed at room temperature with isotactic polypropylene (PP) samples at constant load and transition points from linear to nonlinear behavior were obtained with isochrono curves. It was shown that the transition from linear to nonlinear occurred for values between 40 and 50% of the maximum stress level. The decrease in the initial creep compliance level is inversely proportional to the increase in the strain level. In these calculations, the parameter that changes with time was taken into account in the operational life of the part made of polymeric material and the strains at the highest permissible strain level.

A literature study on the selection of polymeric materials in design was presented and a comparison was made for the selected material as a result of the calculations made with both the Asbhy method and pseudo elastic design methods.

Keywords: Mechanical Design, Material Selection, Polypropylene, Creep, Isochrone Curve, Isometric Curve

December, 2024; 52 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Malzeme seçiminde kısıtlayıcılar.	2
Şekil 3.1. Kısıtlayıcılar (Hatamura 2006).	8
Şekil 3.2. Malzeme seçiminde kısıtlayıcılar	11
Şekil 4.1. Bağlama çubuğu.	17
Şekil 4.2. Eğilmeye zorlanan giriş.	18
Şekil 4.3. Burulmaya zorlanan eleman.	19
Şekil 4.4. Bot küreği.	20
Şekil 4.5. Ashby’ nin elastisite modülü - yoğunluk grafiği	21
Şekil 5.1. Çeşitli gerilme seviyelerinde gerinim-time grafiği.....	27
Şekil 5.2. Sünme verilerinin isokorono eğrileri..	28
Şekil 5.3. Lineer olmayan isokorono durumu için farklı gerilme seviyelerinde gerilme-zaman eğrileri.....	29
Şekil 5.4. İzotermal çekme sünme testinin uygulanan sabit gerilme ve sürünme gerinim geçmişi. (a) Çekme sünme numunesine uygulanan sabit gerilme ve (b) sürünme gerilmesinin birincil, ikincil ve üçüncül aşamaları..	30
Şekil 5.5. Doğrusal viskoelastik bir malzemenin tek boyutlu yüklemelerinde değişken gerilme girdileri ve sünme gerilme geçmişi.(a) Gerilme $\Delta\sigma$ ’da artışlarla değişken gerilme girdileri ve (b) sünme gerinim tepkileri.	31
Şekil 5.6. Viskoelastik lineer ve lineer olmayan malzemeler için idealize edilmiş izokrono gerilme-gerinim eğrileri.(a) Farklı gerilme seviyelerindeki bir dizi sünme deneyinden elde edilen viskoelastik lineer ve (b) lineer olmayan malzemelerin izokrono gerilme-gerinim eğrileri.....	33
Şekil 6.1. Instron 3366 Çekme Test Cihazı	37
Şekil 6.2. Ölçümler	37
Şekil 7.1. Gerilme (σ) ile gerinim (ϵ) ilişkisi.	39
Şekil 7.2. Gerilme (σ) ile zaman (t) arasındaki ilişki.....	40
Şekil 7.3. Polipropilen’e ait isokrono eğrileri.	40
Şekil 7.4. Polipropilen’e ait izometrik eğriler.	41
Şekil 7.5. Ashby’ nin elastisite modülü - yoğunluk grafiği.	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Mühendislik malzemelerin sınıflandırılması ve özellikleri.	9
Çizelge 4.1. Ashby’ nin malzeme indisleri.	20



SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Alan
C_m	Fiyat
C_p	Isı Kapasitesi
E	Elastisite Modülü
F	Kuvvet
G	Kayma Modülü
L	Uzunluk
Pe	Elektriksel Direnç
σ_f	Akma Sınırı Gerilemesi
δ	Sehim
°C	Santigrat
η	Verim
ρ	Yoğunluk
μ	Dinamik Vizkozite
ε	Ekserji verimi
Δ	Fark
ρ	Yoğunluk

1. GİRİŞ

Tasarım, belirli bir ihtiyacı gidermek, karşılaşılan problemi çözüme kavuşturmak için yapılan çalışmadır. Yapılan çalışma sonucu bir ürün ortaya çıkabileceği gibi, bir fikir veya aydınlatıcı bir çalışmada ortaya çıkabilir.

Tasarım sistemli bir şekilde yapılmalıdır ve tasarım yapılırken belirli kurallara uyulmalıdır. Özellikle mühendislik tasarımlarında sunulan ürünün veya fikrin mühendislik kurallarına uygun olması gerekir. Elbette ortaya çıkan ürünün rengi, müşteri ilgisi gibi mühendislikle ilgisi olmayan konular da önemlidir. Ancak tasarımın tanımında olduğu gibi problemin çözüme kavuşması mühendislerin önceliğidir.

Tasarımda en önemli noktalardan biri tasarımda kullanılacak olan malzemedir. Malzeme seçiminin doğru yapılmasıyla bir fonksiyon istenilen bir şekilde ve daha uzun süre işlevini yerine getirebilir. Aksi takdirde sorunu veya isteği çözebilecek bir fonksiyon işlevini yerine getiremez.

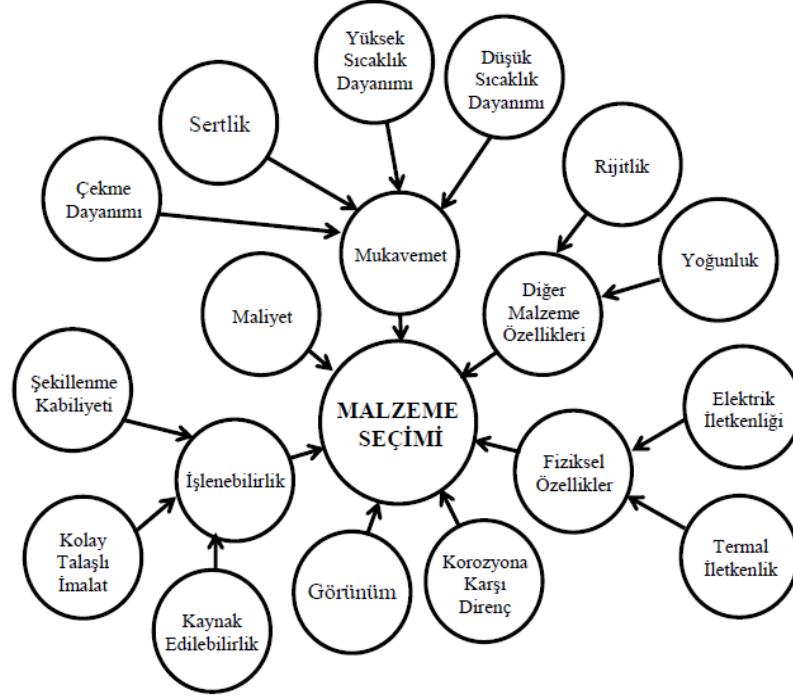
Malzeme seçimi yapmak kolay değildir. Çünkü günümüzde 160.000'in üzerinde malzeme vardır (Ashby, 2011). Bu kadar malzeme arasından yanlış malzemeyi seçme ihtimali ise çok yüksektir. Doğru malzemeyi seçmek için birçok bilim adamı ve mühendis malzeme seçimi yaklaşımları geliştirmiştir. Bu yaklaşımlardan bazılarını ilerde değinilmiştir.

Yöntemlerden biri olan Ashby Metodu doğru malzeme seçimi konusunda etkili ve seçim yaparken tasarım koşullarını diğer yöntemlerden daha çok dikkate alan yaklaşımından dolayı hata payını oldukça düşürmektedir. Ek olarak seçim sırasında malzeme özellikleri grafikleri sayesinde malzemeler arasındaki karşılaştırmalar basit bir şekilde yapılabilmektedir.

1.1 Tezin Önemi

Tasarımda birçok kısıtlayıcılar vardır. Bu kısıtlayıcıların değer aralıklarından çıkılmaması gerekmektedir. Bunun yanı sıra tasarımcı istenilen fonksiyonu yerine getirecek tasarımı elde etmek için serbest olduğu ve tamamen tasarımcıya bağlı kriterler de vardır. Normalde, malzeme seçimi tasarım tarafından belirlenir. Ama bazen tam tersi olur, yeni bir malzeme bir tasarımı olur hale getirebilir. Tasarım yapılırken her zaman belirlenen koşullara uyulması gerekir. Aksi takdirde tasarımda başarısızlık meydana gelir. Tasarımda birçok kısıtlayıcı vardır. Tasarımcı bunları göz

ardı edemez. Aksi takdirde tasarım fonksiyonunu yerine getiremez ve çalışma başarısız olur. Tasarlanan bir fonksiyon için en önemli kısıtlayıcılardan biri malzemedir. Çünkü tasarımcı için mevcut malzeme sayısı çok fazladır. Tasarımda malzeme seçimi başlı başına incelenmesi gereken bir konudur. Malzeme seçimi yapılırken fonksiyonu yerine getirecek uygun maliyetli malzeme seçilmesi ana hedeftir (Şekil 1.1) (Hatamura, 2006).



Şekil 1.1. Malzeme seçiminde kısıtlayıcılar.

1.2 Tezin Amacı

Polimer esaslı malzemelere uygulanan anlık deney sonuçları konstrüksiyon datası olarak kullanım açısından bir kısım sakıncalar içermektedir. Polimer esaslı malzemelerin mekanik davranışları zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden uzun dönemli test sonuçlarının tasarım datası olarak kullanılması gerekmektedir. Pratik tasarım hesaplamasında bunun en güvenilirli yolu sünme test sonuçlarını kullanmaktır.

Bu çalışmada sünme eğrilerinden faydalınalarak yapılan pseudo-elastik diyanz hesaplamaları sonuçları Ashby yöntemi ile seçilecek olan polimerik malzeme mukavemet değerleri ile karşılaştırılacaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Ashby (1991) tarafından yapılan çalışmada, tasarımda yer alan ekipmanların performansını maksimuma çıkarmak için malzeme özellikleri ve şekil olmak üzere iki faktörü dikkate alınması gerektiğini savunmuştur. Bu çalışmayla şekil ve malzemeyi bir bütün olarak ele almıştır. Ortaya çıkardığı şekil faktörleri ve malzeme indisleriyle, parçaların çeşitli yükleme koşullarında performansını artırmaya yönelik çalışmalar yapmıştır.

Burgess vd., (2006) kirişlerin eğilme mukavemeti tasarımı için malzeme indisine genel bir çözüm sunmuşlardır. Önceki çalışmalarda kirişlerin eğilmesi için malzeme indisi 3 farklı durum için çıkarılmıştır. Bu durumlar kalınlık sabit, yükseklik sabit ve yükseklik ve kalınlık oranları sabit. Bu çalışmada serbest değişkenliğe uyum sağlayan malzeme indisi geliştirilmiştir.

Tasarım gereksinimlerini karşılamak için bir malzemenin geliştirilmesi veya seçilmesi gerekmektedir. Genellikle çatışan hedefler arasında bir uzlaşma sağlanmasını gerektirir. Bu çatışmayı ortadan kaldırmak için Ashby (2000) tarafından yapılan çalışmada bir optimizasyon yöntemi uygulanmıştır ve bu çatışmaların aza indirildiği gözlemlenmiştir.

Ashby ve Cebon (1993) tarafından malzeme seçimi için yazılımsal sistem geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu yazılım malzeme özellik tablolarını kullanır ve malzeme seçim basamaklarını arka planda uygular. Tasarıma uygun malzemeleri filtrelenmiş olarak tasarımcıya sunmaktadır.

Cui vd., (2011) çalışmalarında; çok malzemeli otomotiv gövdeleri için sistematik malzeme seçimine rehberlik etmek üzere geliştirilmiş yeni malzeme performans endekslerini ve prosedürlerini sunmaktadır. Bu yeni endeksler, malzeme türlerine göre çok malzemeli otomotiv gövdelerinde karmaşık şekilli ince duvarlı kirişlerin çarpışmaya dayanıklılık performansının karakterize edilmesini sağlar. Bu çalışmada ayrıca, hafif, çok malzemeli bir otomotiv gövdesi tasarlayarak bu malzeme indislerinin ve prosedürlerinin uygulanmasını göstermektedir. Bu prosedürler, otomotiv endüstrisi tarafından tercih edilen hafif ve uygun fiyatlı bir gövde tasarlamaya yardımcı olacak ve böylece yakıt tüketimini azaltacaktır.

Milani ve Shanian (2006) yaptıkları çalışmada; güç aktarım elemanı olan dişliler için malzeme seçimi yapmışlardır. İlk olarak dişliden istenilen özellikler ve ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra aday malzemeler seçilmiş ve ELECTRE III optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarıma en uygun malzeme seçimini yapmışlardır.

Merphey (2004) çalışmasında, gerinime dayalı konuşlandırılabilir kafes kırımların kütle verimliliği için basit bir malzeme indisi türetmiştir. İndis için en yüksek değere sahip malzemeler, konuşlandırılmış bir eğilme mukavemeti gereksinimini karşılayan en hafif kafeslerdir.

Parate ve Gupta (2011) Ashby yaklaşımını kullanarak elektrostatik mikro mikroişlemciler için optimum malzeme seçimi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada malzeme indisleri belirlenmiş ve malzeme seçim şeması çizilmiştir. Seçim tablosu, yüksek çalıştırma voltajı için elmasın olası en iyi aday olduğunu ve ardından silisyum karbür ve silisyum nitrürün geldiğini göstermektedir. Öte yandan, yüksek hızlı elektrostatik mikro işlemci istenmesi durumunda alüminyum mümkün olan en iyi aday ardından nikel ve bakır olduğunu belirtmişlerdir.

Reddy ve Gupta (2010) Ashby yaklaşımını kullanarak mikro soğutucular için ısı transferi analizine dayalı termal ve mekanik özelliklerini üst düzeye çıkaracak optimum malzeme seçimine odaklanmışlardır. Bu çalışmada, malzeme seçim tabloları ve grafikleri ile desteklenen soğutucuların malzeme indisleri geliştirilmiştir. Alüminyum bazlı metallerin, mikro elektronik soğutucular için mevcut diğer malzemelerden daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur.

Rashedi vd., (2012) bu çalışmada; rüzgar türbinleri için malzeme indisleri belirlemiştir. Daha sonra, hem karada hem de açık denizde küçük ve büyük ölçekli yatay eksenli rüzgar türbinleri için tüm kanat ve kule malzeme seçimi için malzeme indisleri çıkarmışlardır. Bu çıkarımlar yapılırken istenilen malzeme özellikleri belirlenen aday malzemeler bileşik optimizasyon prosedürü ile elde edilmiştir.

Otomotiv fren diski, belirli bir hızda çalışırken bir tekerleğin hareketini yavaşlatmak veya durdurmak için kullanılan bir cihazdır. Yaygın olarak kullanılan fren rotor malzemesi, yüksek özgül ağırlığı nedeniyle çok yakıt tüketen dökme demirdir. Maleque vd., (2010) yaptıkları çalışmada; dökme demirin yerine daha hafif ve aynı fonksiyonu yerine getirebilecek malzemeleri irdemişlerdir. Birim özellik başına

maliyet ve dijital mantık yöntemleri gibi malzemelerin seçimi için iki yöntem sunulmuştur. Malzeme performans gereksinimleri analiz edilip ve dökme demir, alüminyum alaşımı, titanyum alaşımı, seramikler ve kompozitler arasında alternatif çözümler değerlendirilmiştir. Malzeme seçim aşamalarında basınç dayanımı, sürtünme katsayısı, aşınma direnci, ısı iletkenlik ve özgül ağırlık ve maliyet gibi özellikler temel parametreler olarak kullanılmıştır. Alüminyum alaşımları fren disk sistemi için en uygun malzeme olduğu çalışmalar sonucunda saptanmıştır.

Mühendislik tasarımında, malzeme alternatiflerinin seçimi genellikle belirli probleme bağlı olarak farklı kriterlere bağlıdır. Bu kriterlerin farklı birimleri nedeniyle, bir normalizasyon sürecine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde birçok normalleştirme yaklaşımı vardır ve aynı zamanda belirli bir endüstriyel uygulama için optimum malzeme seçimini sağlamak için birçok algoritma geliştirilmiştir. Fakat bu yöntemler direk mühendislikte malzeme seçimi ile doğrudan alakalı değildir. Cavallini vd., (2013) bu çalışmalarında House of Quality ve Karşılaştırmalı Vikor Algoritması arasındaki entegrasyona dayalı yeni bir seçim modeli sunmuştur. İntegral Destekli Malzeme Seçimi (IAMS) olarak adlandırılan bu yaklaşım, geleneksel malzeme seçim modelinin temel eksikliğinin üstesinden gelmektedir ve seçimde gerçek bir yönlendirici olmaktadır. Bu şekilde seçimin en iyi şekilde yapılacağı savunulmuştur.

Jee ve Kang (2000), malzeme seçiminde kullanılan bilgisayar destekli programların faydasından bahsetmiştir, malzeme seçimi için Ashby yaklaşımı, ağırlık faktörünü belirlemede kullanılan entropi konsepti ile TOPSIS metodu bir arada kullanılmıştır. Volanlar için bilgisayar destekli programlar yardımıyla seçilen ve volan için günümüzde kullanılan malzemenin aynı olduğu gösterilmiştir.

Pasini vd., (2003), kirişlerdeki eğilmenin etkisini azaltabilmek ve daha rijit yapılar elde edebilmek için kesit alanının her yönde olabilecek değişimleri dikkate almış ve bunun için en uygun geometrinin seçilmesi amaçlanmıştır. Çalışmalarda kirişlerin geometrileri eğilmeyi direk etkilediği ve uygun geometri seçildiğinde eğilmenin olağandan daha az etkidiğini gözlemlemiştir

Ashby'nin malzeme indisleri, malzeme seçimi için oldukça önemlidir. Fakat indisler sadece eğilme veya sadece gerilme olarak basit mekanik talep için mevcuttur. Gerçek uygulamalar için, birleşik yüklemeler için bir malzeme indisine sahip olmak gerekir.

Bouaziz ve Masse (2012) çalışmalarında; bileşik yükleme koşullarında malzeme indisi belirlemişlerdir.

Qui vd., (2013) mekanik parçaların çevresel etkisini azaltmak için, yapısal tasarım ve malzeme seçimini entegre eden bir yaklaşım üzerinde çalışmışlardır. Çevresel etkiyi en aza indirmek amacıyla ve sıradan bir yapı optimizasyon modeline dayalı olarak bir hibrit optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Niteliksel ve kantitatif tarama önlemleri birleştirilerek isteğe bağlı bir malzeme seti oluşturulmuş, malzemelerin yaşam döngüsü çevresel etkisi Eko-indikatör yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Analitik bir yöntem kullanılarak önemli bir çevresel malzeme indisi hesaplanmıştır. Opsiyonel malzeme setindeki her malzeme için bu indeksi karşılaştırarak, en uygun malzeme bulunmuştur.

Genellikle malzeme veya imalat seçiminde sınırlamalara gidilir. İhtiyaçlar ise maksimum veya minimum olarak istenen niceliklerdir. Minimum maliyet, kütle veya hacim; maksimum verimlilik olabilir. Ashby (2011) bisiklet şasisini örnek olarak vermiştir. Bisiklet şasisinin güçlü ve dayanıklı olması istenir. Fakat sonsuz bir dayanıklılık söz konusu olamayacağı için bir limit koyulur. Bu yüzden güçlülük ve dayanıklılık sınırlamalara girer. Yarış bisikleti için ise kütlenin düşük olması istenir. Kütlenin azaltılması minimuma düşürülmesi ise ihtiyaca girer. Yüksek mukavemetli, düşük kütleli bir bisikletin fiyatının da optimumda tutulması gerekir. Optimum fiyat da ihtiyaçlara örnek verilmiştir. Farklı bilgisayar programları ile sınırlamaları ve ihtiyaçları belirleyerek, malzeme ve imalat yönteminin seçilmesi incelenmiştir.

Malzemeler veya imalat yöntemleri hakkında nümerik bilgiler, grafikler, özellikler ve tanımlar içerebilir. Ashby vd., (2007) yaptıkları çalışmada; örnek olarak bilgisayar tabanlı seçim kataloğu CES sistem verilmiştir. Böyle bir katalog malzemeler ve imalat yöntemleri için benzersiz bir bilgi birikimi sağlamaktadır.

Ashby (1999) tekil yükleme durumlarında çeşitli şartlar için malzeme indisleri ortaya atmıştır. Eğilmeye zorlanan, hafif ve rijit olması istenen bir kiriş için en iyi performansı veren malzeme indisi denklem (2.1) olarak belirlenmiştir.

$$M = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (2.1)$$

Malzeme indisi ne kadar büyük olursa seçilen malzemenin performansı o kadar yüksek olur. Çekiye zorlanan, hafif ve güçlü olması istenen bir bağlama çubuğu için en iyi performansını veren malzeme indisi denklem (2.2) olarak belirlenmiştir.

$$M = \frac{\sigma_f}{\rho} \quad (2.2)$$

Çekiye zorlanan, hafif ve rijit olması istenen bir bağlama çubuğu için en iyi performansı veren malzeme indisi denklem (2.3) olarak belirlenmiştir.

$$M = \frac{E}{\rho} \quad (2.3)$$

Previati vd., (2017); Ashby'nin formüllerinde verilenlere ek olarak, kesit şeklini ve malzemesini seçerken minimum kütleyi tanımlamak için düzeltici sabitlerin getirilmesi gerektiğini öne sürülmüşlerdir.

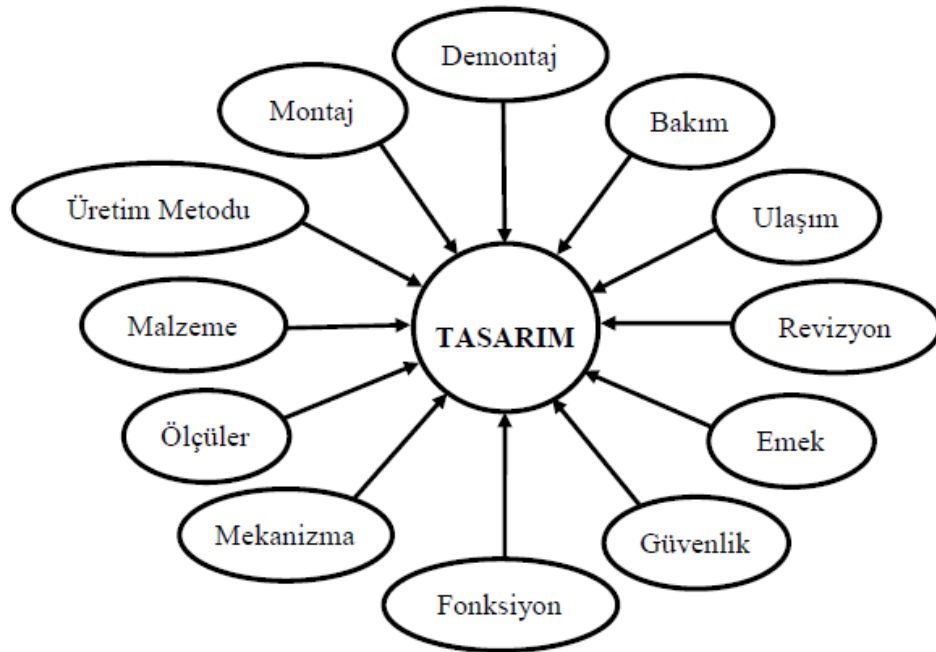
Performans endekslerinin klasik türetilmesi, yani bir sistemin davranışını temsil eden denklemlerin analitik çözümü, “basit” problemler, basit geometriler ve basit yükleme koşulları ile sınırlıdır. Çalışılan sistem çok materyalli ise veya karmaşık bir şekilde yüklenmişse bu yöntem çoğunlukla uygun olmaz. Castillo vd., (2009); sayısal modelleme ve optimasyon yöntemleri kullanılarak malzeme indislerinin çok materyalli tasarıma uygun hale getirmişlerdir.

3. TASARIMDA UYGUN MALZEMENİN BELİRLENMESİ

Tasarım, yeni bir fikri veya pazar ihtiyacını, bir ürünün üretilebileceği ayrıntılı bilgilere dönüştürme sürecidir. Tasarımda birçok kısıtlayıcılar vardır. Bu kısıtlayıcıların değer aralıklarından çıkılmaması gerekmektedir. Bunun yanı sıra tasarımcı istenilen fonksiyonu yerine getirecek tasarımı elde etmek için serbest olduğu ve tamamen tasarımcıya bağlı kriterler de vardır. Normalde, malzeme seçimi tasarım tarafından belirlenir. Ama bazen tam tersi olur, yeni bir malzeme bir tasarımı olur hale getirebilir.

3.1 Kısıtlayıcılar

Tasarım yapılırken her zaman belirlenen koşullara uyulması gerekir. Aksi takdirde tasarımda başarısızlık meydana gelir. Tasarımda birçok kısıtlayıcı vardır. Tasarımcı bunları göz ardı edemez. Aksi takdirde tasarım fonksiyonunu yerine getiremez ve çalışma başarısız olur.



Şekil 3.1. Kısıtlayıcılar (Hatamura 2006).

Tasarlanan bir fonksiyon için en önemli kısıtlayıcılardan biri malzemedir. Çünkü tasarımcı için mevcut malzeme sayısı çok fazladır. Mevcut malzeme sayısı 160.000'dan fazla ve her geçen gün bir yenisi eklenmektedir. Malzeme seçimi için birçok yöntem geliştirilse de bu yöntemler sadece bir yol göstericidir. Tasarımcının bilgi birikimi malzeme seçiminde en önemli etkidir (Hatamura 2006).

3.2 Malzemelerin Sınıflandırılması

Mevcut malzeme sayısı 160.000'dan fazla ve her geçen gün bir yenisi eklenmektedir. Her bir malzeme farklı yapı ve farklı özellikler taşımaktadır. Birbirine yakın yapıdaki malzemeler ana başlık altında toplanarak malzemeler sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma tasarım için de kolaylık sağlamaktadır. Mühendislik malzemelerini temel olarak 4 ana başlıkta sınıflandırılmaktadır ve özellikleri Çizelge 3.1' de verilmiştir.

- Metaller
- Seramikler
- Polimerler
- Kompozitler

Çizelge 3.1. Mühendislik malzemelerin sınıflandırılması (Granta Design, 2014).

Özellikler	Metaller	Seramikler	Polimerler	Kompozitler(CFRP)
Çekme dayanımı (N/mm ²)	200-2200	10-800	5-100	550-1000
Yoğunluk (g/cm ³)	2-20	2-17	1-2	1,5-1,6
Sertlik	Orta	Yüksek	Düşük	Düşük
Elastisite modülü (N/mm ²)	1-20.10 ⁴	15-70.10 ⁴	0,7-3,5.10 ³	7-15.10 ⁴
Ergime noktası (°C)	200-3500	2000-4000	70-200	-
Termal genleşme	Orta	Düşük	Yüksek	Düşük
Termal iletkenlik	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Elektrik iletkenliği	İletken	Yalıtkan	Yalıtkan	Yarı iletken

3.2.1 Metaller

Metaller de kendi içinde sınıflandırılır. Mühendislikte yaygın olarak kullanılanlar;

- Çelikler
- Dökme Demirler
- Alüminyum ve Alaşımları
- Bakır ve Alaşımları
- Çinko ve Alaşımları
- Titanyum ve Alaşımları

- Mg ve Alaşımları

Metaller;

- Elastisite Modülleri büyütür.
- Elektrik iletkenlikleri iyidir.
- Korozyona karşı dirençleri düşüktür
- Yüksek sıcaklarda sürünmeye uğrarlar
- Her metalin kendine özgün özelliği vardır.
- Alaşımlama, mekanik işlem, ısı işlem ile güçlendirilirler.

3.2.2 Seramikler

Mühendislikte kullanılan seramiklere örnek olarak; silika, soda camı, çimento, reflektör, silikon karbidler, silikon nitritler ve oksitler verilebilir.

Seramikler;

- Metaller gibi şekillendirilmesi kolay değildir.
- Aşınmaya karşı dirençlidirler, yüksek sıcaklıklarda dayanımını korurlar.
- Süneklikleri yoktur.
- Elastisite modülleri yüksektir.
- Çekme dayanımları zayıf, gevrek kırılırlar. Basma çekmenin 5 katı kadardır.

3.2.3 Polimerler

PVC, PTFE, polietilen, polikarbonat, pamuk, doğal ve sentetik plastikler mühendislik uygulamalarında yaygın kullanılan polimerlerdir.

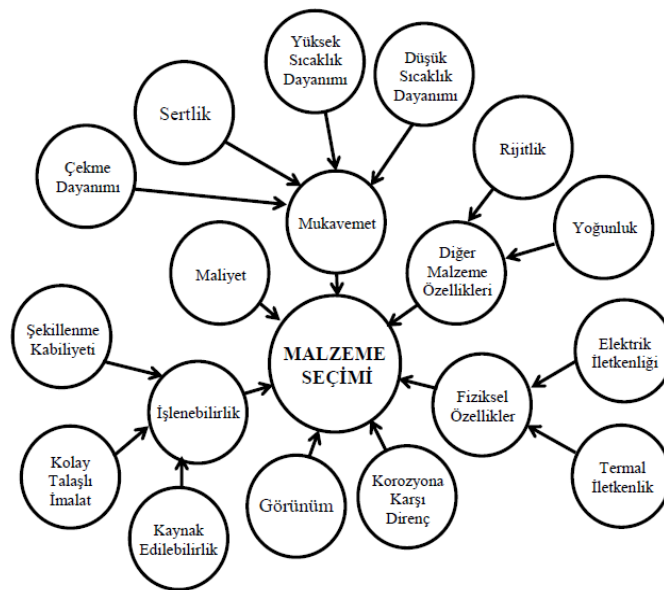
- Yumuşaktırlar.
- Yoğunlukları düşüktür.
- Elektrik dirençleri yüksektir.
- Yanabilirliği vardır.
- Toklardır.

3.2.4 Kompositler

GFRP, CFRP kompozitlere örnek olarak verilebilir. Belirleyici özellikleri yoktur. Diğer malzemelerin önemli özellikleri kompozitlerle elde edilmeye çalışılır (Aktaş, 2015).

3.3 Malzeme Seçimi

Tasarımda malzeme seçimi başlı başına incelenmesi gereken bir konudur. Malzeme seçimi yapılırken fonksiyonu yerine getirecek uygun maliyetli malzeme seçilmesi ana hedeftir. Malzemelerin doğada bulunurluğu ve elde edilirliliği o malzemenin maliyetini belirler. Maliyeti aza indirmek istenirken istenilen malzeme özelliklerinden ödün verilmesi gerekebilir. Fakat fonksiyonu yerine getiremeyecek bir malzeme seçmek tasarımı başarısız yapar. Bu yüzden malzeme seçimindeki kısıtlayıcıları dikkate alarak optimum malzeme seçimi yapılması gerekmektedir. Şekil 3.2’ de malzeme için kısıtlayıcılar verilmiştir.



Şekil 3.2. Malzeme seçiminde kısıtlayıcılar.

Malzeme seçiminde maliyet ile birlikte, mukavemet, fiziksel özellikler görünüm vd. dikkate alınmalıdır. Müşteri gözüyle bakıldığında tasarımın fonksiyonu yerine getirmesinin yanı sıra göze hoş gelmesi de istenir veya yakıt tüketimi dikkate alındığında bir otomobil ekipmanının hafif olması istenir.

Her malzemenin iyi ve kötü özellikleri vardır. Seçim yapılırken malzemeden istenilen özellikler belirlenmeli daha sonra malzeme araştırması yapılmalıdır. Çok sayıda

malzeme vardır sınırları belirlemek malzeme seçiminde tasarımcıyı belirli bölgelere odaklamasını sağlayıp seçimi kolaylaştırır. Tasarıma göre kısıtlayıcılar değişmektedir. Bu yüzden her tasarım için malzeme kütüphanesinde odaklanılması gereken bölge de değişmektedir.

Literatürde malzeme seçimini doğru yapılabilmesi için çok sayıda çalışma yapılmış, yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmaların ortak amacı tasarımın ve tasarımcının belirlediği kriterleri dikkate alarak uygun malzeme seçimi yapılmasını sağlamak ve ikilemleri ortadan kaldırmaktır. Bu yöntemler çok kriterli karar verme sistemleri olarak ifade edilmektedir (Shanian ve Savadogo, 2006).

İkiden fazla aday malzeme arasından seçim yaparken birden fazla özelliğin çatıştığı durumlarda çok kriterli karar verme mekanizması kullanılır. Mekanizma üç şeye ihtiyaç duyar. Alternatifler, kriterler ve kriterler arasında ağırlık katsayıları (Chatterjee vd., 2009) Bu mekanizma ikiye ayrılır: Çok amaçlı ve çok özellikli karar verme mekanizmaları (Chauhan ve Vaish, 2012).

Çok amaçlı karar verme mekanizması fazla sayıda birbirleriyle çatışan malzemelerin arasında seçim yaparken kullanılır. Çatışan özelliklerin sınırları belirli olmalıdır. Birbirleriyle çatışan karakteristik özelliklerin oluşturduğu performans indisleriyle malzemeler kendi aralarında sıralanabilir. Oluşturulan performans indislerinin değerleri bizi doğru seçime yönlendirir. Ashby yöntemi buna dayanmaktadır.

Çok özellikli karar verme sisteminde matematiksel modellemeler kullanılmaktadır. Bu sistemde aday malzemeler vardır ve sayıları çok fazla değildir. Bu aday malzemelerin özellikleri ağırlıklandırma işleminden sonra matematiksel modeller ile optimizasyona tabii tutulur. Bu yöntem kesin bir sonuç verir. Çünkü belirli bir incelemeden geçen malzemeler aday malzeme olarak atanmaktadır ve sayısı olabildiğince en aza indirilmiş ve seçim basitleştirilmiştir. Çok amaçlı karar verme sisteminde ise oluşturulan malzeme indisleri ile ilk eleme yapıldıktan sonra tasarımcı kalan malzemelerde tecrübesine dayalı seçim yapar. Bu iki sistemin birbirinden farkı budur. Çok özellikli karar verme sistemini kullanarak çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak; PSI (Preference Selection Index), PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation Method), AHP (Analytical Hierarchy Process), ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality), TOPSIS

(Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) verilebilir.

3.3.1 TOPSIS yöntemi

TOPSIS yöntemi, seçilen alternatifin (malzemenin) ideal çözüme en kısa, negatif-ideal çözüme de en uzun mesafeye sahip olmasına dayanmaktadır (Opricovic ve Tzeng 2004). Aday malzemelerin ideale yakınlığını inceler. Özelliğe göre negatif-ideale veya pozitif-ideale yakınlığı istenebilir. Örneğin yoğunluğun düşük olması istenilen çalışmalarda yoğunluk kriterinin negatif-ideale yakın olması istenir. Yöntem sınırsız sayıda malzeme ve malzeme özelliklerini inceleme fırsatı sağlar ve hiçbir özellik tek başına dikkate alınmaması nedeniyle malzemenin tüm özellikleri birbiriyle karşılaştırılır. Malzeme özelliklerinin karşılaştırılma yapılabilmesi için normalizasyon formülü kullanılarak bütün malzeme özelliklerin değerleri 0 ile 1 arasında ifade edilecek şekle getirilir ve birbirleriyle aynı skalada olurlar. Shanian ve Savadogo (2006); TOPSIS' in malzeme seçimi problemi için iyi bir potansiyel veren bir dizi özelliği olduğunu belirtmektedir. TOPSIS' in çıktısı, her alternatif için sayısal bir değeri olan sıralı bir listedir. Uygunluk ve yeterliliğin karşılaştırılmasına izin verirken diğer teknikler yalnızca listeyi verebilir. Yöntem, tasarımcı tarafından tanımlanan önceden belirlenmiş bir ağırlıklandırma kriterleri sistemini kullanır. Bu yöntem ikili karşılaştırmalardan kaçınır, bu da onu sistematik ve hızlı hale getirir (Shanian ve Savadogo, 2006).

TOPSIS prosedürü, birimlerdeki farklılıkları ortadan kaldırmak için malzeme özellik değerlerinin normalleştirilmesi ve ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisini oluşturmak için ağırlıkların uygulanmasıyla başlar. İdeal ve negatif ideal çözümler daha sonra belirlenir. Yüksek bir değerin daha iyi olduğu bir durumda, alternatifler kümesindeki en yüksek değer ideal olarak seçilir. Adayların daha sonra ideal çözüme göreceli yakınlığı verecek şekilde hesaplanır ve bu adayların sıralı bir listesinin belirlenmesini sağlar (Opricovic ve Tzeng, 2004).

3.3.2 VIKOR yöntemi

VIKOR, TOPSIS gibi kriterlere göre alternatifleri sıralar ve seçer. Bunu yaparken ideale yakınlık yaklaşımını kullanır. Bu teknik TOPSIS' e çok benzerdir ancak farklılıklar vardır.

Yöntemler malzeme özellik değerlerinin normalleştirilmesini farklı yollar ile yapmaktadır. VIKOR, doğrusal bir normalleştirme kullanır, TOPSIS ise normalleştirilmiş değerin belirli bir ölçütün farklı birimleri için değişebileceği vektör normalizasyonu kullanır. VIKOR, yalnızca ideal değerden uzaklığı irdeler, TOPSIS ideal ve anti-ideal değerleri kullanır. Sonuç olarak her ikisi de sıralı bir liste oluştururlar. VIKOR yönteminde optimum alternatif ideale en yakın olanıdır, TOPSIS hem ideal hem de anti-ideal değerlerin mesafesinden hesaplanarak sıralama yapar. VIKOR yönteminde tasarımcının yaptığı ağırlıklandırmayı irdelleyen bir sistemde olduğu için hata payını aza indirir.

3.3.3 ELECTRE yöntemi

Yöntem 1968 yılında Roy tarafından geliştirilmiş çok özellikli seçme mekanizmasıdır. Yöntem birçok alanda kabul edilmesine karşın kullanımı yaygın değildir.

Her bir özellik birbirleriyle kıyaslanarak sıralama yapılmaktadır. İstenilenden kritik seviyede düşük olan özelliklere sahip aday dikkate alınmaz. Zaten kritik düşük özelliğe sahip olan adaylar yöntem tarafından alt sıralara atılmaktadır

ELECTRE I, II, III, IV ve TRI olmak üzere çok sayıda ELECTRE formu vardır ve bu formların tümü aynı temel kavramları kullanır, ancak işlemde ve problemin türüne bağlı olarak farklılık gösterir (Marzouk, 2011). ELECTRE, malzeme özellikleri veya ağırlıkları gibi belirsiz verileri kullanma becerisi nedeniyle diğer çok özellikli karar verme yöntemlerinden daha üstündür. Malzeme özelliklerindeki sayısal olmayan özellikleri de kullanabilir. Örneğin; kararlılık, korozyon dayanımı, geçirgenlik. Sayısal ve sayısal olmayan değerleri dikkate alarak sıralama yapmaktadır.

Shanian ve Savadogo (2006); yaptıkları çalışmada Electre IV'ü kullanmıştır. Birden fazla malzeme birinci, yalnız bir tane malzeme sonuncu gelmiştir. Yazarlar kendileri yorum yaparak doğru malzemeyi seçmişlerdir. Electre yöntemi malzeme seçiminde bir yol göstericidir, kesin sonuç veremeyebileceği bu çalışmada gösterilmiştir

3.3.4 AHP yöntemi

AHP malzeme sıralama yöntemidir. Bunu yaparken ilk olarak aday malzeme özelliklerine ağırlık katsayıları atanmaktadır. Tasarım göre önemli olan malzeme özelliklerinin ağırlık katsayısı daha yüksek olmalıdır.

Daha sonra malzeme özellikleri 0 ile 1 arasında ifade edebilecek şekilde normalizasyon işlemine tabii tutulur. Bu sayede bütün özellikler aynı birimde ifade edilmiş olmaktadır.

Aynı birimde ifade edilen malzeme özellikleri ikili olarak birbirleriyle karşılaştırılmaktadır. Bu işlem basit matematiksel formüller ile defalarca yapılmaktadır. İkili karşılaştırma yaptığı için çok özelliğin karşılaştırılacağı uygulamalar için uygun değildir. TOPSIS ve VIKOR yöntemi çok özelliğin karşılaştırılacağı uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir.

3.3.5 PSI yöntemi

PSI yöntemi Maniya ve Bhatt'ın 2010'da ortaya koyduğu malzeme seçimi yöntemidir.

PSI yönteminde, nitelikler arasında göreceli bir önem atamak gerekli değildir. Yani bu yöntemde karar verme problemlerine dahil olan özelliklerin ağırlıklarının hesaplanmasına gerek yoktur. Çünkü malzemelerin seçilen herhangi bir özelliğinde en yüksek değere sahip olan malzemeye göre diğer malzemeler sıralanır. Her malzemenin karşılaştırılan özelliklerinde de bu yöntem uygulanır.

Yöntem kullanışlıdır, yöntem ağır hesaplamalar içermez. Maniya ve Bhatt (2010) yaptıkları çalışmada PSI yöntemi ile TOPSIS yöntemini aynı örneğe uygulayarak yakın sonuçlar bulmuştur. Bu şekilde PSI yönteminin güvenilirliğini savunulmuştur.

3.3.6 PROMETHEE yöntemi

PROMETHEE karar vermeye uygun bir şekilde sıralama verdiği için çok kriterli seçme mekanizmaları içerisinde önemli bir yere sahiptir. Yöntem Brans ve Vincke tarafından 1985'de ortaya atılmış daha sonra 1986'da Brans, Vincke ve Mareschal tarafından geliştirilmiştir.

PROMETHEE 1 alternatiflerin parçalı bir şekilde sıralama yapılmasına olanak sağlarken, PROMETHEE 2 bütün alternatifleri bir arada sıralar. Yöntem çok kriterli seçme mekanizmaları arasında kendini kanıtlamıştır ve bunun da birçok uygulaması vardır. Yapılan çalışmada PROMETHEE yönteminin dışında diğer yöntemlerde şeker borularının malzeme seçimi için kullanılmıştır ve çıkan sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu yöntem de çıkan sonuç ile diğer sonuçlar uyum içerisinde değildir, çıkan sıralamalarda sadece PROMETHEE yöntemi farklı bir sıralama vermiştir.

Çünkü yöntem sadece malzemelerin iyi yönlerine bakmıştır, kötü yönlerini göz ardı ederek onları o yolla sıralamıştır (Anojkumar vd. 2014).

Yöntem sayısal değeri olan özelliklere uyum sağlarken sayısal değeri bulunmayan özelliklerin değerlendirilmesinde sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Bu sebeple nümerik olarak verilmeyen kriterler; örneğin korozyona karşı direnç, ışık geçirgenliği, dökülebilirlik, vs., sayısal olarak ifade edilmelidir. Bu sebeple belirsiz mantık (fuzzy logic) yöntemi kullanılır. Bu yöntemle bir kriter için belirli olan değer, hiyerarşisine göre sayısal değer almaktadır. Bir başka konuda kriterlerin değerliliği. Yani bir kriter diğer bir kritere göre ne kadar değerli, bunu da belirlemek gerekir. Bu sebeple de AHP (Analytical Hierarchy Process) kullanılarak hangi kriter, hangi kritere göre ne kadar değerli o belirlenir. Kriterlerin değerliliği belirlendikten sonra PROMETHEE yöntemi ile malzemeler kendi aralarında sıralanabilirler (Rao, 2013).

4. ASHBY MALZEME SEÇİM YÖNTEMİ

Ashby tekil yükleme durumlarında çeşitli şartlar için malzeme indisleri ortaya atmıştır.

Malzemeden istenen özellikleri ifade eden denklemler kombine edilerek malzeme indisleri oluşturulmaktadır. Malzeme indisleri malzeme özelliklerini taşıyan terimleri içerir (Ashby, 2011)

Şekil 4.1’de şematik çizimi verilen çekiye zorlanan, hafif ve güçlü olması istenen bir bağlama çubuğu için malzeme indisi belirlenirken;



Şekil 4.1. Bağlama çubuğu.

L ve F önceden belirlenen değerlerdir. Sabit kabul edilmektedir. Kesitle (A) oynayarak kütle azaltılabilir. Bu sınırlamadır, kısıtlamadır

A, F çekme yükünü taşıyacak şekilde yeterli olmalıdır.

$$\text{Yani; } \frac{F}{A} \leq \sigma_f \text{ olmalıdır.} \quad (4.1)$$

F yükü sonucu doğan gerilme $\sigma < \sigma_f$ olmalıdır.

$$(4.1) \text{ den } A = \frac{F}{\sigma_f} \text{ yazılır} \quad (4.2)$$

$m = A \cdot L \cdot \rho$ denkleminde (4.2) yerine yazılır.

$$m = \left(\frac{F}{\sigma_f} \right) \cdot L \quad (4.3)$$

(4.3) eşitliği $m = F \cdot L \cdot \left(\frac{\rho}{\sigma_f} \right)$ şeklinde yazılır.

$$P = f(F, G, M)$$

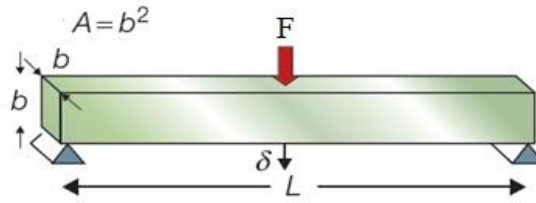
$$P = [\text{Fonksiyonel şartlar} \times \text{Geometrik parametreler} \times \text{Malzeme özellikleri}]$$

F önceden belirlendi, L önceden belirlendi. Son parantez ise dikkatli incelersek malzeme özelliği (Malzeme İndisi) taşıdığını görülmektedir.

Maximum performans ise bu ifadeyi ters çevirdiğinde elde edilir. Denklem (4.4) de gösterildiği üzere maksimum mukavemete sahip, aynı zamanda min. kütleli çubuk malzeme olacaktır.

$$M = \frac{\sigma_f}{\rho} \quad (4.4)$$

Şekil 4.2' de şematik çizimi verilen eğilmeye zorlanan, hafif ve rijit olması istenen bir kiriş için malzeme indisi belirlenirken;



Şekil 4.2. Eğilmeye zorlanan kiriş.

Kirişin rijitliği bir sınırlama ile karşılaşsın. Yani F yükü altında (δ) sehiminden fazla sehim yapmasın

Fonksiyon: Kiriş görevi yapmak

Sınırlamalar: Uzunluk (L) önceden belirli.

$$(S) \text{ rijitliği için } S = \frac{F}{\delta} \text{ ve } \delta = \frac{F.L^3}{C.E.I} \quad (4.5)$$

$$\text{Kütle için } m = A.l.\rho \quad (4.6)$$

$$\text{Kare kirişler için } I = b^4 / 12 = A^2 / 12 \quad (4.7)$$

$$S = \left(\frac{C.E.I}{L^3} \right) = \left(\frac{C.E.A^2}{12.L^3} \right) \quad (4.8)$$

Serbest değişken olan A (4.8) denkleminde çekilip (4.6) denkleminde yerine yazılırsa rijitlik ve hafiflik tek bir eşitlikte ifade edilmiş olacaktır.

$$m = \frac{(12.L^3.S)^{1/2}}{(C.E)^{1/2}} . L. \quad (4.9)$$

(4.9) eşitliği düzenlenip malzeme özelliği taşıyan indisler bir araya getirilerek malzeme indisi elde edilmiş olur.

$$m = \left(\frac{12.S}{C.L} \right)^{1/2} . L^3 . \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \quad (4.10)$$

$$M = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (4.11)$$

Şekil 4.3’ da ki gibi burulmaya maruz kalan bir çubuk için malzeme indisi, yine yukarıdaki yöntem kullanılarak denklem (4.12) olarak elde edilir.

$$M = \frac{G^{1/3}}{\rho} \quad (4.12)$$



Şekil 4.3. Burulmaya zorlanan elaman.

Ashby tekil yükleme durumlarında çeşitli şartlar için malzeme indisleri ortaya atmıştır.

Eğilmeye zorlanan, hafif ve rijit olması istenen bir kiriş için en iyi performansı veren malzeme indisi denklem (4.11) olarak belirlenmiştir. Malzeme indisi ne kadar büyük olursa seçilen malzemenin performansı o kadar yüksek olur.

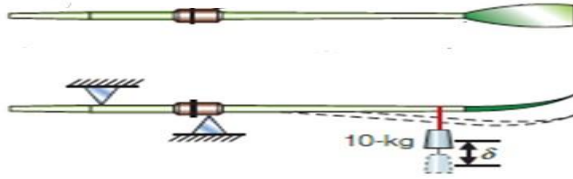
Çekiye zorlanan, hafif ve güçlü olması istenen bir bağlama çubuğu için en iyi performansını veren malzeme indisi denklem (4.4) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Ashby'nin malzeme indisleri.

Fonksiyon / Amaç / Sınırlamalar	Malzeme İndisi
Rot kolu / min. ağırlık / rijitlik belirlenmiş	$\frac{E}{\rho}$
Kiriş / min. ağırlık / rijitlik belirlenmiş	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
Kiriş / min. ağırlık / akma sınırı belirlenmiş	$\frac{R_e^{2/3}}{\rho}$
Kiriş / min. maliyet / rijitlik belirlenmiş	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
Kiriş / min. maliyet / akma sınırı belirlenmiş	$\frac{R_e^{2/3}}{C_m \rho}$
Termal yalıtım / min. maliyet / ısı akısı belirlenmiş	$\frac{1}{\lambda C_p \rho}$
Elektromanyetik / max. çekim alanı / ısı değişikliği belirlenmiş	$\frac{C_p \rho}{P_e}$

E: Elastisite modülü, ρ : Yoğunluk, R_e : Akma sınırı, C_m : Fiyat, C_p : Isı kapasitesi, P_e : Elektirksel direnç.

Asbhy, malzeme indislerini ile yine kendinin oluşturduğu diyagramlarda kullanarak malzeme seçimini yapmaktadır.



Şekil 4.4. Bot küreği.

Şekil 4.4' deki bot küreğini eğilmeye çalışan bir kiriş gibi düşünebiliriz. Kürek hafif ve sert olmalı. Bu durumlar için malzeme indisi denlem (4.13) gibidir. Malzeme indisinin eğimi belirlenir.

$$\frac{E^{1/2}}{\rho} = C \quad (4.13)$$

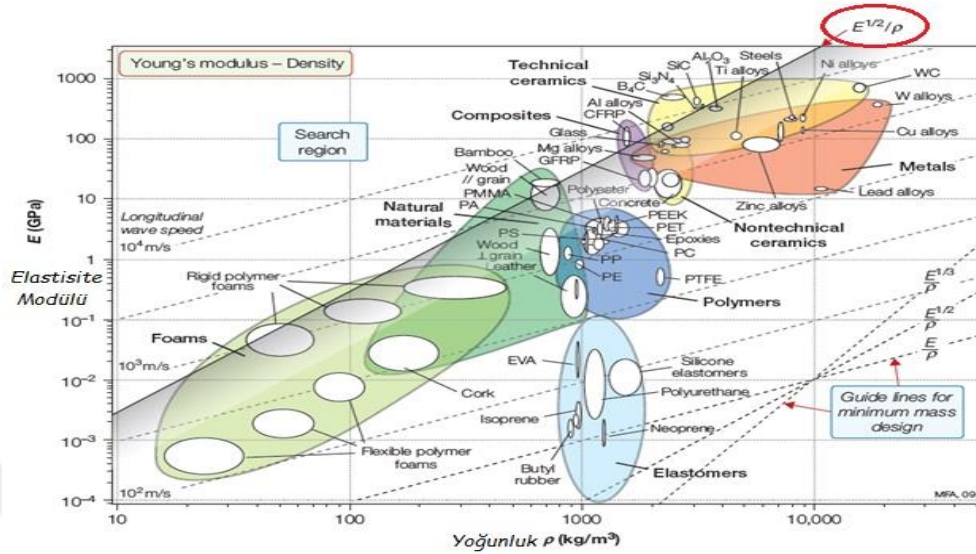
(4.13) denklemini logaritması alınırsa, (4.14) denklemi elde edilir. (4.14) denklemi 2 ile çarpılarak ifade doğru denklemine benzetirilir. (4.15) denkleminin eğimi 2 dir.

$$\frac{1}{2} \log E - \log \rho = \log C \quad (4.14)$$

$$\log E = 2 \log \rho + 2 \log C \quad (4.15)$$

$$m=2 \quad (4.16)$$

Şekil 4.5'deki elastisite modülü – yoğunluk diyagramında $m=2$ olan doğru çizilir.



Şekil 4.5. Ashby'nin elastisite modülü – yoğunluk grafiği.

Diyagramdan seramik, ağaç ve kompozit malzemeler seçim olarak gözükmektedirler.

Malzeme

Yorum

1. Ağaç Ucuz ama, doğal değişkenliği fazla
2. CFRP Ağaç kadar iyi ve kontrol edilebilir
3. Seramik..... Tokluk düşük maliyet yüksek

Seramik tokluğu düşük olduğundan elenir. Ağaç ve kompozit en uygun malzemelerdir

5. POLİMERİK MALZEMER İLE PSEUDO-ELASTİK DİZAYN

Polimerlerin elastik olmayan deformasyon davranışlarının modellenmesi, artan polimer kullanımıyla birlikte giderek daha çok ilgi görmektedir. Bu ilgi, polimerlerin endüstri ve biyomedikal alanlarındaki kritik rollerinden kaynaklanmaktadır. Ancak, polimerlerin karmaşık davranışları ve mevcut deneysel verilerin yetersizliği, yapısal modelleme sürecini zorlaştırmaktadır.

Etkili bir yapısal model oluşturmak için polimerlerde gözlemlenen bazı anahtar özellikler dikkate alınmalıdır (Colak ve Dusunceli, 2006; Drozdov ve Dusunceli, 2013; Dusunceli vd., 2017):

1. **Yüksek Oranda Doğrusal Olmayan Gerinim Hızı Bağımlılığı:** Polimerlerin mekanik davranışları, yükleme hızına bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Bu durum, malzemenin zamanla farklılaşan yapısal özelliklerini gösterir.
2. **Doğrusal Olmayan Boşaltma:** Yükleme ve boşaltma sırasında polimerler doğrusal olmayan bir davranış sergiler; bu durum, malzemenin önceki yükleme geçmişine bağlı olarak gerilim-gerinim ilişkilerini etkiler.
3. **Hidrostatik Basınca Duyarlılık:** Polimerlerin akma davranışı çevresel faktörlerden, özellikle hidrostatik basınçtan etkilenir. Bu, polimerlerin değişik ortam koşullarında nasıl davrandığını anlamak için önemlidir.
4. **Döngüsel Gevşeme:** Döngüsel yükleme altında polimerlerin yumuşama eğilimi göstermesi, zamanla malzemenin mekanik özelliklerini etkileyebilir ve döngüsel yükleme uygulamalarında dikkate alınması gerekir.
5. **Sıfır Gerilimde Toparlanma:** Polimerlerin sıfır gerilim altındaki toparlanma davranışı, deformasyon sonrası malzemenin eski haline dönme kapasitesine işaret eder ve elastik-viskoelastik özelliklerin bir bileşimini yansıtır.

Bu özelliklerin dikkate alınması, polimerlerin mekanik davranışlarını anlamak açısından büyük önem taşır. Doğru yapısal modeller, polimerlerin performans ve dayanıklılık öngörülerini sağlar ve bu, yeni tasarımların geliştirilmesini destekler. Bu sayede, biyomedikal implantlardan otomotiv parçalara kadar geniş bir alanda polimerlerin etkili kullanımı sağlanabilir. Ayrıca, bu tür araştırmalar malzeme bilimi, mühendislik ve tasarım süreçlerini iyileştirerek inovatif ve sürdürülebilir çözümler

sunabilir. Polimerlerin mekanik davranışlarının daha kapsamlı anlaşılması, sanayi ve akademi alanında daha fazla yenilik ve araştırma için temel teşkil eder.

Yarı kristal polimerlerin mekanik davranışı, bu malzemelerin birçok mühendislik uygulamasında yaygın şekilde tercih edilmesini sağlayan önemli bir araştırma alanıdır. Bu polimerler, kristal yapıya sahip olmaları sayesinde hem elastik hem de viskoelastik özellikler sergileyerek çeşitli yükleme durumlarında kendine özgü davranışlar gösterir. Polimerik malzemelerin öne çıkan olumlu özellikleri şunlardır (Caelers vd., 2016; Detrez vd., 2011; Dusunceli, 2010, 2012; Dusunceli ve Drozdov, 2017; Jourdan vd., 1989; Senden vd., 2013):

1. **Aşınmaya Dirençli Olması:** Yarı kristal polimerler, aşınma ve yıpranmaya karşı dirençli olmaları nedeniyle otomotiv, inşaat ve ambalaj gibi sektörlerde güvenle tercih edilir.
2. **Düşük Üretim Maliyeti:** Üretim süreçlerinin daha basit ve daha az enerji gerektirmesi, yarı kristal polimerleri düşük maliyetli seçenekler haline getirir; bu durum, maliyet odaklı projelerde önemli bir avantaj sağlar.
3. **Yüksek Mukavemet:** Yarı kristal polimerler, yüksek mukavemet değerleri sunarak yapısal uygulamalarda güvenilir bir performans sağlar; bu özellik, özellikle mekanik yüklerin fazla olduğu alanlarda önem taşır.
4. **Yüksek Yük Taşıma Kapasitesi:** Bu polimerler, belirli bir sınır dahilinde yüksek yük taşıyabilme kapasitesine sahiptir ve bu nedenle mühendislik alanında yaygın olarak kullanılır.
5. **Kolay İşlenebilirlik:** Yarı kristal polimerlerin şekillendirilmesi ve işlenmesi oldukça kolaydır; bu durum, tasarımcıların çeşitli formlarda ve uygulamalarda bu malzemeleri rahatça kullanabilmesini sağlar.

Bu özelliklerin birleşimi, yarı kristal polimerleri mühendislik ve sanayi için cazip bir seçenek haline getirirken, bu malzemelerin mekanik davranışlarını anlamak, uygulama alanlarını genişletmek ve performanslarını artırmak açısından büyük önem taşır.

Polimerik malzemeler ve polimerik kompozitler, çalışma koşullarına göre yük, sıcaklık, nem ve zaman gibi faktörlerin etkisi altında çeşitli davranışlar sergileyebilir. Bu malzemelerin zamana bağlı değişen özellikleri göz önünde bulundurularak

konstrüksiyonda kullanılabilmesi için, mekanik ve hidrotermal özelliklerin yanı sıra, mukavemet ve hasar gelişimi gibi yapısal özelliklerinin zaman içerisindeki değişimlerinin güvenilir bir şekilde öngörülmesi gerekmektedir.

Polimerik malzemelerin sünme davranışını açıklamak amacıyla çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiş olup, bu modeller kısa süreli testlerle zaman içerisindeki deformasyonların belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Literatürde en çok atıfta bulunan iki temel model Boltzmann'ın modeli ve Schapery'nin modelidir (Schapery, 1968). Bu modeller, sırasıyla doğrusal ve doğrusal olmayan davranışları açıklamak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Ayoub vd., 2010; Costa vd., 2015; Das ve Roy, 2019; E. Krempl, 1999; Matsubara vd., 2020; McClung ve Ruggles-Wrenn, 2008; Nikoukalam ve Sideris, 2019).

Boltzmann süperpozisyon ilkesinin yalnızca düşük gerilim ve gerinim seviyelerinde geçerli olduğu kabul edilir. Çoğu malzeme, belirli koşullar altında doğrusal davranış sergiler; yani gerilim, gerinim, zaman ve sıcaklık gibi değişkenlerin dar aralıklarında doğrusallığa yaklaşır. Ancak, bazı malzemeler bu değişkenlerden bir kısmının geniş aralıklarında doğrusal olmayan davranış göstermektedir (Brooks, Duckett ve Ward, 1999; Gordeyev ve Ward, 1999; Mijovic, 1994).

Schapery tarafından geliştirilen basit integral bünye denklemi, termodinamik teoriye ve sünme davranışı çalışmalarına dayanan en yaygın kullanılan modellerden biridir. Schapery'nin denklemi, birçok polimer ve polimer kompozitinde zamana bağlı doğrusal olmayan davranış doğru şekilde tanımlayabilmekte olup, lineer viskoelastik özellikleri (modül ya da uygunluk) ve doğrusal olmayan viskoelastik özellikleri (gerilime bağlı dört fonksiyon) bir arada içerir. Tek eksenli yükleme durumu için bu denklem, doğrusal viskoelastik teoride kullanılan ve malzeme karakterizasyonunda basit bir uygulama yöntemi sunan Boltzmann'ın integral süperpozisyonuna oldukça benzeyen bir form göstermektedir (Erhard Krempl ve Ho, 2000; Lai ve Bakker, 1995; Tscharnuter vd., 2012).

Bu yöntemle, doğrusal olmayan davranışın doğrusallık derecesini belirlemek ve ilgili fenomeni açıklayan denklemleri uygun biçimde kullanmak amacıyla, farklı gerilme seviyelerinde sabit zamanlarda elde edilen deformasyon değerlerine dayalı isokron eğrileri oluşturulmaktadır (Drozdov ve Dusunceli, 2012, 2013; Dusunceli, 2012).

Yük taşıyan polimerik ürünlerin sonlu elemanlar analizi için uygun lineer olmayan viskoelastik modellerin eksikliği nedeniyle, tasarım mühendisleri psödoelastik yöntem olarak adlandırılan yaklaşık bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu uygulamada belirlenen yük altında gerilme-gerinim dağılımını belirlemek için bir doğrusal elastik analiz yapılır. Gerekli sıcaklık ve yükleme süresi için (genellikle polimerin üreticisi tarafından sağlanır) aynı polimerik malzeme numuneleri üzerinde yapılan çekme testlerinden uygun Young Modülü bulunur. Tasarımın başarısını sağlamak için, üründeki maksimum gerilme veya gerinim, modül seçimini belirlemek için kullanılır. Poisson oranı ν 'nin sabit bir değeri mevcut veriler varsa bu tür testlerden bulunabilir, ancak genellikle 0,35 ile 0,42 aralığında bir tahmin kullanılır (Dooling vd., 1997).

Bu yöntem oldukça basit ve korumacıdır, büyük bir güvenlik faktörü üretir. Bu aynı zamanda başlıca dezavantajıdır. Doğrusal olmayan rejimdeki gerçek polimerik üründe (gerilmeler $\sim 0.5\%$ veya daha büyük olduğunda) mekanik özellikler yapı boyunca ve zamanla değişecektir. Ürünün farklı bölgeleri farklı rijitliklere ve farklı Poisson oranı ν değerlerine sahip olacaktır (Okereke vd., 2012).

5.1 Doğrusal Viskoelastisite

Viskoelastisite teorisi, hem elastik katıların hem de viskoz sıvıların özelliklerini sergileyen malzemeleri tanımlamak için kullanılır. Doğrusal elastik katıların yapısal davranışı, gerinimin gerilmeyle orantılı olduğu Hooke yasası ile tanımlanır. Elastik katılar aynı zamanda uygulanan yük altında enerji depolama yeteneğine sahiptir, bu da yük kaldırıldıktan sonra başlangıçtaki hallerine geri dönmelerini sağlar. Elastik katılara karşılık, viskoz sıvılar Newton'un yasasına uyarlar, bu yasa gerilmenin gerinim hızına orantılı olduğunu belirtir. İdeal Newtonian sıvılar enerjiyi dağıtabilir ancak enerji depolayamazlar (Gibson, 2016). Viskoelastik veya zamana bağlı malzemeler, uygulanan yükler altında hem enerji depolama hem de enerji dağıtma yeteneğine sahiptirler ("Viscoelastic Solids (1998)", 2017). Tüm malzemeler, zaman ve/veya sıcaklık ölçeğine bağlı olarak bazı viskoelastik davranışlar sergilerleyebilirler. Örneğin, polimerik malzemeler oda sıcaklığında viskoelastik davranış sergileyebilir ve viskoelastik tepkileri, sıcaklık cam geçiş sıcaklığına (T_g) yaklaştıkça daha belirgin hale gelir. Viskoelastik malzemelere diğer örnekler arasında polimer kompozit malzemeler, cam, asfalt, buz vb. yer alır (Drake vd., 2013).

Viskoelastik davranışın iki önemli fiziksel belirtisi sünme ve gerilme gevşemesidir.

Sünme, sürekli bir yük altında bir malzemenin sürekli deformasyonudur, gerilme gevşemesi ise bir malzeme sürekli deformasyon altındayken stresin aşamalı olarak azalmasıdır. Sünme ve gerilme gevşemesi eksenel, kayma veya hacimsel deformasyonda meydana gelebilirken, bu çalışmada bir boyutlu çekme yüklemesi için sünme davranışı incelenmektedir (Sullivan ve Simsiriwong, 2018).

5.2 Sünme

Bir polimerik malzeme üzerine sabit bir yük yerleştirildiğinde, bu malzeme kompliansına orantılı bir gerinime maruz kalır. Malzeme, sonunda hasara uğrayana kadar gerinim seviyesi zamanla artar. Bir malzemenin bir yüke maruz kaldığında zamana bağlı olarak süre gelen gerinimdeki bu artış sünme olarak adlandırılır. Polimerlerde sünme oluşumu, yük taşıma uygulamalarını içeren tasarımında karşılaşılan tipik bir problemdir. Diğer birçok katıya kıyasla, polimerler, polimer zincir segmentleri arasında etki eden nispeten zayıf ara moleküler kuvvetlerden dolayı sünmeye oldukça duyarlıdır. Sternstein ve Van Buskirk, polimer sünmesini "zincir omurgasının konformasyonel değişikliklere yol açan işbirlikçi segmental hareketlerin karmaşık moleküler süreçler sonucu" olarak tanımlarlar. Konformasyonel değişikliğin seviyesi veya derecesi, polimerin özelliğine bağlıdır ve genel olarak birkaç değişkenin fonksiyonu olarak gözlemlenmiştir. Bu değişkenler; Uygulanan Gerilim Seviyesi

Gerilim Durumu: Tek eksenli germe, basınç, kayma, hidrostatik basınç veya bu gerilim modlarının daha karmaşık bir kombinasyonu. Bu değişkenler; kristalinite derecesi, çapraz bağlanma derecesi, moleküler ağırlık, plastikleştirici konsantrasyonu, dolgu/takviye içeriği, yönlendirme (Şekillendirme koşulları ve lif yönlendirme.), çevre (Özellikle sıcaklık) (Hearn, 1997).

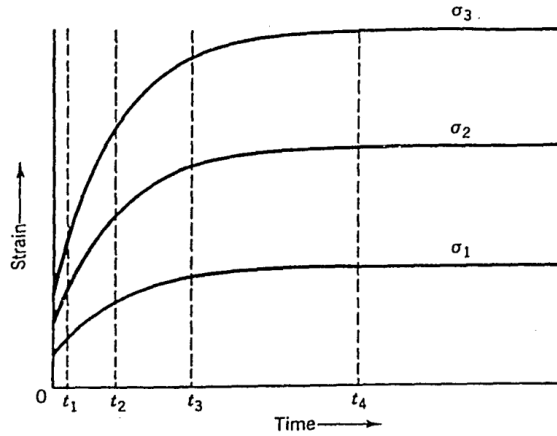
Bir malzemede viskoelastik davranışı karakterize etmek için sıkça kullanılan bir yöntem, bir numuneye anlık sabit bir gerilme σ_0 uygulanması ve bu gerilmenin test süresince sabit tutulmasıyla yapılan sünme testidir. Elde edilen deformasyon veya sünme gerilimi $\epsilon(t)$, zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülür

Sünme deneyleri genellikle bir malzemeye sabit bir yük uygulanarak ve zamanın bir fonksiyonu olarak gerinimdeki değişimin ölçüsüdür. Sünme kompliansı D , izotermal koşullar altında, denklem (5.1) olarak tanımlanır.

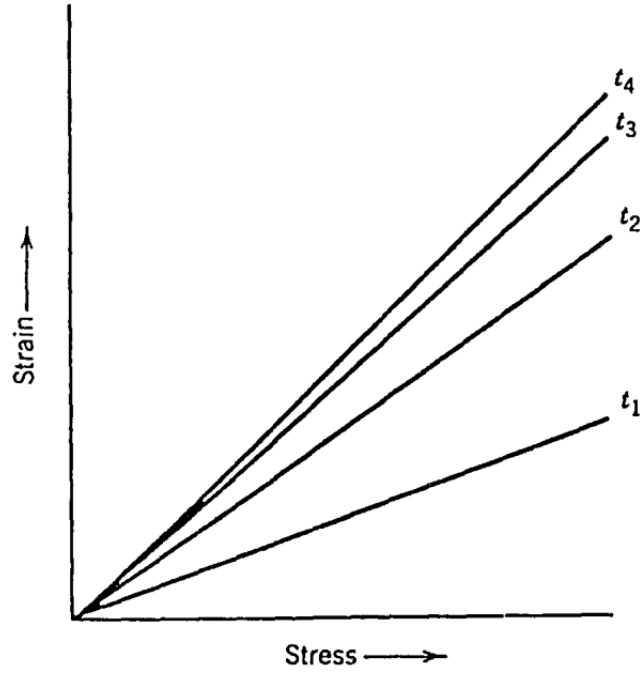
$$D(\sigma, t) = \varepsilon(\sigma, t) / \sigma \quad (5.1)$$

burada σ uygulanan mühendislik gerilmeyi ve ε ise bu gerilimden kaynaklanan gerinimi temsil etmektedir. Gerinim ε , gerilmenin uygulanmasından bir dakika sonra başlangıç gerinimine dayanmaktadır. D sembolü, çekme yada basmada gerilme uygulandığında sünme için kullanılır. Sünme kompliyansı kayma gerilmesi ile ölçüldüğünde, sembolü J olarak kullanılır (Youssef, 2022).

İzokronik sünme eğrileri, sünme davranışı hakkında önemli bilgiler sağlar. Bu veri, bir ürünü belirli bir süre boyunca (beklenen hizmet ömrü) sürekli bir yükte taşıyabilecek şekilde tasarlamak isteyen tasarım mühendisleri için özellikle yararlıdır. Parçanın beklenen ömrü için izin verilen maksimum deformasyon seviyesi bilindiğinde, mühendisin bu miktar deformasyonu üretmek için gereken gerilme seviyesini belirlemesi gerekir. Bu, çeşitli gerilme seviyelerinde gerinimin zamana karşı çizilmesi (Şekil 5.1) ve daha sonra belirli zamanlarda (parçanın önerilen hizmet ömrü) gerinimin gerilmeye göre çizilmesi (Şekil 5.2) ile yapılır (Zhao ve Koves, 2012).

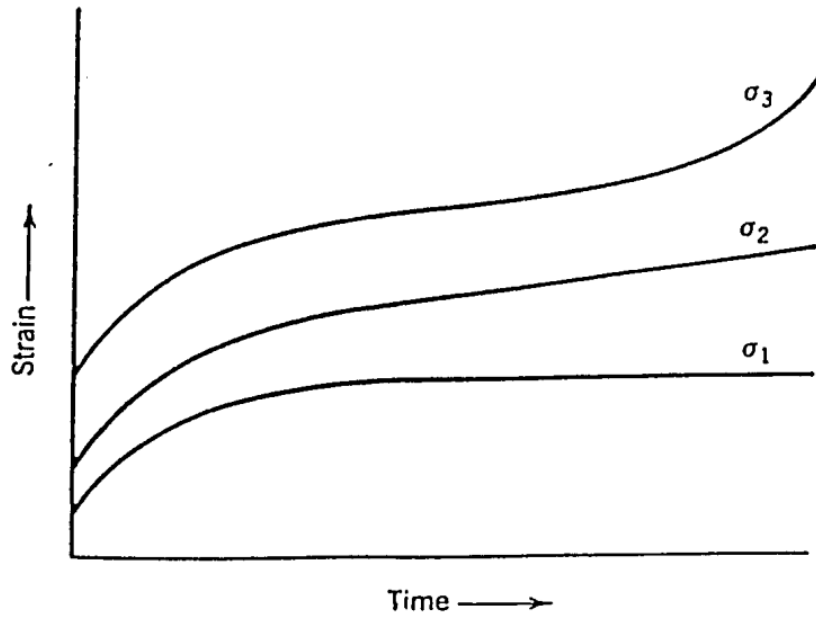


Şekil 5.1. Çeşitli gerilme seviyelerinde gerinim-time grafiği.



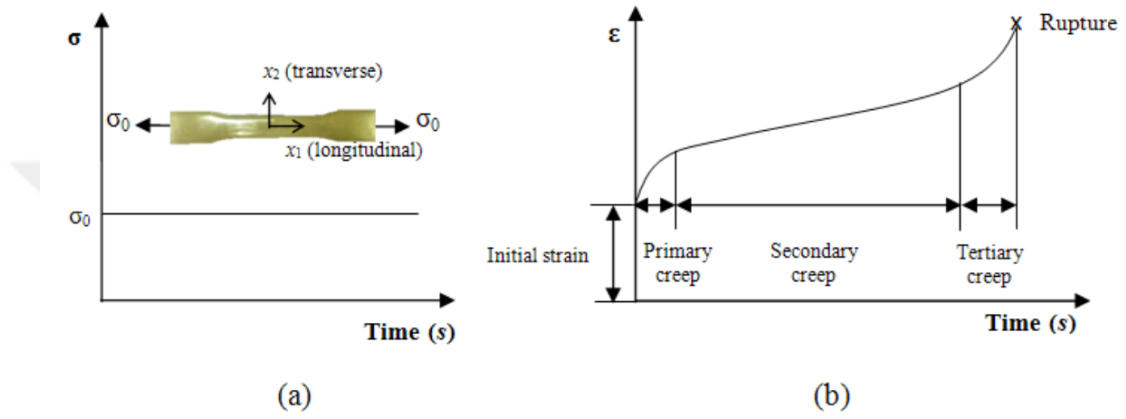
Şekil 5.2. Sünme verilerinin isokorono eğrileri.

Gerilme karşısında zaman eğrileri Şekil 5.1'e benziyorsa, izokronik çizimler lineer olur. Bu durum lineer viskoelastisite teorisi için gerekli ancak yeterli olmayan bir koşulu gösterir. Lineer koşul için sünme kompliansı dolayısıyla gerilme seviyesinden bağımsızdır; yani $D = D(t)$. Ancak, Şekil 5.3'ten çıkarılan izokrono eğrileri lineer olmayacak ve $D = D(\sigma, t)$ olacaktır.



Şekil 5.3. Lineer olmayan isokorono durumu için farklı gerilme seviyelerinde gerilme-zaman eğrileri.

Polimerik bir malzeme için sabit gerilme altında izotermal sünme gerinimi ve zaman değişimi, yatay (x) yönde üç aşamada açıklanmaktadır: birincil sünme, ikincil sünme ve üçüncül sünme (Şekil 5.4). Birincil sünme aşamasında, anlık yüklemeye bağlı olarak ilk deformasyon meydana gelir. Sabit gerilme altında, gerinim hızı azalır ve ikincil veya istikrarlı durum sünme aşamasında sabit hale gelir. Üçüncül aşamada, gerinim hızı testin kopma anına kadar hızla artar (Wang vd., 2024).



Şekil 5.4. İzotermal çekme sünme testinin uygulanan sabit gerilme ve sürünme gerinim geçmişi. (a) Çekme sünme numunesine uygulanan sabit gerilme ve (b) sürünme gerilmesinin birincil, ikincil ve üçüncül aşamaları.

Şekil 5.4, çeşitli sünme davranışlarını göstermektedir. En düşük gerilmede, sünme davranışı birincil sünme olarak adlandırılır. Burada sünme tersine dönüşebilir ve dolayısıyla gerilmenin kaldırılmasıyla toparlanabilir. Deformasyonun sınırlayıcı değeri bazen çok hızlı ortaya çıkabilirken, diğer durumlarda ise test edilen özel sistemden bağlı olarak çok yavaş ortaya çıkabilir. Birincil sünme için bu yanıt süresi, gecikme zamanı spektrumları olarak Ferry, Williams ve Reed tarafından tanımlanmıştır. Bu ilişki, en basit haliyle, tek bir gecikme zamanı ile verilmiş olan sünme uygunluğu olarak denklem (5.2) gibi ifade edilir (Hess vd., y.y.; Srithep vd., 2013).

$$D(t) = K1 + K2 [1 - \exp(-t / \tau)] \quad (5.2)$$

Denklem (5.2) de $K1$ ve $K2$ sabitlerdir ve τ gecikme zamanıdır. Ancak, tüm polimerik katılar geniş bir gecikme zamanı dağılımına sahiptir ve bu nedenle retardasyon zamanı spektrumları açısından karşılaştırılmalıdır.

Gerilme seviyesi σ_2 hem birincil hem de ikincil sünme davranışını gösterir. Burada ikincil sünme gerinimi zamanla doğrusal olarak artar ve Newton benzeri bir davranış gösterir. Bu nedenle ikincil sünme gerilimi ε_2 denklem (5.3) gibi ifade edilir:

$$\varepsilon_2(t) = \sigma t / \eta \quad (5.3)$$

denklem (5.3) de η malzemenin viskozitesidir. Dolayısıyla doğrusal viskoelastik davranış için birincil sünmenin miktarı denklem (5.4) gibi hesaplanabilir:

$$\varepsilon_1(t) = \varepsilon(t) - \sigma t / \eta \quad (5.4)$$

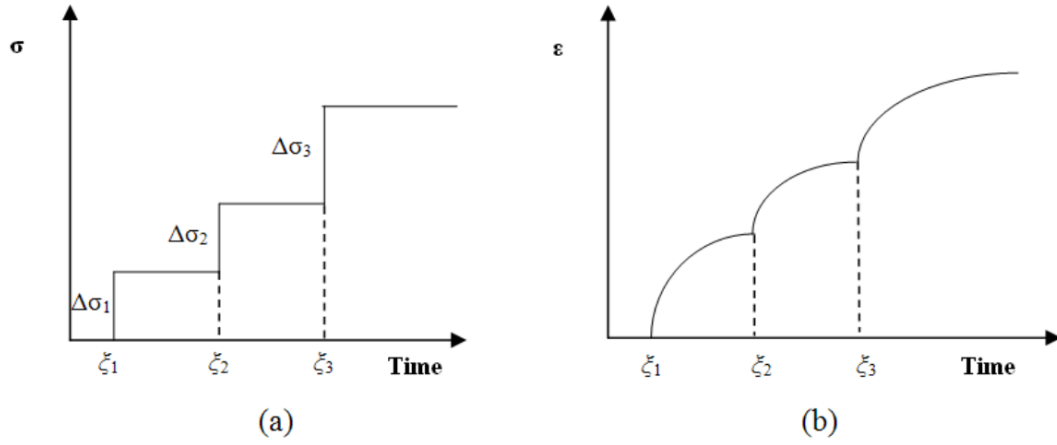
Sünme uygunluğu terimleriyle ifade edildiğinde, denklem (5.5) şeklinde olur:

$$D_1(t) = D(t) - t / \eta \quad (5.5)$$

Şekil 5.3'te gösterilen σ_3 gerilme seviyesi, üçüncül sünme meydana geldiği durumu gösterir. Polimerlerde üçüncül sünme ve doğrusal olmayan ikincil sünmeyi ayırt etmek zordur, ancak sabit gerilme altında sünmenin zamanla azalan ivme gösterdiğine dair kanıtlar bulunmaktadır (Marriott, 2011).

5.3 Boltzmann Süperpozisyon Prensibi

Doğrusal viskoelastik malzemeler için gerilme ve gerinim arasındaki ilişki, Boltzmann Süperpozisyon Prensibi (BSP) tarafından tanımlanır. BSP, her gerilme girişinin neden olduğu gerinimler toplamının, birleşik gerilmenin neden olduğu toplam gerinime eşit olduğunu belirtir. Şekil 5.5a, bir izotropik, homojen doğrusal viskoelastik malzemenin bir boyutlu yüklenmesini, sırasıyla $t = \xi_1$, $t = \xi_2$, $t = \xi_3$ zamanlarında $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$ gerilme artışlarıyla göstermektedir (Heymans ve Kitagawa, 2004; Zink VD., 2022).



Şekil 5.5. Doğrusal viskoelastik bir malzemenin tek boyutlu yüklemelerinde değişken gerilme girdileri ve sünme gerilme geçmişi.(a) Gerilme $\Delta\sigma$ 'da artışlarla değişken gerilme girdileri ve (b) sünme gerinim tepkileri.

BSP'ye göre, gerilme geçmişinin gerinim üzerindeki etkileri lineer olarak eklenir ve dolayısıyla bir doğrusal viskoelastik malzemenin değişken stres nedeniyle zaman karşısındaki gerilme tepkisi $\varepsilon(t)$ yaklaşık denklem (5.6) gibi ifade edilebilir (Gibson, 2016):

$$\varepsilon(t) = C(t - \xi_1)\Delta\sigma_1 + C(t - \xi_2)\Delta\sigma_2 + C(t - \xi_3)\Delta\sigma_3 \quad (5.6)$$

Eğer uygulanan gerilme zamanla değişiyorsa, gerilme girişi seri formda denklem (5.6) gibi temsil edilebilir:

$$\sigma(t) = \sum_{p=1}^P \Delta\sigma_p H(t - \xi_p) \quad (5.6)$$

Denklem (5.6) da P son sabit gerilme artışını gösterir ve H(t) Birim Basamak Fonksiyonu olarak tanımlanır:

$$H(t) = \{0 \quad t < 0, 1 \quad t \geq 0\} \quad (5.7)$$

Denklem (5.6) ve denklem (5.7)'ü denklem (5.6)'ye yerine koyarak, değişken gerilme $\sigma(t)$ altında gerinim çıkışı denklem (5.8) gibi yazılabilir:

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^I \Delta\sigma_{ic}(t - \xi_i) H(t - \xi_i) \quad (5.8)$$

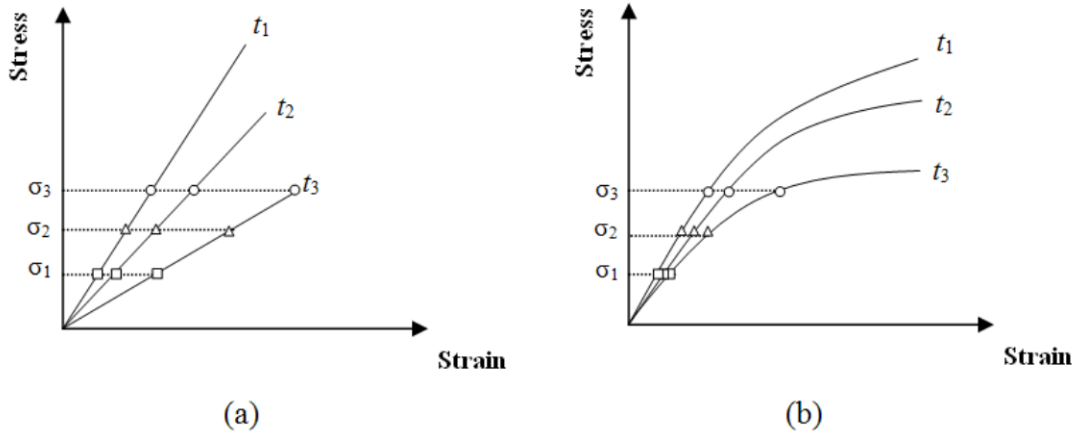
Sürekli bir gerilme uygulaması için, denklem (5.8)'teki gerinim-zaman tepkisi $\varepsilon(t)$, integral bir temsil ile genelleştirilmiş bir formda denklem (5.9) şeklinde ifade edilebilir (Marques ve Creus, 2012)

$$\varepsilon(t) = \int_0^t C(t - \xi) \frac{d\sigma}{d\xi} d\xi \quad (5.9)$$

denklem (5.9) da $C(t)$ sünme kompliansı, σ uygulanan gerilme ve ξ zaman ofsetini temsil eder. Denklem (5.9), Boltzmann integrali veya miras integrali (hereditary integral) olarak bilinir ve belirli bir gerilme geçmişi altında sünme gerilmelerini elde etmek için kullanılabilir. Boltzmann integralinde gösterildiği gibi, viskoelastik bir malzemenin "hafızası" vardır, yani mevcut gerinim durumu, mevcut gerilmenin yanı sıra yükleme geçmişine tamamına bağlıdır (Luo vd., 2007).

5.4 Viskoelastik Lineerliğin Belirlenmesi İçin İzokrono Gerilme-Gerinim İlişkisi

Elastik malzemelere benzer şekilde, viskoelastik malzemeler de sıcaklık, gerilme seviyesi, nem içeriği, geometri vb. gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak lineer veya lineer olmayan karakterde olabilirler. Viskoelastik malzemelerin zaman bağlı davranışı, sünme kompliansının gerilmeden bağımsız olması durumunda lineerdir (Marques ve Creus, 2012). Lineer ve lineer olmayan davranış arasındaki farkı ayırt etmenin tipik bir tekniği, gerilme-gerinim eğrilerinin izokrono (sabit zamanlı) çizimlerini oluşturmaktır. İzokrono eğrileri farklı gerilme seviyelerinde bir dizi sünme deneyinden elde edilir, bunlar çekme, basma veya kayma deneylerinden olabilir (Gibson, 2016). Örneğin, Şekil 5.6, üç ayrı sabit gerilme seviyesinde yükleme sonucunda elde edilen gerinim yanıtlarını içeren idealize edilmiş tek eksenli çekme sünme testlerinden faydalanılarak elde edilen idealize edilmiş izokrono eğrileri göstermektedir. t_1 , t_2 , t_3 zamanlarında elde edilen σ_1 , σ_2 , σ_3 sabit gerilme seviyelerinde gerilme-gerinim eğrileri çizildiğinde, malzeme lineerliği Şekil 5.6a'da gösterilen düz doğrularla ifade edilir. Doğrusal olmayan davranış için ise izokrono eğrileri Şekil 4.6b'de gösterildiği gibi kavisli eğrilerle sonuçlanır (Zink vd., 2022).



Şekil 5.6. Viskoelastik lineer ve lineer olmayan malzemeler için idealize edilmiş izokrono gerilme-gerinim eğrileri. (a) Farklı gerilme seviyelerindeki bir dizi sünme deneyinden elde edilen viskoelastik lineer ve (b) lineer olmayan malzemelerin izokrono gerilme-gerinim eğrileri.

Lineerlik, sabit büyüklükteki σ_0 gerilmesinin uygulanan gerilme ile viskoelastik yapısal ilişki denklem (5.9) göz önüne alınarak tek eksenli çekme sünmesi için matematiksel olarak incelenebilir:

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t) \quad (5.10)$$

Denklem (5.10)'yi denklem (5.9)'da yerine koyarak, sünme gerilimi $\varepsilon(t)$ aşağıdaki denklem (5.11) şeklinde yazılabilir:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(\int_0^t C(t - \xi) d\xi \int_0^t H(\xi) d\xi \right) \quad (5.11)$$

Denklemin (5.11) sol tarafını bir birim gerinim ($\varepsilon = 1$ % gerinim) ve sağ tarafını bir birim sünme kompliyansı ($C = 1 \text{ Pa}^{-1}$ veya $C = 1 \text{ psi}^{-1}$) ve zaman ($t = 1$ s) ile normalize ederek, denklem (5.11) denklem (5.12) şeklinde ifade edilebilir:

$$\hat{\varepsilon}(t) = \hat{\sigma}_0 \left(\int_0^t \hat{C}(t - \xi) d\xi \right) = \hat{\sigma}_0 \hat{Y}(t) \quad (5.12)$$

$$\hat{Y}(t) = \int_0^t \hat{C}(t - \xi) d\xi \quad (5.13)$$

Denklem (5.12), lineer viskoelastik malzemeler için gerilmeye karşı gerinimin paralel olmayan lineer eğriler elde edileceğini göstermektedir. Denklemin (5.12) her iki tarafının da logaritmasını alarak:

$$\log[\hat{\epsilon}(t)] = \log[\hat{\gamma}(t)] + \log[\hat{\sigma}_0] \quad (5.14)$$

Doğrusal viskoelastik malzemeler ve sabit zaman t için, denklem (5.14), farklı uygulanan sabit sünme gerilmeleri $\log[\hat{\gamma}(t)]$ σ_0 için tarafından yatay kaydırılmış birim eğime sahip paralel çizgiler üretir.



6. MATERYAL VE METOT

İzotaktik polipropilen Moplen HP 400R (yoğunluğu 0,90 g/cm³, eriyik akış hızı 25 g/10 dakika, erime sıcaklığı 161°C), İsveç'teki Albis Plastic Scandinavia AB'den temin edilmiştir. Enine kesit alanı 10,1 mm × 4,2 mm olan numuneler, ASTM D-638 standardına göre mekanik testler için Arburg 320C enjeksiyon kalıplama makinesi ile üretilmiştir. Mekanik testler, uzunlamasına gerinimlerin kontrolünü sağlayan bir elektro-mekanik sensörle donatılmış Instron-5569 model evrensel test cihazı ile yapılmıştır. Çekme kuvveti ise 5 kN kapasiteli bir yük hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Mühendislik gerilimi (σ), eksenel kuvvetin deforme olmamış numunelerin enine kesit alanına oranlanarak hesaplanmıştır. Testler, oda sıcaklığında, her biri yeni numune üzerinde iki kez tekrar edilerek gerçekleştirilmiştir ("Test Method for Tensile Properties of Plastics", 2014).

Mekanik testler, sünme testleri ve çeşitli döngüsel testleri kapsamaktadır. Testler sırasında, Instron-5569 evrensel test makinesi, bir termal oda ve elektro-mekanik sensör ile donatılarak gerinim ölçümleri kontrol edilmiştir. 5 kN'lık yük hücresi ile çekme kuvveti ölçümleri yapılmıştır. Sünme testlerinde gerilme seviyesi, eksenel kuvvetin deforme olmayan numune enine kesitine oranı olarak hesaplanmıştır. Gözlemler, ölçümlerin yüksek bir tekrarlanabilirlik düzeyine sahip olduğunu göstermektedir. Gevşeme testlerinde farklı numunelerdeki gerilim ölçümlerindeki fark %4'ü aşmamış, farklı numunelerdeki maksimum gerilim ve minimum gerinim değerlerindeki sapma ise %2'nin altında kalmıştır.

Testler, 10 mm/dk çekme hızında (gerinim hızına karşılık gelen 10 mm/dk s⁻¹) tek eksenli yükleme ile yapılmış; sünme için belirlenen gerilme seviyelerine ulaşılan kadar (1 MPa, 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa ve 20 MPa sırasıyla) yüklenmiş ve ardından 1 MPa seviyesine kadar boşaltılmıştır. Sünme testleri, ASTM 633 standardına uygun olarak 20 dakika süresince gerçekleştirilmiştir ("Test Methods for Stress Relaxation for Materials and Structures", 2021).

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla en sık başvuru alan test yöntemlerinden biri çekme ve basma testleridir. Bu testlerin yanı sıra, üç nokta eğme testleri de kullanılmakta ve özellikle malzeme mühendisliği ile araştırma alanlarında büyük önem taşımaktadır.

İnstron çekme-basma cihazı, farklı malzemelerin test edilmesi amacıyla dayanıklılık ve esneklik özellikleri göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Cihazın genel özellikleri ve kullanım alanları şu şekildedir:

Genel Özellikler

- **Yük Kapasitesi:** 100 kN
- **Dikey Test Alanı:** 1430 mm
- **Yük Ölçüm Doğruluğu:** $\pm 0,5\%$; 1/500 yük hücresi kapasitesinin altında ölçüm yapılabilir.
- **Veri Edinimi Hızı:** Yük, uzama ve gerilim kanallarında aynı anda 1 kHz hızında veri kaydı yapılabilir.
- **Hız Aralığı:** 0.00005 - 3000 mm/dakika.
- **Düşük Taban Yüksekliği:** Test alanına kolay erişim sağlar.
- **Özelleştirilebilir Kontrol Paneli:** Kullanıcının ihtiyacına göre uyarlanabilir.
- **Yazılım Uyumluluğu:** Bluehill® 3 yazılımı ile çalışabilir.
- **Otomatik Transdüzer Tanıma:** Yük hücreleri ve ekstensometreler için otomatik tanıma özelliği sunar.
- **Ekstra Yüksek ve Geniş Seçenekler:** Çeşitli test ihtiyaçları için geniş seçenek imkanı sunar.

İnstron çekme-basma cihazı, pek çok malzemenin test edilmesi için kullanılabilir. Başlıca uygulama alanları şunlardır:

- **Havacılık Kompozitleri:** Malzemelerin dayanıklılığını test etme.
- **Metal Alaşımları:** Mukavemet ve deformasyon özelliklerinin ölçülmesi.
- **Kristalin Polimerler:** Mekanik davranışların analiz edilmesi.

Çekme ve basma testleri, malzemelerin elastik modülünü, akma sınırını, dayanıklılığını ve deformasyon özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Bu testlerde, cihazın gövde sertliği doğru modül ve gerilme değerlerinin elde edilmesinde kilit rol oynar. Özel olarak tasarlanmış bileşenler (önceden yüklü yataklar, hassas top vidalar vb.) sayesinde, test sırasında biriken enerji minimuma indirilerek daha iyi performans elde edilir.

İnstron çekme-basma cihazı, yüksek hassasiyet ve doğruluk ile malzemelerin test edilmesini sağlar. Cihazın sunduğu esneklik ve özelleştirme imkânları, onu çeşitli

mühendislik ve araştırma uygulamalarında kullanılabilir hale getirir. Polimerlerin ve kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini anlamak ve iyileştirmek için bu testler kritik bir role sahiptir.

Sonuç olarak, çekme ve basma testleri, malzemelerin dayanıklılık, elastikiyet ve akma sınırı gibi önemli parametrelerini ölçmek için kullanılan temel test yöntemleridir.



Şekil 6.1. Instron 3366 Çekme Test Cihazı.

Bu testler, malzemelerin mühendislik alanındaki performanslarını değerlendirmede kritik bir rol oynar. Bu nedenle, doğru test yöntemlerinin belirlenmesi ve uygun cihazların tercih edilmesi, malzeme araştırmaları ve geliştirme çalışmalarında büyük önem taşır.



Şekil 6.2. Ölçümler.

1. Çekme Testleri:

- Malzemenin uzama kapasitesi ve kopma dayanımı gibi özelliklerini belirlemek amacıyla yapılır.
- Numune, iki uçtan çekilerek gerilme ve deformasyon değerleri kaydedilir.
- Çekme testinden elde edilen verilerle gerilme-gerinim eğrileri oluşturulur; bu eğriler, elastik modül, akma noktası ve kopma dayanımı gibi mekanik özellikleri analiz etmemizi sağlar.

2. Basma Testleri:

- Malzemenin sıkışma dayanımını ve deformasyon davranışını incelemek için uygulanır.
- Numuneye iki uçtan basınç uygulanarak malzemenin dayanıklılığı ölçülür.
- Basma testleri, özellikle sıkıştırılma direnci gibi özelliklerin belirlenmesinde önemlidir.

3. Üç Nokta Eğme Testleri:

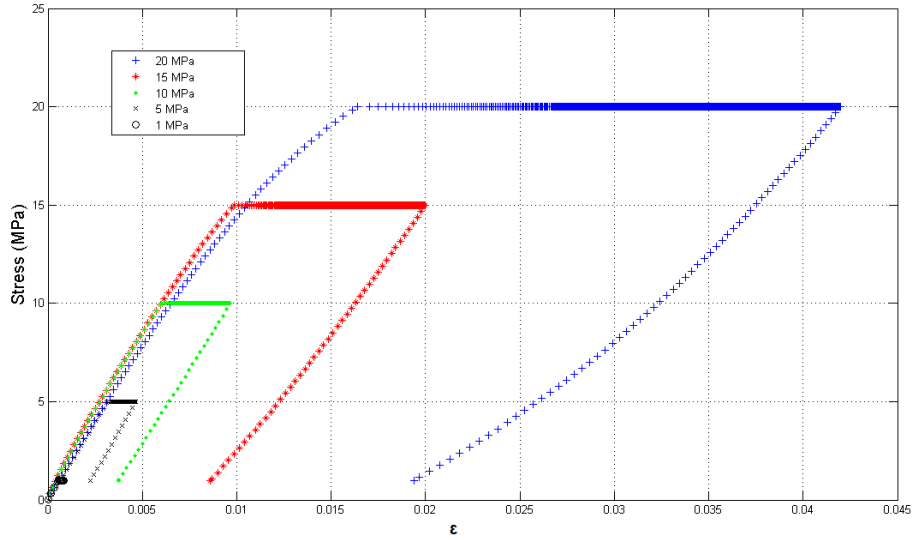
- Malzemenin eğilme dayanımını ve elastik özelliklerini ölçmek için gerçekleştirilir.
- Testte, numune üç nokta üzerinde desteklenir ve ortasından bir yük uygulanarak eğilme dayanımı değerlendirilir.
- Eğilme testleri, özellikle yapı malzemeleri ve kompozit uygulamalarda dayanıklılığı değerlendirmek için kritik veriler sağlar.

Üniversal Test Cihazları, çekme, basma ve eğilme testlerini yapabilen çok yönlü ve hassas makineler olup, aşağıdaki özelliklere sahiptir: Çeşitli malzemeleri test edebilmek için geniş bir yük kapasitesi sağlar. Test sırasında yükleme hızının doğru bir şekilde ayarlanmasını mümkün kılar. Gerilme, gerinim ve uzama verilerinin kaydı ve analizi için entegre yazılımlar bulunur. Test ihtiyacına göre ekstensometre, yük hücreleri gibi çeşitli aksesuarlarla donatılabilir.

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

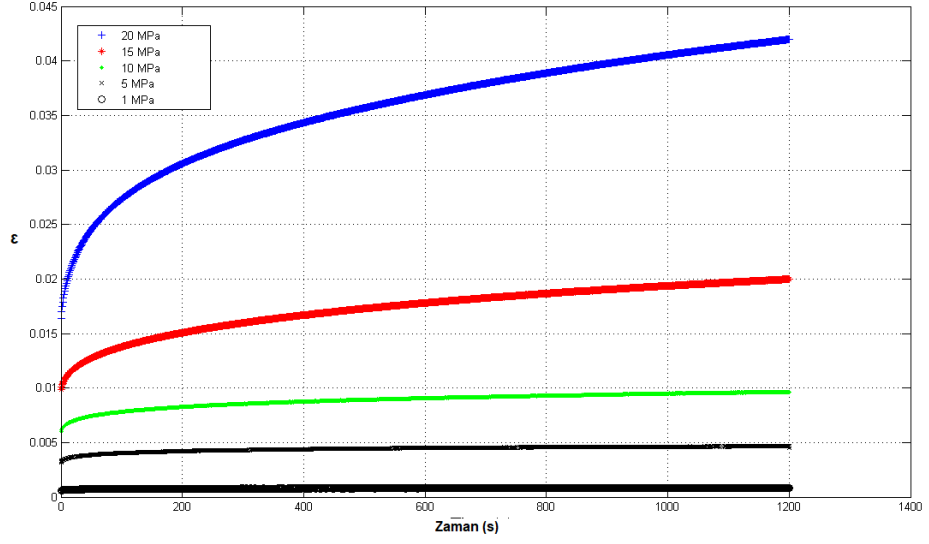
Doğrusal davranışın dayanım sınırını belirlemek için eşzamanlı eğriler kullanılır. Bu çalışmada, farklı gerilme seviyelerinde eşit zamanda elde edilen deformasyon değerleriyle bu eğriler oluşturulmuştur. Grafik yorumlanırken, gerilme ve gerinim arasındaki orantının sürdüğü düz kesitte davranış doğrusal olarak değerlendirilebilir; ancak doğrusal olmayan bir durumda bu orantılılık gözlenmez.

Şekil 7.1 ve 7.2'de, sırasıyla 1 MPa, 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa ve 20 MPa gerilme seviyeleri için tek eksenli çekme ve sünme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri gösterilmektedir. 1 MPa gerilme seviyesine kadar boşaltılmıştır. Test süreleri 20 dakikadır. Testler oda sıcaklığında yapılmıştır.



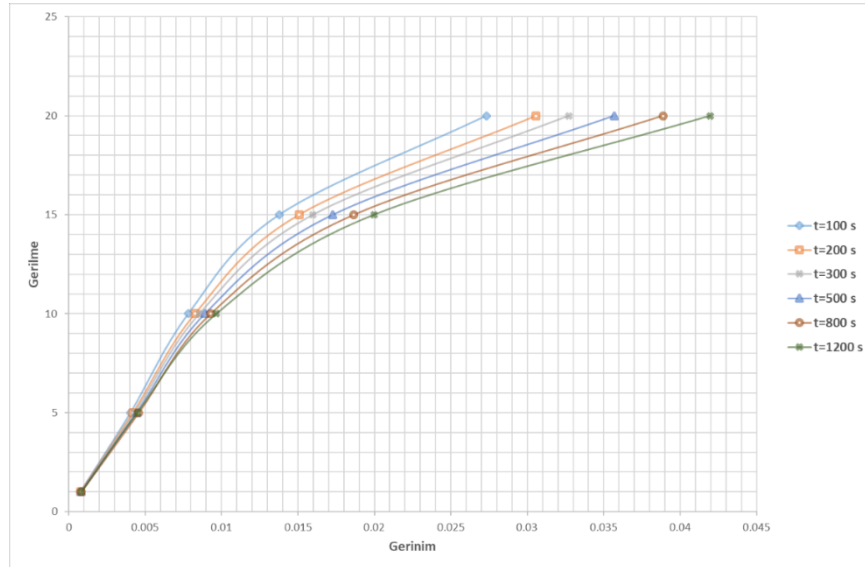
Şekil 7.1. Gerilme (σ) ile gerinim (ϵ) ilişkisi.

Şekil 7.1'de görüldüğü gibi, yükleme eğrileri %0.6 gerinim seviyesinden sonra doğrusal olmayan bir karakter göstermeye başlamaktadır. Diğer yandan, boşaltma eğrilerinde doğrusal olmayan davranış daha belirgin hale gelmektedir. Sünme testi için seçilen gerilme seviyesi arttıkça, sünme nedeniyle oluşan deformasyon miktarı da artış göstermektedir.



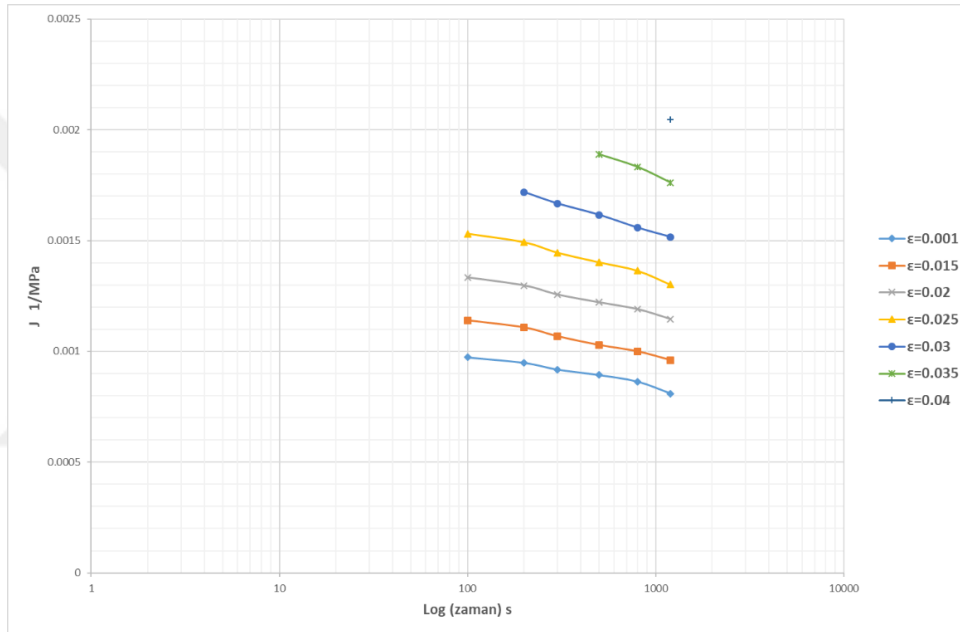
Şekil 7.2. Gerilme (σ) ile zaman (t) arasındaki ilişki

Şekil 7.2'de farklı seviyelerdeki sünme eğrilerinden, sünme gerilme seviyesi arttıkça testin başlangıcında gözlemlenen doğrusal olmayan deformasyonun daha hızlı gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 7.3'te ise sünme test sonuçlarına dayanarak oluşturulan izokrono eğrileri, sırasıyla 100 s, 200 s, 300 s, 500 s ve 1200 s süreleri için sunulmaktadır. Her bir eğri, önceden elde edilen sünme grafiklerinden belirlenen ve sabit bir süreye, örneğin 100 saniyeye, karşılık gelen deformasyon değerini ifade etmektedir.



Şekil 7.3. Polipropilen'e ait isokrono eğrileri.

Şekil 7.3'teki eşdeğer eğrilerden, lineer davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçişi belirleyen gerilme seviyesinin sünme test süresi arttıkça azaldığı gözlemlenmektedir. 100 saniyelik test süresi için lineer davranış sınır limiti 10 MPa gerilme seviyesinde gözlemlenirken, 1200 saniyelik sünme test süresi için bu limit 7,5 MPa gerilme seviyesinde meydana gelmektedir. 100 saniyelik test süresindeki deformasyon miktarı, 1200 saniyelik test süresinde yaklaşık olarak %24 artmış olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca, 100 saniyelik test süresindeki maksimum sünme gerinim seviyesi, 1200 saniyelik test süresindeki maksimum sünme gerinim seviyesinden %54 daha düşük olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 7.4. Polipropilen'e ait izometrik eğriler.

Gerilme seviyesinin %50'sine kadar olan değerlerde, polimerik malzemenin doğrusal bir davranış sergilediğine dair kanıtlar bulunmaktadır. Ancak bu değerlerin üzerinde, doğrusal olmayan bir davranış gösteren eşzamanlı eğrilerin eğimi belirgin hale gelmektedir. Dolayısıyla, doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş, maksimum gerilme seviyesinin %40 ila %50'si arasındaki bir değerde gerçekleşiyor gibi görünmektedir.

Şekil 7.4'teki izometrik diyagramdan görüleceği üzere, %0.1 gerinim seviyesinde test süresi sonunda sünme kompliyansındaki değişim %17 seviyelerinde iken, %0.25 gerinim seviyesinde ise bu değişim %13 civarındadır. Ayrıca, %4 gerinim seviyesinde sünme kompliyansı değişimi %6.9'luk bir azalma olarak gözlemlenmiştir.

Doğrusal davranıştan doğrusal olmayana geçiş, bazı sünme eğrilerinin şeklinde değişiklikler meydana gelmesiyle birlikte, viskoelastik malzemeler için beklenen bir durumdur; bu değişim, eğrilerde ayrılma ve sapmalara yol açmaktadır. Şekil 7.4'deki eğrilerde ise, eğrilerin eğilim düzeni değişmeden sadece mutlak deformasyon değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir.

Ashby malzeme seçimi yöntemi, mühendislik tasarımlarında kullanılacak malzemeleri belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, malzemelerin mekanik, termal ve fiziksel özelliklerini dikkate alarak, belirli bir uygulama için en uygun malzemeyi seçmeyi amaçlar. Ancak, Ashby yöntemi genellikle malzemelerin işletme koşullarındaki davranışlarını sabit kabul eder ve bu da bazı durumlarda yanıltıcı sonuçlar doğurabilir.

Özellikle polimerik malzemeler, sıcaklık, nem, yükleme hızı ve yükleme miktarı gibi çevresel faktörlere karşı duyarlıdır ve bu faktörler altında özellikleri önemli ölçüde değişebilir. Örneğin, polimerlerin elastik modülü, sıcaklık arttıkça düşebilir veya belirli bir sıcaklıkta cam geçiş sıcaklığına ulaşıldığında malzeme sert bir durumdan kauçuksu bir duruma geçebilir. Bu gibi durumlar, Ashby yönteminin sabit malzeme özellikleri varsayımıyla uyumlu değildir ve yanlış malzeme seçimine yol açabilir.

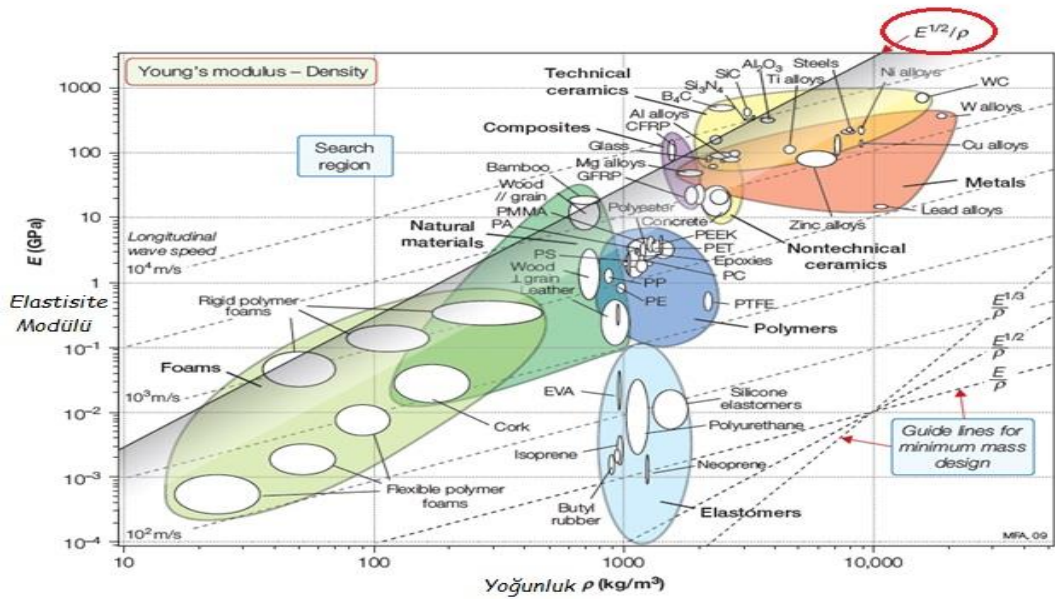
Yanlış malzeme seçimi, makine tasarımında istenmeyen sonuçlara yol açabilir. Örneğin, bir polimer malzemenin yüksek sıcaklıklarda kullanılması durumunda, malzemenin beklenenden daha fazla deformasyona uğraması ve bu nedenle tasarımın fonksiyonunu yerine getirememesi mümkündür. Bu tür hatalar, özellikle güvenlik kritik uygulamalarda ciddi sonuçlar doğurabilir.

Bu nedenle, polimerik malzemelerin kullanıldığı tasarımlarda, malzeme özelliklerinin çevresel faktörlere bağlı olarak değişebileceği göz önünde bulundurulmalı ve malzeme seçimi buna göre yapılmalıdır. Ashby yöntemi, bu tür durumlar için doğrudan bir çözüm sunmasa da, malzeme seçim sürecinde dikkate alınması gereken önemli bir adımdır. Polimerik malzemelerin davranışlarını daha doğru bir şekilde modellemek ve bu davranışları malzeme seçiminde hesaba katmak, daha güvenilir ve işlevsel tasarımlar elde etmek için gereklidir.

Bir mühendislik tasarımında, sabit sıcaklıkta ve uzun süreli çekme kuvvetine maruz kalacak bir PP malzemenin seçimi yapılacak olsun. Bu malzeme, belirli bir yük altında

uzun süreli dayanım göstermeli ve kalıcı deformasyon olmaksızın orijinal boyutlarına dönebilmelidir.

Ashby yöntemi, malzeme seçiminde genellikle malzemelerin mekanik özelliklerini sabit kabul eder. Örneğin, PP malzemenin elastik modülü ve akma dayanımı, Şekil 7.5 Ashby'nin elastisite modülü – yoğunluk grafiğinde görüldüğü gibi tek bir değer olarak temsil edilir. Ancak, PP malzemeler zamanla sürünme (creep) davranışı gösterebilir ve bu da uzun süreli yükleme altında kalıcı deformasyonlara yol açabilir. Ashby yöntemi, bu zaman bağımlı davranışı doğrudan hesaba katmadığı için, yanlış bir malzeme seçimine yol açabilir.



Şekil 7.5. Ashby'nin elastisite modülü – yoğunluk grafiği.

Pseudo-elastik dizayn yaklaşımı, PP malzemelerin zamanla değişen davranışlarını dikkate alır. Bu yaklaşım, malzemenin sürünme davranışını ve uzun süreli yükleme altında nasıl tepki vereceğini modelleyebilir. Örneğin, belirli bir PP malzemenin uzun süreli çekme kuvveti altında önemli ölçüde uzayabileceğini ve bu nedenle tasarımın istenilen performansı gösteremeyeceğini gösterebilir.

Bu örnekte, Ashby yöntemi PP malzemenin elastik modülünü ve akma dayanımını sabit kabul ederek yanlış bir malzeme seçimine yol açabilirken, pseudo-elastik dizayn yaklaşımı malzemenin zamanla değişen davranışını dikkate alarak daha doğru bir malzeme seçimi yapılmasını sağlayabilir. Bu da, malzemenin uzun süreli çekme kuvveti altında istenilen performansı göstermesini ve kalıcı deformasyon olmaksızın orijinal boyutlarına dönebilmesini garanti eder.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

İzokronik eğrilerle yapılan gözlemler, gerilme seviyesindeki artışın bu çalışmada kullanılan polimerik malzemenin davranışını etkilediğini ortaya koymaktadır. Gerilme seviyesindeki artış göz önünde bulundurulduğunda, doğrusal olmayan davranışın, doğrusal davranıştan geçiş için gereken gerilme değerlerini azalttığı bulunmuştur. Bu geçişin, maksimum gerilme seviyesinin %40 ila %50'si arasındaki değerlerde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, başlangıçtaki sünme kompliyansındaki azalma, gerinim seviyesinin artışıyla ters orantılı olarak gerçekleşmektedir.

Pseudo-elastik dizayn, polimerik malzemelerin karmaşık davranışlarını dikkate alarak, daha doğru ve güvenilir bir malzeme seçimi yapılmasını sağlar. Bu, mühendislik tasarımlarının performansını ve güvenilirliğini artırırken, aynı zamanda istenmeyen durumların ve sonuçların önüne geçilmesine yardımcı olur. Polimerik malzemelerin kullanıldığı uygulamalarda, pseudo-elastik dizaynın önemi göz ardı edilemez ve bu yaklaşım, başarılı bir malzeme seçimi için vazgeçilmez bir araçtır.

Polimerik malzemeler, çevresel faktörlere ve yükleme koşullarına karşı duyarlıdır. Uygulanan yükler altında polimerler sürünme davranışı gösterebilir ve bu da malzemenin beklenmeyen durumlarda deformasyonuna yol açabilir. Ayrıca, polimerlerin kimyasal özellikleri de çevresel etkilere bağlı olarak değişebilir.

Bu nedenle, polimerik malzemelerin kullanıldığı tasarımlarda, sadece Ashby yöntemine dayanarak malzeme seçimi yapmak yeterli olmayabilir. Ashby yöntemi, malzemelerin zaman, sıcaklık ve yükleme durumu gibi faktörlere bağlı olarak değişen davranışlarını dikkate almaz. Bu da, yanlış malzeme seçimine ve dolayısıyla tasarımın istenilen performansı göstermemesine yol açabilir.

Pseudo-elastik dizayn yaklaşımı, polimerik malzemelerin zamanla değişen davranışlarını ve çevresel faktörlere karşı duyarlılıklarını dikkate alır. Bu yaklaşım, malzemenin sürünme davranışını, sıcaklık değişimlerine karşı tepkisini ve diğer zaman bağımlı özelliklerini modelleyerek, daha doğru bir malzeme seçimi yapılmasını sağlar.

Sonuç olarak, polimerik malzemelerin kullanıldığı mühendislik tasarımlarında, Ashby ve diğer malzeme seçimi yöntemleri tek başına yeterli değildir. Pseudo-elastik dizayn yaklaşımı ile desteklenen bir malzeme seçimi, polimerlerin karmaşık davranışlarını

dikkate alarak, daha güvenilir ve işlevsel tasarımlar elde edilmesine yardımcı olur. Bu, tasarımın istenmeyen durumlarda ve istenmeyen zamanlarda fonksiyonunu yerine getirememesi riskini azaltır ve ağır sonuçların önüne geçilmesini sağlar.



KAYNAKLAR

- Anojkumar, L., Ilangkumaran, M. ve Sasirekha, V., 2014. Comparative analysis of MCDM methods for pipe material selection in sugar industry, *Expert Systems with Applications*, 41, 2964-2980.
- Ashby, M. F., 1991. Materials and shape, *Acta Metallurgica et Materialia*, 39, 1025-1039.
- Ashby, M. F., 1999. *Materials Selection In Mechanical Design*, Second Edition, Oxford: Butterworth-Heinemann / Elsevier.
- Ashby, M. F., 2000. Multi-Objective optimization in material design and selection, *Acta Mater*, 48, 359-369.
- Ashby, M. F., 2011. *Materials Selection in Mechanical Design*, Fourth Edition, UK: Butterworth-Heinemann / Elsevier.
- Ashby, M. F., 2011. *Materials Selection in Mechanical Design*, UK: Butterworth-Heinemann / Elsevier.
- Ashby, M. F., Shercliff, H. ve Cebon, D., 2007. *Materials Engineering Science Processing And Design*, First Edition, UK: Butterworth-Heinemann / Elsevier.
- Ayoub, G., Zaïri, F., Naït-Abdelaziz, M. ve Gloaguen, J. M., 2010. Modelling large deformation behaviour under loading-unloading of semicrystalline polymers: Application to a high density polyethylene, *International Journal of Plasticity*, 26(3), 329–347. doi:10.1016/j.ijplas.2009.07.005.
- Bouaziz, O. ve Masse, J. P., 2012. Extension of Ashby's Performance Indexes in Mixed Tension-Bending Solicitations, *Advanced Engineering Materials*, DOI: 10.1002/adem.201200050.
- Brooks, N. W. J., Duckett, R. A. ve Ward, I. M., 1999. Effects of crystallinity and stress state on the yield strain of polyethylene, *Polymer*, 40(26), 7367–7372. doi:10.1016/S0032-3861(99)00054-3.
- Burgess, S. C., Pasini, D., Smith, D. J. ve Alemzadeh, K., 2006. A general solution to the material performance index for bending strength design, *Materials and Design*, 27, 1046-1054.
- Caelers, H. J. M., Govaert, L. E. ve Peters, G. W. M., 2016. The prediction of mechanical performance of isotactic polypropylene on the basis of processing conditions, *Polymer*, 83, 116–128. doi:10.1016/j.polymer.2015.12.001.
- Castillo, G., Wargnier, H., Danis, M. ve Brechet, Y., 2009. Determination of Materials Selection Performance Indices Through the Combination of Numerical Modeling and Optimization Methods, *Advanced Engineering Materials*, 938-944.

- Cavallini, C., Giorgetti, A., Citti, P. ve Nicoliae, F., 2013. Integral aided method for material selection based on quality function deployment and comprehensive VIKOR algorithm, *Materials and Design*, 47, 27-34.
- Chatterjee, P., Athawale, V. M. ve Chakraborty, S., 2009. Selection of materials using compromise ranking and outranking methods, *Materials and Design*, 30, 4043-4053.
- Chauhan, A. ve Vaish, R., 2012. Hard coating material selection using multicriteria decision making, *Materials and Design*, 44, 240-245.
- Colak, O. U. ve Dusunceli, N., 2006. Modeling viscoelastic and viscoplastic behavior of high density polyethylene (HDPE), *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 128(4), 572–578. doi:10.1115/1.2345449.
- Costa, M. C. M., Silva, S. M. C. ve Antunes, F. E., 2015. Adjusting the low critical solution temperature of poly(N-isopropyl acrylamide) solutions by salts, ionic surfactants and solvents: A rheological study, *Journal of Molecular Liquids*, 210, 113–118. doi:10.1016/j.molliq.2015.02.008.
- Cui, X., Zhang, H., Wang, S., Zhang, L. ve Ko, J., 2011. Design of lightweight multi-material automotive bodies using new material performance indices of thin-walled beams for the material selection with crashworthiness consideration, *Materials and Design*, 32, 815-821.
- Das, S. ve Roy D., 2019. A constitutive model for block-copolymers based on effective temperature, *International Journal of Mechanical Sciences*, 161–162(August). doi:10.1016/j.ijmecsci.2019.105082.
- Detrez, F., Cantournet, S. ve Seguela, R., 2011. Plasticity/damage coupling in semi-crystalline polymers prior to yielding: Micromechanisms and damage law identification, *Polymer*, 52(9). doi:10.1016/j.polymer.2011.03.012.
- Dooling, P. J., Buckley, C. P. ve Hinduja, S., 1997. An intermediate model method for obtaining a discrete relaxation spectrum from creep data, *Rheologica Acta*, 36(4), 472–482. doi:10.1007/BF00396332.
- Drake, D. A., Simsiriwong, J., Sullivan, R. W., Toghiani, H., Nouranian, S., DuBien, J. ve Pittman, C. U., 2013. Creep Compliance Characterization of Vapor-Grown Carbon Nanofiber/Vinyl Ester Nanocomposites Using a Central Composite Design of Experiments, 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference içinde, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2013-1585.
- Drozдов, A. D. ve Dusunceli, N., 2012. Inverse relaxation in polypropylene, *Iranian Polymer Journal (English Edition)*, 21(10), 701–711. doi:10.1007/s13726-012-0077-3.
- Drozдов, A. D. ve Dusunceli, N., 2013. Modeling of multi-cycle deformation of polymers with various deformation programs, *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 9(1), 4–22. doi:10.1108/15736101311329133.

- Dusunceli, N. ve Drozdov, A. D., 2017. Fading memory of deformation history in carbon black-filled thermoplastic elastomers, *Polymer Testing*, 58, 1–12. doi:10.1016/j.polymertesting.2016.12.008.
- Dusunceli, N., 2010. Modeling finite deformation behavior of semicrystalline polymers under uniaxial loading-unloading, *Journal of Elastomers and Plastics*, 42(4), 347–364. doi:10.1177/0095244310368126.
- Dusunceli, N., 2012. The unusual creep and relaxation behaviour of polypropylene, *Journal of Polymer Engineering*, 32(3), 167–176. doi:10.1515/polyeng-2011-0159.
- Dusunceli, N., Drozdov, A. D. ve Theilgaard, N., 2017. Influence of temperature on viscoelastic–viscoplastic behavior of poly(lactic acid) under loading–unloading, *Polymer Engineering and Science*, 57(3). doi:10.1002/pen.24404.
- Gibson, R. F., 2016. *Principles of Composite Material Mechanics*, CRC Press. doi:10.1201/b19626.
- Gordeyev, S. A. ve Ward, I. M., 1999. Time dependent recovery of oriented polyethylene, *Journal of Materials Science*, 34(19), 4767–4773. doi:10.1023/A:1004691206113.
- Granta Design, 2014. *Ces EduPack 2014 Software*, London.
- Hatamura, Y., 1999. *The Practice of Machine Design*, London, UK: Clarendon Press.
- Hearn, E. J., 1997. Miscellaneous Topics, *Mechanics of Materials 2* içinde, ss. 509–533, Elsevier. doi:10.1016/B978-075063266-9/50013-5.
- Hess, M., Allegra, G., He, J., Horie, K., Kim, J.-S., Meille, S. V., Vohlřdal, J. ve y.y. Williams–Landel–Ferry Equation (WLF Equation), IUPAC Standards Online, De Gruyter. doi:10.1515/iupac.85.0297.
- Heymans, N. ve Kitagawa, M., 2004. Modelling “unusual” behaviour after strain reversal with hierarchical fractional models, *Rheologica Acta*, 43(4), 383–389. doi:10.1007/s00397-003-0354-3.
- Jee, D. H. ve Kang, K. J., 2000. A method for optimal material selection aided with decision making theory, *Materials and Design*, 21, 199–206.
- Jourdan, C., Cavaille, J. Y. ve Perez, J., 1989. Mechanical relaxations in polypropylene: A new experimental and theoretical approach, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 27(11), 2361–2384. doi:10.1002/polb.1989.090271115.
- Krempl, E., 1999. Creep-Plasticity Interaction, *Creep and Damage in Materials and Structures* içinde, ss. 285–348, Springer Vienna. doi:10.1007/978-3-7091-2506-9_6.
- Krempl, Erhard ve Ho, K., 2000. Overstress model for solid polymer deformation behavior applied to Nylon 66, S. C. Schapery RA (Ed.), STP1357 Time

Dependent and Nonlinear Effects in Polymers and Composites içinde, ss. 118–137, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International. doi:10.1520/stp15832s.

- Lai, J. ve Bakker, A., 1995. An integral constitutive equation for nonlinear plasto-viscoelastic behavior of high-density polyethylene, *Polymer Engineering & Science*, 35(17). doi:10.1002/pen.760351703.
- Luo, W., Jazouli, S. ve Vu-Khanh, T., 2007. Modeling of Nonlinear Viscoelastic Creep of Polycarbonate, *e-Polymers*, 7(1). doi:10.1515/epoly.2007.7.1.191.
- Maleque, M. A., Dyuti, S. ve Rahman, M. M., 2010. Material Selection Method in Design of Automotive Brake Disc, *Proceedings of the World Congress*, London.
- Maniya, K. ve Bhatt, M. G., 2010. A selection of material using a novel type decision-making method: preference selection index method, *Materials and Design*, 31, 1785-1789.
- Marques, S. P. C. ve Creus, G. J., 2012. *Computational Viscoelasticity*, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-25311-9.
- Marriott, D. L., 2011. Isochronous Stress/Strain Curves: Origins, Scope and Applications, Volume 3: Design and Analysis, 373–379, ASMEDC. doi:10.1115/PVP2011-57130.
- Marzouk, M. M., 2011. ELECTRE III model for value engineering applications, *Automation in Construction*, 20, 596-600.
- Matsubara, S., Terada, K., Maeda, R., Kobayashi, T., Murata, M., Sumiyama, T. ve Nonomura, C., 2020. Viscoelastic-viscoplastic combined constitutive model for glassy amorphous polymers under loading/unloading/no-load states, *Engineering Computations* (Swansea, Wales). doi:10.1108/EC-05-2019-0197.
- McClung, A. J. W. ve Ruggles-Wrenn, M. B., 2008. The rate (time)-dependent mechanical behavior of the PMR-15 thermoset polymer at elevated temperature, *Polymer Testing*, 27(7), 908–914. doi:10.1016/j.polymertesting.2008.07.007.
- Mijovic, I., 1994. An introduction to the mechanical properties of solid polymers, I. M. Ward and D. W. Hadley, John Wiley & Sons, Chichester, UK, soft cover £19.95, *Polymers for Advanced Technologies*, 5(9). doi:10.1002/pat.1994.220050929.
- Milani, A. S. ve Shanian, A., 2006. Gear material selection with uncertain and incomplete data. Material performance indices and decision aid model, *Int J Mech Mater Des*, doi: 10.1007/s10999-007-9024-4.
- Murphey, W. T., 2004. Material structural performance index for strain based deployable trusses, *Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, California.

- Nikoukalam, M. T. ve Sideris, P., 2019. Experimental characterization and constitutive modeling of polyurethanes for structural applications, accounting for damage, hysteresis, loading rate and long term effects, *Engineering Structures*. doi:10.1016/j.engstruct.2019.109462.
- Okereke, M. I., Buckley, C. P. ve Siviour, C. R., 2012. Compression of polypropylene across a wide range of strain rates, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 16(4), 361–379. doi:10.1007/s11043-012-9167-z.
- Opricovic, S. ve Tzeng, G., 2004. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS, *European Journal of Operational Research*, 156, 445-455.
- Parate, O., Gupta, N., 2011. Material selection for electrostatic microactuators using Ashby approach, *Materials and Design*, 32, 1577-1581.
- Pasini, D., Smith, D. J. ve Burgess, S. C., 2003. Selection of arbitrarily scaled cross-sections in bending stiffness design, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Materials Design and Applications*, 217, 113-125.
- Previati, G., Mastinu, G. ve Gobbi, M., 2017. On the pareto optimality of ashby's selection method for beams under bending, *Journal of Mechanical Design*, Accepted manuscript.
- Qui, L., Sun, L. F., Liu, X. J. ve Zhang, S. Y., 2013. Material selection combined with optimal structural design for mechanical parts, *Applied Physics & Engineering*, 14, 383-392.
- Rao, R. V., 2013. *Decision Making in Manufacturing Environment Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods*, London: Springer-Verlag.
- Rashedi, A., Srithar, I. ve Tseng, K. J., 2012. Multi-objective material selection for wind turbine blade and tower: Ashby's approach, *Materials and Design*, 37, 521-532.
- Reddy, G. P., Gupta, N., 2010. Material selection for microelectronic heat sinks: An application of the Ashby approach, *Materials and Design*, 31, 113-117.
- Senden, D. J. A., Peters, G. W. M., Govaert, L. E. ve Van Dommelen, J. A. W., 2013. Anisotropic yielding of injection molded polyethylene: Experiments and modeling, *Polymer*, 54(21), 5899–5908. doi:10.1016/j.polymer.2013.08.047.
- Shanian, A. ve Savadogo, O., 2006. A material selection model based on the concept of multiple attribute decision making, *Materials and Design*, 27, 329-337.
- Shanian, A. ve Savadogo, O., 2006. A non-compensatory compromised solution for material selection of bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) using ELECTRE IV, *Electrochimica Acta*, 51, 5307-5315.

- Shanian, A. ve Savadogo, O., 2006. TOPSIS multiple-criteria decision support analysis for material selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cell, *Journal of Power Sources*, 159, 1095-1104.
- Srithep, Y., Nealey, P. ve Turng, L. S., 2013. Effects of annealing time and temperature on the crystallinity and heat resistance behavior of injection-molded poly(lactic acid), *Polymer Engineering and Science*, 53(3), 580–588. doi:10.1002/pen.23304.
- Sullivan, R. W. ve Simsiriwong, J., 2018. A Statistical Formulation for Master Modulus Curves of a Vinyl Ester Polymer, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57(10), 975–985. doi:10.1080/03602559.2017.1370103
- Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2014. West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/D0638-14.
- Test Methods for Stress Relaxation for Materials and Structures, 2021. West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/E0328-21.
- Tscharnuter, D., Jerabek, M., Major, Z. ve Pinter, G., 2012. Uniaxial nonlinear viscoelastic viscoplastic modeling of polypropylene, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 16(3), 275–286. doi:10.1007/s11043-011-9158-5.
- Viscoelastic Solids, 1998. 2017. doi:10.1201/9781315121369.
- Wang, P., Tang, Y., Ren, P. ve Zhang, H., 2024. An isochronous stress ratio logarithmic strain curve based clay creep model considering the effects of hardening and damage, *Scientific Reports*, 14(1), 7057. doi:10.1038/s41598-024-56488-2.
- Youssef, G., 2022. Viscoelastic behavior of polymers, *Applied Mechanics of Polymers*. 165–192, Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-821078-9.00006-5.
- Zhao, M. ve Koves W., 2012. Isochronous Stress–Strain Method With General State of Stress and Variable Loading Conditions for Creep Evaluation, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 134(5). doi:10.1115/1.4007038.
- Zink, T., Kehrer, L., Hirschberg, V., Wilhelm, M. ve Böhlke, T., 2022. Nonlinear Schapery viscoelastic material model for thermoplastic polymers, *Journal of Applied Polymer Science*, 139(17). doi:10.1002/app.52028.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Murat DEMİRTAŞ

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
2014 - 2017

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,
2021

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Mercedes Benz Aksaray Kamyon Fabrikası / Yaz Stajı
2. Mercedes Benz Aksaray Kamyon Fabrikası / Tedarikçi Kalite Mühendisi
2021 - halen

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Makaleler

Demirtaş, M., 2023. Makine tasarımlarında kullanılan malzeme indislerinin incelenmesi, 3. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 250-257.