İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZIR KALIPLAMA PESTİL KOMPOZİTLERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Akif ÜNAL

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZIR KALIPLAMA PESTİL KOMPOZİTLERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Akif ÜNAL
(506101440)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506101440 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet Akif ÜNAL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"HAZIR KALIPLAMA PESTİL KOMPOZİTLERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Sakin ZEYTİN Sakarya Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **22 Ocak 20015**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince, bana her konuda destek olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli danışman hocam Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.
Deneysel çalışmalarım ve eğitimim boyunca bana yol gösteren ve yardımcı olan başta değerli hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU ve Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI hocama teşekkür ederim.
Ayrıca tez çalışmamda bana yardımcı olan Mekanik Metalurji Çalışma Grubundaki tüm meslektaşlarıma çok teşekkür ederim.
Yine tez çalışmamda benden desteğini esirgemeyen FORD-OTOSAN Ürün Geliştirme Departmanına teşekkürü borç bilirim.

Ocak 2015

Mehmet Akif ÜNAL
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Giriş ve Tezin Amacı 1
2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER **5**
2.1 Tanımı Ve Sınıflandırılması 5
2.2 Termoset Kompozitler 7
2.3 Termoplastik Kompozitler 9
3. HAZIR KALIPLAMA PESTİL KOMPOZİTLER **11**
3.1 Malzemenin Gelişimi 11
3.2 Üretimi 12
3.2.1 Pasta hazırlama 13
3.2.2 Bileşenlerin karıştırılması 13
3.2.3 SMC pestilinin şekillendirilmesi 14
3.3 Avantajları 15
3.4 SMC'lerin Karakteristiği 16
4. MEKANİK ÖZELLİKLER **17**
4.1 Anizotropi 17
4.2 Mekanik Özellikleri Etkileyen Faktörler 18
4.2.1 Fiber oranının etkisi 18
4.2.2 Fiber uzunluğunun etkisi 19
4.2.3 Termal yaşlanma 20
4.3 Yorulma Özellikleri 20
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **23**
5.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması 23
5.2 Termal Yaşlandırma Deneyi 24
5.3 Yoğunluk Deneyi 24
5.4 Çekme Deneyi 25
5.5 Üç Nokta Eğme Deneyi 26
5.6 İzod Darbe Deneyi 27
5.7 Yorulma Deneyi 28
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME **29**
6.1 Termal Yaşlandırma Deneyi Sonuçları 29
6.2 Yoğunluk Deneyi Sonuçları 29
6.3 Çekme Deneyi Sonuçları 30
6.4 Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları 32

6.5 İzod Darbe Deneyi Sonuçları 34
6.6 Yorulma Deneyi Sonuçları 35
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER 39
KAYNAKLAR 41
ÖZGEÇMİŞ 43

KISALTMALAR

SMC	**:** Hazır Kalıplama Pestil Kompozit (Sheet Moulding Compound)
ASTM	**:** Amerika Malzeme ve Test Standartları Kurumu
TSE	**:** Türk Standartları Enstitüsü
ISO	**:** Uluslararası Standart Organizasyonu
USA	**:** Amerika Birleşik Devletleri
SRI	**:** Gerilme Aralığı Kesimi (Stress Range Intercept)
TDS	**:** Teknik Veri Sayfası (Technical Data Sheet)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Bazı malzemelerin hafifletme potansiyelleri 1
Çizelge 1.2 : Cam elyafı destekli kompozitler için hedefler. 2
Çizelge 2.1 : En yaygın kullanılan termoset reçinelerin tipik özellikleri 7
Çizelge 2.2 : En yaygın kullanılan fiberlerin tipik özellikleri 8
Çizelge 2.3 : Dolgu maddeleri ve kompozite etkileri 9
Çizelge 3.1 : SMC'lerin tipik kompozisyonu 12
Çizelge 4.1 : Karışım kuralı deneysel ve hesaplamalı karşılaştırma 19
Çizelge 6.1 : Termal yaşlandırma sonrası ağırlık kaybı 29
Çizelge 6.2 : Yoğunluk ölçüm sonuçları 30
Çizelge 6.3 : Çekme deneyi sonuçları 30
Çizelge 6.4 : Üç nokta eğme deneyi sonuçları 32
Çizelge 6.5 : İzod darbe deneyi sonuçları 34
Çizelge 6.6 : Basquin bağıntısına göre hesaplanan sabitler 37

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yapısal malzemelerin sınıflandırılması 5
Şekil 2.2 : Bileşenlerine göre kompozitlerin sınıflandırılması. 6
Şekil 2.3 : Takviye çeşidine göre kompozitlerin sınıflandırılması 6
Şekil 3.1 : SMC üretimi akış şeması 13
Şekil 3.2 : Bileşenlerin karıştırılması 13
Şekil 3.3 : SMC'nin hazır hale gelmesi 14
Şekil 3.4 : SMC'nin kalıplanması 14
Şekil 4.1 : Çeşitli kompozitlerin uzaydaki eksenleri 17
Şekil 4.2 : SMC'lerin eksenleri 18
Şekil 4.3 : Kompoziti oluşturan bileşenler ve kompozitin çekme eğrisi 18
Şekil 4.4 : Fiber uzunluğu etkisi 19
Şekil 4.5 : Farklı yükleme çeşitleri 21
Şekil 4.6 : %50 cam elyafı destekli SMC S-N eğrisi 22
Şekil 5.1 : Levhalardan üretim yönüne bağlı numune çıkartılması 23
Şekil 5.2 : Binder marka etüv 24
Şekil 5.3 : Çekme, yorulma deney numunesi 25
Şekil 5.4 : Instron 8801 marka test cihazı 25
Şekil 5.5 : Shimadzu üniversal test cihazı 26
Şekil 5.6 : Eğme deneyi numunesi 26
Şekil 5.7 : İzod darbe deneyi numunesi 27
Şekil 5.8 : Zwick marka darbe dayanımı test cihazı 27
Şekil 6.1 : Elastisite modülü karşılaştırmalı grafiği 31
Şekil 6.2 : Çekme dayanımı karşılaştırmalı grafiği 31
Şekil 6.3 : 3 nokta eğme deneyinin görünümü 32
Şekil 6.4 : Eğme modülü karşılaştırmalı grafiği 33
Şekil 6.5 : Eğme dayanımı karşılaştırmalı grafiği 33
Şekil 6.6 : Darbe dayanımı karşılaştırmalı grafiği 34
Şekil 6.7 : Üretim yönünde gerilme genliği-çevrim sayısı grafiği 35
Şekil 6.8 : Üretim yönüne dik gerilme genliği-çevrim sayısı grafiği 36
Şekil 6.9 : Tüm numune sonuçlarının gerilme genliği-çevrim sayısı grafiği 36

HAZIR KALIPLAMA PESTİL KOMPOZİTLERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Otomotiv sektörü, direkt veya dolaylı olarak birçok sektörün lokomotifi konumunda bulunmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle beraber, performansın daha iyi seviyelere çıkartılması, çevreye verilen tahribatın en düşük seviyelere indirilmesi çalışmaları gün geçtikçe hız kazanmaktadır. Araçlarda ağırlık azaltılması yalnızca performansı değil bunun yanında çevresel ve ekonomik birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Hafifletme çalışmalarının avantajları olarak zararlı gaz salımının azaltılması, araçların taşıma kapasitelerinin artması, yüksek performanslı güç sistemlerinin geliştirilmesi ve fosil yakıt kullanımının azaltılması sayılabilir.

Birçok mühendislik alanının ortak ürünü olan araçlarda hafifletme çalışmalarının odağında malzeme bilimi önemli bir yer tutmakta, daha hafif malzemelerin kullanılması çalışmalarında teknolojik boşlukların giderilmesi hususunda çaba sarf etmektedir. Araçlarda büyük oranda kullanılan demir alaşımları yerine daha hafif olarak kullanılabilecek malzemeler araştırılmaktadır. Bunlar, magnezyum alaşımları, alüminyum alaşımları gibi metaller ve çeşitli kompozitler olarak sayılabilir. Fakat yıllardır kullanılan demir alaşımları yerine bu materyallerin geçmesi için yeni dizayn unsurları geliştirilmeli ve malzeme özellikleri hassasiyetle belirlenmelidir.

Kompozitler hafif materyaller içerisinde en çok değişken unsur barındıran malzemelerdendir. Maliyet avantajı ve üretim kolaylığı sebebiyle polimer matrisli kompozitler en yaygın kullanım alanına sahiptir. Polimer çeşitlerinin fazlalığı ve birçok duruma farklı cevap vermeleri sebebiyle uygulamaya bağlı olarak doğru tercihin yapılması için büyük bir hassasiyet gerekmektedir. En kaba haliyle polimer matrisli kompozitler, termoset ve termo plastik olarak ayırabilir. Seçilen takviye çeşidi çeşitli katkılar ve takviye şekline bağlı olarak bu sınıflandırma farklı kullanım alanları için genişletilebilmektedir.

Bu çalışmada saç çelikler ile değiştirildiğinde %30 ağırlık azaltılması avantajı sağlaması beklenen cam elyafı takviyeli, doymamış polyester matrisli hazır kalıplama pestil (SMC) kompozitlerin araçta çalışırken maruz kalacağı etkilere karşı nasıl davranacağını ömngörmemizi sağlayacak çeşitli testler yapılmıştır.

Çalışmada, malzeme özellikleri ve modelleme ile ilgili hedefler doğrultusunda, araçlarda özellikle dış yüzeylerde kullanılan ve kullanımı değişik alanlara kayan SMC kompozitlerin mekanik karakterizasyonunun yapılarak, dizayn için optimum malzeme datasının elde edilmesi hedeflenmiştir. Seçilen SMC çeşidi üzerinde, termal yaşlanma, mekanik testler ve yorulma deneyleri yapılarak bu veriler yorumlanmış ve SMC'nin dizayn ve kullanım koşullarında ömür öngörüsünü belirleyecek malzeme dataları elde edilmiştir.

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF SHEET MOULDING COMPOUNDS

SUMMARY

Weight reduction is one of the most important research areas in the automotive industry. Reducing vehicle weight provides a combination of environmental and economic advantages. Weight reduction advantages can be given as follows: Reduction in fuel consumption, development of high-performance power system, reduction of exhaust emissions, increase in capacity of commercial vehicles.

In 2013, U.S.A. Department of Energy Office of Vehicle Technologies, has created a report as a part of their work for commercial vehicles, setting out the need for lightweight materials to ensure maximum efficiency. Targets are determined for mass reduction potential, objectives and technological space for materials that can be used. Truck (heavy commercial) target set for 2020 was 7% weight reduction, which was determined as 31% for 2050.

Use of lighter materials is in the center of the mass reduction studies. Some materials, can be replaced with heavier materials to reduce mass of a part and therefore all vehicle. This is indeed an advantage.

The materials used in structural applications can be studied under three major categories: metals, ceramics, polymers. Combinations of these three types can be made using various amounts of each. Such combinations of these three main groups (metals, ceramics, polymers) make a new material type which is called “Composite material”. A composite materials takes the beneficial and different properties of the materials forming its structure.

Composite component can be classified according to types or compounds forming it. Sheet moulding compound composites, according to the compound class can be classified “polymer matrix composites”. Same material can be classified “chopped fiber reinforced composite class according to reinforcement types.

Composites are widely used as they are implemented easily, light and cheap solution for some parts. Higher fiber reinforcement volume in composite compound provides better elastic properties, creep strength, impact strength and temperature resistance. Disadvantages of fiber addition can be listed as increased costs, increase in fluidity, anisotropic properties and increased wear effect. Orientation of fiber composites is the most important factor for determining final properties of the final part made of composites.

During design phase, all material propeties should be known to make an optimum design and to predict the lifetime of the part while the system is working. All response of the material to the external effects, should be analysed by tests and characterization methods. To estimate the damage that may occur over time, reference material data are required to verify the design.

This thesis study subject aimed at filling the technological gap for Sheet moulding compounds (SMC, a composite that is a sub-group of glass fiber reinforced composites)

In this thesis, the goals are to determine the optimum material properties for modeling tools design, especially on the outer surface usage. Thermal aging, fatigue and mechanical tests have been performed on the selected sheet moulding compond (SMC).

For thermoset composites, 95% polyester and epoxy resins are in use. Polyester can be cured at room temprature and atmospheric pressure. As a result of these properties polyester resins have a widespread usege in composites. Polyester resin composites have good mechanical, electrical, and chemical properties, show high dimensional stability and are inexpensive. Polyester is a flexible polymer, may be transformed to a hard or brittle material by adding resin additives, glass fiber and filler. Sheet moulding compounds (SMC) are suitable for continuous production of the final product.

Glass fiber as a reinforcement material has the highest usage percentage around 90%. Carbon, graphite, boron and other reinforcements such as aremid fibers are in use for applications that require higher performance. Glass fiber reinforcement can be found in many different forms (fabric, mat, chopped, continuous, etc.). For the highest strength, the most appropriate usage is continuous fiber reinforcement composites. Glass fiber reinforced polyester composites are used to manufacture automotive body panels, sitting tools, boats, bathroom cabinets and a variety of protection devices. Structural difference of thermoset composites and thermoplastics cause different usage areas. Usage area also depends on the feature of various fillers, calcium carbonate, mica, talc add. Some advantages of filler materials can be listed as follows; Cost reduction, density control, a relatively high thermal conductivity, lower thermal expansion and improved mechanical properties. Properties of the filler material is influenced by the particle size and surface chemical properties.

SMC composites can be defined as fiber reinforced semi-finished products. In the 1950’s, it was discovered in Germany and America that unsaturated polyester (UP) could be thickened with various additives. This discovery was the basis of reproducibility of sheet moulding compounds (SMC). The systems made of additive impregnated resin applied to the fiber cloth led to the production of raw materials with smoother surface properties. Fiber chopping system, attachment of which made it available to use chopped fibers in SMC production, was invented in the United States of America. Chopped fiber usage is quite cheap compared the use of expensive fiber cloth. SMC (sheet moulding compound) won an international name. In the 1980’s use of random homogeneous dispersed fibers and fiber content of 60% provided the high strength with pre-preg. After a while, automotive OEMs began to use SMC in many car models and parts for its various advantages. SMC production today through out the world consist of 40% of thermoset polymer matrix composites. SMC composites formed of fibers are embedded in a polymer matrix. The polymer matrix is adjusted depending on the desired chemical properties. The composition of the polymer matrix affects resistance to chemicals, weather resistance, surface quality, flexibility, compressibility, shrinkage, fire resistance, strength, dynamic characteristics (fatigue) and surface hardness properties. Although there is a wide range of matrix and reinforcement options for SMC optimization, cost advantages,

short production cycle, good strength and physical properties and atmosphere resistance let the unsaturated polyester (UP) resins be used in a large area.

Fatigue is the progressive and localized structural damage that occurs when a material is subjected to cyclic loading. The nominal maximum stress values that cause such damage may be much less than the strength of the material typically quoted as the ultimate tensile stress limit, or the yield stress limit.

In this study, 25% glass fiber reinforced, unsaturated polyester matrix, sheet moulding compound composite sample plates were characterized. Samples were taken perpendicular to the manufacturing direction and parallel the direction of manufacturing and compared. Density test, thermal aging test, tensile test, three-point bending test, Izod impact test and axial fatigue test were performed on flat plate samples that were 25% chopped glass fiber reinforced unsaturated polyester SMC composite. Mechanical properties to predict complete life time (fatigue) and the required design parameters for use were identified in this study.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Tezin Amacı

Otomotiv sektörünün en önemli çalışma konularından birisi, ağırlığın azaltılmasıdır. Ağırlık azalatılması yalnızca araç performansı değil, çevresel ve ekonomik bir çok avantajı bir arada sunmaktadır. Ağırlık azaltılmasının avantajları genel başlıklarda aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Yakıt sarfiyatının azalması
- Yüksek performanslı güç sistemlerinin geliştirilmesi
- Egzos salınımının azalması
- Ticari araçlarda taşıma kapasitesinin artması [1]

Hafifletme çalışmalarının merkezinde, daha hafif materyallerin kullanlıması yatmaktadır. Bazı malzemelerin, daha ağır malzemeler yerine kullanılabilmesi durumunda, ulaşılabilecek hafifletme oranları aşağıdaki Çizelge 1.1'de görülmektedir.

Çizelge 1.1 : Bazı malzemelerin hafifletme potansiyelleri. [1]

Hafif Malzeme	Değişen Malzeme	Hafifleme (%)
Karbon Fiber Kompozitler	Çelik	50 – 70
Magnezyum	Çelik, Dökme Demir	30 – 70
Aluminyum	Çelik, Dökme Demir	30 – 60
Cam Elyaflı Kompozitler	Çelik	25 – 35
Gelişmiş Malzemeler	Çelik	10 – 30
Gelişmiş Yüksek Dayanımlı Çelikler	Çelik	10 – 30
Yüksek Dayanımlı Çelikler	Çelik	0 – 15

2013 yılında, U.S. Enerji Departmanı, Araç Teknolojileri Ofisi, yaptığı bir çalışmada; ticari araçlarda en fazla verimliliği sağlayacak hafif materyaller için

ihtiyaçları belirleyen bir rapor oluşturmuştur. Raporda araç sınıfları ve sistemlerinin, hafifleme potansiyelleri, hedefleri ve kullanılabilecek materyaller için teknolojik boşluklar, hedefleri belirlenmiştir. Çekici kamyon (ağır ticari) bir araç için belirlenen hedefler 2020 yılında % 7 hafifletme iken, bu hedef 2050 yılında % 31 olarak tesbit edilmiştir. [2]

Bu tez çalışmasının konusu olan Cam Elyafı Destekli Hazır Kalıplama Pestil (SMC) kompozitlerin üst grubu olan Cam Elyaflı kompozitler için, hedefler ve teknolojik boşluklar, aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Çizelge 1.2 : Cam elyafı destekli kompozitler için hedefler. [2]

	2020	2025	2030	2040	2050
Malzeme özellikleri & Modelleme	Temel bir malzeme özelliği bilgisi	Geniş bir malzeme özelliği veri bankası	–	–	Modelin testle doğrulanabildiği malzeme datası
Direngenlik	Geniş saçılma aralığı	% 30 gelişmiş direngenlik	–	–	Aluminyum ile aynı direngenlik
Görünüm	A sınıfı yüzey görünümü	Boyalı çelikle aynı görünüm	–	–	2025 ile aynı
Geri dönüşüm, Kimyasal & enerji dönüşümü	Geri dönüşüm yok	% 50 geri dönüşüm	–	–	Biriken atıkların tamamen dönüştürülmesi
Takviye karakteristiği	Fiber kırılmasına bağlı proses	Öngörülebilen fiber karakteri	–	–	Aluminyum benzeri termoplastikler
Bağlanabilirlik	Standart olmayan birçok metod	Bir çok kompozit için standart	–	–	Sürdürülebilir gelişmiş metod ve standartlar
Sistem maliyeti	SMC $1-2 /lb	Çelik ile aynı	–	–	2025 ile aynı
Dizayn optimizasyonu ile hafifleme	Parçada %30 hafifleme	Parçada % 40 hafifleme	Parçada % 45 hafifleme	Parçada % 50 hafifleme	
Standartlar	Günümüzle aynı	% 50 Gelişmiş	% 70 Gelişmiş	% 80 Gelişmiş	% 95 Gelişmiş
Proses	Fiber dağılımına bağlı çarpılma	Çarpılma yok	–	–	Sürekli ilerleme
Döngü Süreleri					
SMC	1,5 dk	<1 dk	45 s	30 s	30 s

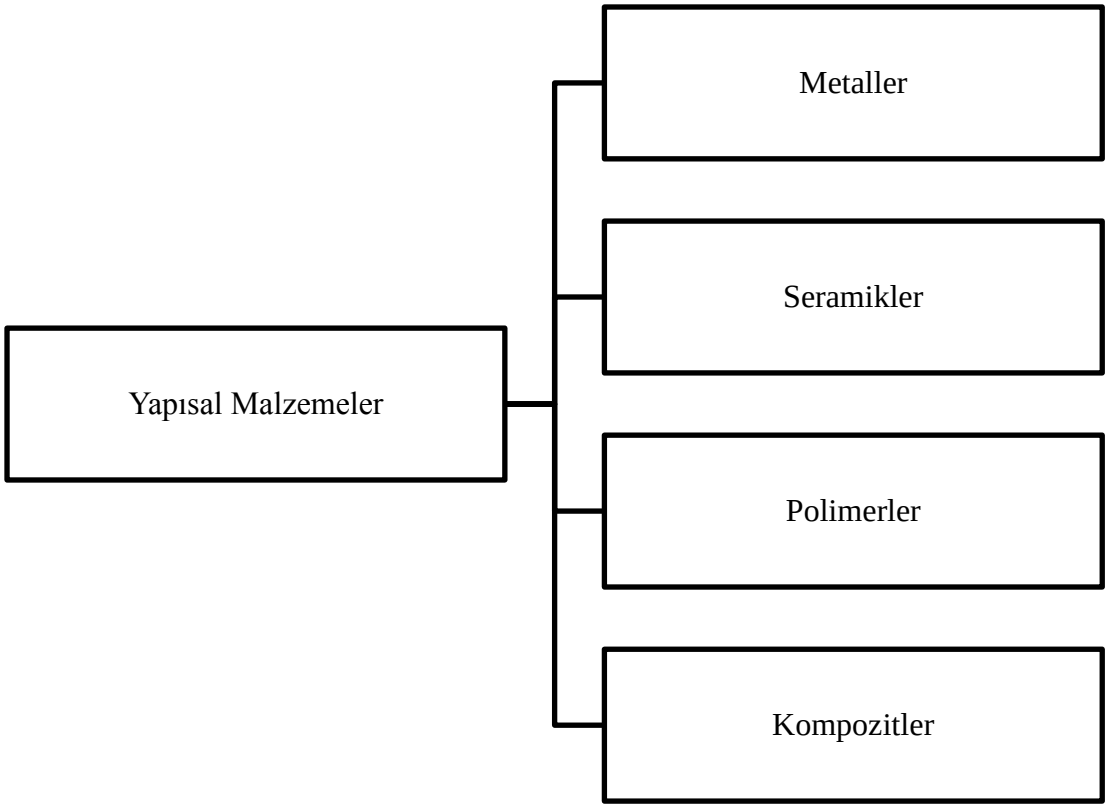
Tasarım aşamasında, parçanın veya sistemin ihtiyaç duyduğundan fazla malzeme kullanılmaması ve kullanılan malzemelerin kullanım sürecinde karşı karşıya kalacağı dış etkenlere vereceği tepkileri ve oluşabilecek hasarları önceden bilebilmek için malzeme özelliklerinin iyi tanınması, zamanla bu özellikler referans alınarak yapılan dizaynların doğrulanması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, Çizelge 1.2'de belirlenen malzeme özellikleri ve modelleme ile ilgili hedefler doğrultusunda, araçlarda özellikle dış yüzeylerde kullanılan ve kullanımı değişik alanlara kayan SMC kompozitlerin mekanik karakterizasyonunun yapılarak, dizayn için optimum malzeme datasının elde edilmesi hedeflenmiştir. Seçilen SMC çeşidi üzerinde, termal yaşlanma, mekanik testler ve yorulma deneyleri yapılarak bu veriler yorumlanmıştır.

2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER

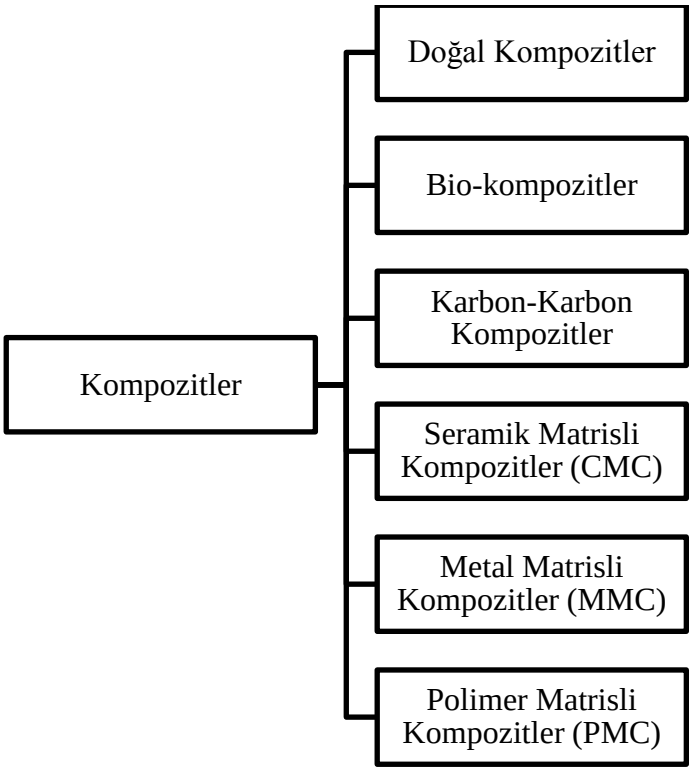
2.1 Tanımı Ve Sınıflandırılması

Yapısal uygulamalarda kullanılan malzemeler dört ana grup altında incelenebilir. (metaller, seramikler, polimerler, kompozitler) Bu malzemelerden üç ana grubun (metaller, seramikler, polimerler) farklı özelliklerinden faydalanmak amacıyla, iki veya daha fazlasının bir araya gelerek oluşturdukları yapıya "Kompozit" adı verilmektedir. [3]

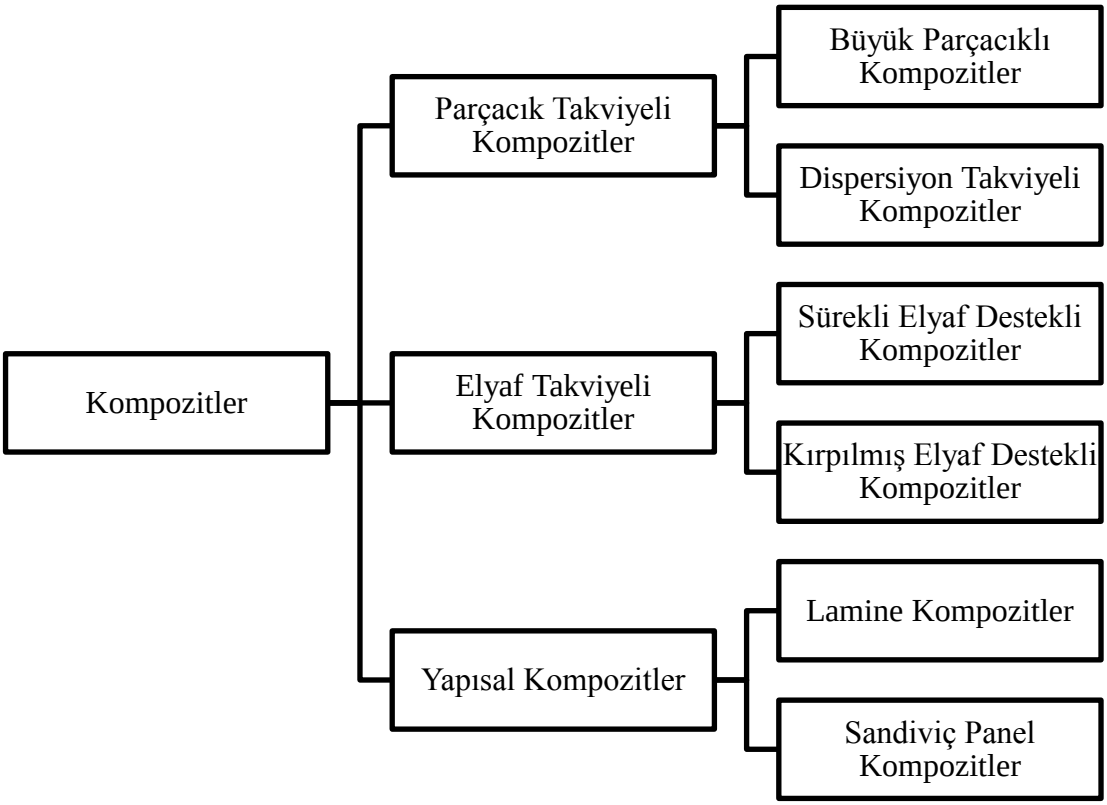


Şekil 2.1 : Yapısal malzemelerin sınıflandırılması. [1]

Kompozitler, bileşenlerine göre veya takviye çeşidine göre sınıflandırılabilmektedir. Hazır kalıplama pestil kompozitler, bileşenlerine göre "polimer matrisli kompozitler" sınıfına, takviye çeşidine göre ise "kırpılmış elyaf destekli kompozitler sınıfına girmektedir.



Şekil 2.2 : Bileşenlerine göre kompozitlerin sınıflandırılması. [1]



Şekil 2.3 : Takviye çeşidine göre kompozitlerin sınıflandırılması. [1]

Polimer Matrisli Kompozitler, kullanılan polimer tipine bağlı olarak iki sınıfa ayrılabilir.

- Termoset Kompozitler
- Termoplastik Kompozitler

2.2 Termoset Kompozitler

Kompozit endüstrisinde, verdiği reaksiyonla kararlı hale gelmesi ve kolay uygulanması sebebiyle yaygın kullanıma sahiptir. Termoset kompozitler, elastik özelliklerini, sürünme dayanımını, darbe dayanımını ve sıcaklığa dayanımını arttırmak için cam, karbon veya aramid elyafla desteklenirler. Fiber eklenmesinin dezavantajları ise, maliyetin artması, akışkanlığın artması, anizotropik özellik göstermesi ve işleme araçlarında aşınma etkisinin artmasıdır. Fiberlerin termoset içerisinde yönlenmesi, kompozitten üretilen son parçanın final özelliklerini belirleyen en önemli unsurdur.

Çizelge 2.1 : En yaygın kullanılan termoset reçinelerin tipik özellikleri. [2]

Malzeme	Özgül Ağırlık	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Uzama (%)	Isıl Tahribat Sıcaklığı (°C)	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	Toparlanma
Doymamış Polyester (UPE)	1,1 – 1,4	35 – 105	2,0 – 3,5	1 - 5	60 – 205	-	5 - 12
Vinil Ester (VE)	1,1 – 1,32	73 – 81	3 – 3,5	3,5 – 5,5	93 – 135	-	5 - 10
Epoksi (EP)	1,2 – 1,3	55 – 130	2,75 – 4	1 – 3	70 – 80	180 – 260	1 - 5
Phoneiks (PF)	1,35 – 1,41	6 – 9	2 – 3,5	1 – 3	95 – 105	-	3 – 5
Poliamid (PI)	1,28 – 1,34	38 – 85	3,9 – 4,1	1,5	-	220 – 320	1 - 2

Termoset kompozitlerin %95'ini polyester ve epoksi reçineler oluşturmaktadır.Polyesterin yaygın kullanımında oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında kürlenebilmesi öenmli rol oynar. Polyester reçinesi, iyi mekanik, elektriksel, kimyasal özellikler gösteren ve boyutsal kararlılığı yüksek, ucuz bir bileşendir. Polyester, esnek, sert veya kırılgan bir materyalle birleştirilebilir. Reçine, cam elyafı, dolgu ve çeşitli katkılarla beraber (SMC) hazır kalıplama pestil formunda, sürekli üretime uygun şekilde, yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan termoset reçinelerin, tipik özellikleri Çizelge 2.1'de görülebilir.

Cam elyafı termoset kompozitlerde en yüksek oranda (%90) kullanılan takviye malzemesidir. Karbon, grafit, bor, aremid gibi diğer takviyeler yüksek performans gereken uygulamalarda yer bulmaktadır. Cam elyafı takviyeleri birçok farklı formda bulunabilmektedir. (kumaş, mat, kırpılmış, sürekli vs.) Kırpılmış uzun fiberler en yüksek dayanıma sahip olmasına rağmen, sürekli fiberler dayanım için en uygun kullanımdır.

Cam elyafı fiber takviyeli polyester kompozitler, otomotiv gövde panelleri, oturma araçları, deniz araçları, banyo kabini ve çeşitli koruma gereçleri olarak kullanım alanı bulmaktadır.

Çizelge 2.2 : En yaygın kullanılan fiberlerin tipik özellikleri. [2]

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Termal Genleşme (10^{-6}/C)	Yoğunluk (g/cm^3)
E-cam elyafı	72,4	3,5	4,8	5	2,54
S-cam elyafı	86,9	4,3	5,0	2,9	2,49
Karbon elyafı	210 – 400	3,5 – 5,2	1,5 – 1,8	-	1,8
Bor elyafı	385	2,8	-	-	2,63
Kevlar 49	131	3,62	2,8	-	1,45

2.3 Termoplastik Kompozitler

Termoplastik kompozitlerin yapısal olarak termosetlerden farkı, kullanılan polimer çeşididir. Yine elyaf (cam, carbon, aramid) kullanılırken, ihtiyaç olan özelliğe bağlı olarak, kalsiyum karbonat, mika, talk gibi çeşitli dolgular kullanılmaktadır.

Dolgu malzemelerinin bazı avantajları şöyle sıralanabilir; maliyet azaltma, yoğunluk kontrolü, nisbeten yüksek termal iletkenlik, daha düşük termal genleşme ve gelişmiş mekanik özellikler. Dolgu malzemelerinin özellikleri, partikül boyutundan, şeklinden ve yüzeyin kimyasal özelliklerinden etkilenmektedir.

Aşağıdaki Çizelge 2.3'de bazı dolgu malzemelerinin etkileri görülebilir.

Çizelge 2.3 : Dolgu maddeleri ve kompozite etkileri. [2]

Dolgu Malzemesi Fonksiyonu	**Dolgu Malzemesi**
Mekanik özellkileri düzenlemesi	Talk, kaolin, cam küre, odun talaşı, $CaCO_3$ Cam elyafı, mika, kil, karbon nanotüp, karbon elyafı, aramid elyafı, doğal fiber
Yanma özelliklerini iyileştirme	$Al(OH)_3$, $Mg(OH)_2$
Elektrik ve manyetik Özellikler	Metaller, karbon elyaflar, nano tüpler, mika
Yüzey Özellikleri	Silika, grafit, $CaCO_3$, Politetra floro etilen
Parçalanabilirlik	Selüloz
Boyutsal Kararlılık	Parçacık fiberler, cam parçaları, mika
Darbe Dayanımı	Parça elyaflar, cam, $BaSO_4$

3. HAZIR KALIPLAMA PESTİL KOMPOZİTLER

3.1 Malzemenin Gelişimi

Hazır kalıplama pestil kompozitler (SMC), fiber destekli yarı mamül ürünler olarak da tanımlanabilir. [5]

1950'lerde doymamış polyesterin (UP) çeşitli katkılarla kalınlaştırılabileceği Amerika ve Almanya'da keşfedildi. Bu keşif hazır kalıplama pestil (SMC) üretilebilirliğinin temelini oluşturmaktadır. Öncelerde elyaf bezlere reçinenin emdirilmesi olarak uygulanan sistem, sonrasında yine katkılarla gelişerek çatlaksız ve daha düzgün yüzey özelliklerinde hammadde üretilmesini sağlamış oldu ve bu keşfi malzemenin elektrik sektöründe kullanımı takip etti. [6]

Amerika'da keşfedilen, elyafın kırpılarak kullanımını mümkün kılan, sisteme eklenen elyaf kırpma sistemiyle beraber, pahalı elyaf bezlerin kullanımından oldukça ucuz olan kırpılmış fiber kullanımına geçildi ve SMC (hazır kalıplama pestil) olarak uluslarası bir isim kazandı. [6]

1960'ların başlarında hali hazırda, kabin üretimi, elektrik muhafaza kutularında kullanılan SMC, daha verimli kürleme prosesleriyle beraber, silindir kapağı gibi yük taşıyan yapısal uygulamalrda kullanılmaya başlandı. [6]

1970'lerde yine reçine üzerine yapılan çalışmaların etkisiyle, ilk kez beklenen yüzey kalitesini karşılayabilen SMC ler, otomobil panellerinde kullanılmaya başlandı. [6]

1980'lerde, yönlü elyafların kullanılabilmesi, rastgele - honojen dağılmış elyafların kullanlabilmesi ve elyaf oranının % 60' lara çıkarılabilmesi ile beraber sağlanan yüksek dayanım sonucunda, bir çok otomobil modelinde ve parçasında kullanılmaya başlandı. [6]

SMC kompozitler, günümüzde dünyada kullanılan elyaf takviyeli, termoset polimer matrisli kompozitlerin % 40'ını oluşturmaktadır. [7]

3.2 Üretimi

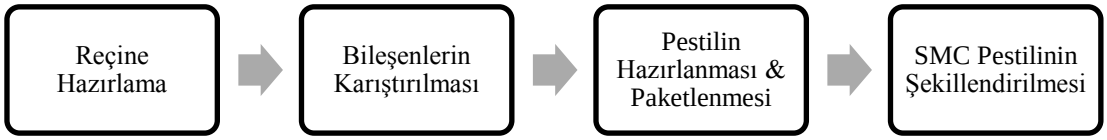
SMC parçalar, SMC hazır pestillerden basınçlı şekillendirme metoduyla üretilmektedir. Basınçlı şekillendirme, yüzey kalitesi yüksek ve diğer metodlara kıyasla yüksek miktarda parça üretimine imkan sağlamaktadır. [8]

SMC hazır pestili elyaf, reçine ve çeşitli katkılar içermektedir. Cam elyafı tipik olarak, kırpılmış, 25 - 50 mm uzunluğunda ve 14 mikron çapında pestile ilave edilmektedir. Tipik bir SMC kompozisyonu Çizelge 3.1'de görülebilir.

Çizelge 3.1 : SMC'lerin tipik kompozisyonu. [8]

Bileşen	Ağırlık Yüzdesi	Fonksiyonu
Doymamış Polyester	10-16	Reaktif Polimer
Cam Elyafı	~30	Takviye
Kalsit	~40	Dolgu
Magnezyum Oksit	0,5-0,7	Viskozite Arttırıcı
Çinko Stereat	1,0-2,4	Yağlayıcı
Polystrene	11-13	Reaktif Monomer - Bağlayıcı

SMC üretiminde Şekil 3.1'de görülen akış planı izlenmektedir. [6]



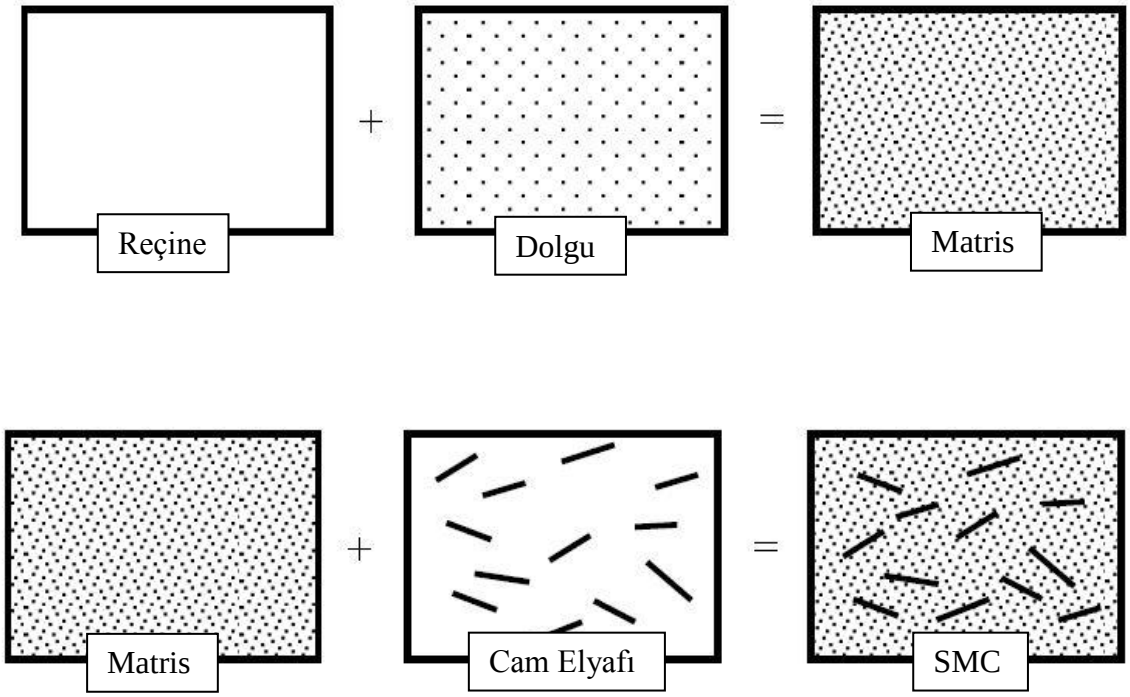
Şekil 3.1 : SMC üretimi akış şeması.

3.2.1 Pasta hazırlama

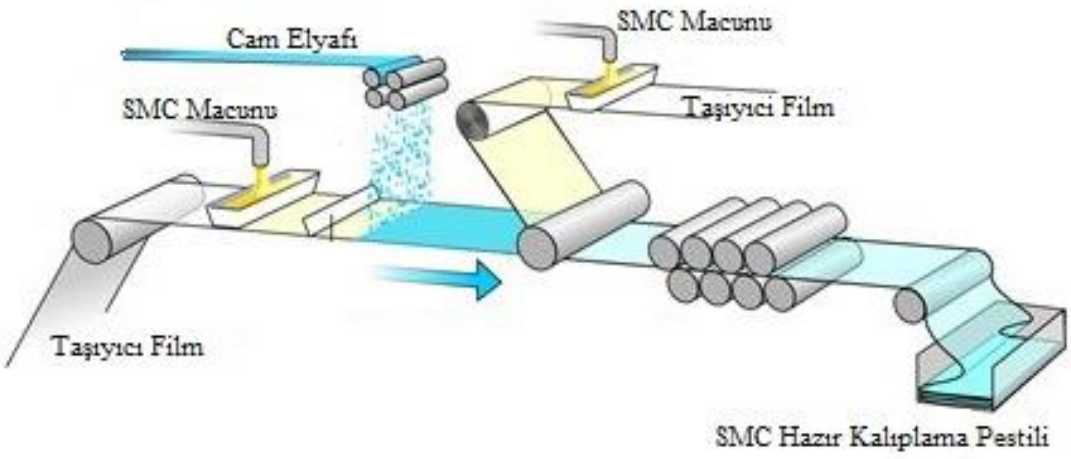
Dolgu ve takviye bileşenleri hariç, ihtiyaç duyulan özelliklerde kimyasalların karıştırılarak reçine oluşturma işlemidir.

3.2.2 Bileşenlerin karıştırılması

Hazırlanan reçine ile uygun oranda dolgu maddesinin karıştırılması işlemidir.



Şekil 3.2 : Bileşenlerin karıştırılması. [9]

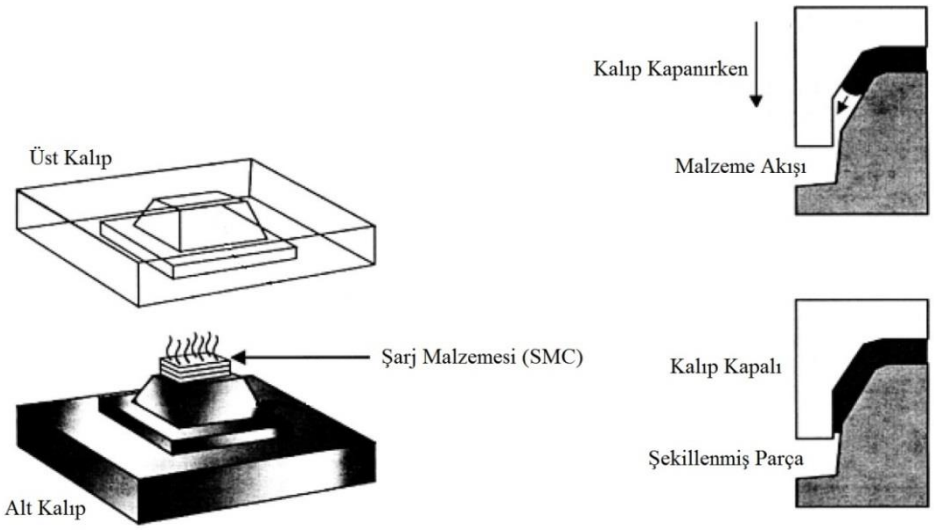


Şekil 3.3 : SMC'nin hazır hale gelmesi. [10]

Hazırlanan matris macunu içine homojen şekilde, istenilen oranda cam elyaflarının kırpılarak dağıtılması ve hazır pestilin oluşturulması aşamasıdır. Hazır pestil bu aşamadan sonra rulo halinde veya kutularda paketlenerek, uygun akışkanlığa ulaşması için olgunlaşmaya bırakılır.

3.2.3 SMC pestilinin şekillendirilmesi

SMC pestilinin yeterince olgunlaşmasından sonra, küçük parçalara bölünüp, yüzey filmlerinin sökülerek, ısıtmalı hidrolik/mekanik preslere şarj edilmesi ve ısıtılmış kalıpların basınçla kapatılıp kürlenme için beklenmesi ve sertleşmiş ürünün kalıptan alınması prosesidir.



Şekil 3.4 : SMC'nin kalıplanması. [6]

Şarj kalıp yüzeyinin % 50 ila % 70' ini kaplayacak şekilde kesilen SMC pestilinin kalıp ortasına yerleştirilmesi işlemidir. Şarj pestilin akışı ve kalıbı doldurması aşısından önemlidir. Kalıplar kapandıktan sonra, önceden ısıtılmış kalıplarda termoset reaksiyonun gerçekleşmesi (kürleme) işlemi için, tipik olarak 130 – 160 $^{\circ}$C de, parça kalınlığına bağlı olarak en az 1 dk olmak üzere beklenerek işlem tamalanır ve kalıplar açılarak parça presten alınır. [5]

3.3 Avantajları

* SMC kompozitler, fiber içeriği ve reçine kimyasalları/oranları değiştirilerek geniş bir özellik aralığında üretilmesi mümkündür.

* Basınçla kalıplama metodu, çok geniş yüzeylerin veya karmaşık şekillerin çok kısa döngü süresinde üretilmesine izin vermektedir. Aynı zamanda çeşitli bağlantı elemanı gibi eklentilerin parçada bulunmasına imkan sağlamaktadır.

* Oldukça iyi seviyede yüzey kalitesine sahip metod, birçok görünen parça için yeterlilik sağlamaktadır.

* Saç çelikle kıyaslandığında, daha fazla ve detaylı dizayn esnekliği sağlarken, üretim karmaşası daha düşüktür.

* Yine saç çeliğe göre eşdeğer dayanımında, % 20-35 daha hafifken, seri üretim maliyeti daha düşüktür.

* Saç çeliğe göre, ses absorbsiyonu ve akustik özellikleri daha iyidir.[5,6]

* Üretim prosesi ve kimyasalı, önceden renklendirmeye izin vermektedir.

* Diğer kompozitlere kıyasla, üretimine göre daha hızlı döngü süresi, son şekil olarak boyut kararlılığı tercih edilmesini sağlayan avantajları arasındadır.

3.4 SMC'lerin Karakteristiği

SMC kompozitler, polimer matris içine gömülü fiberlerden oluşmuştur. Polimer matris kimyasalı istenen özelliklere bağlı olarak ayarlanmaktadır. Polimer matrisin içeriği aşağıda sıralanan özellikleri etkilemektedir.

- Kimyasallara dayanımı
- Hava koşullarına dayanımı
- Yüzey kalitesi
- Esneklik
- Preslenebilirlik
- Kürlenmede boyut değişimi
- Yanmazlık
- Dayanım
- Dinamik özellikleri (yorulma)
- Yüzey sertliği

Fiber yapısı ve dağılımı ise aşağıda sıralanan özellikleri etkilemektedir.

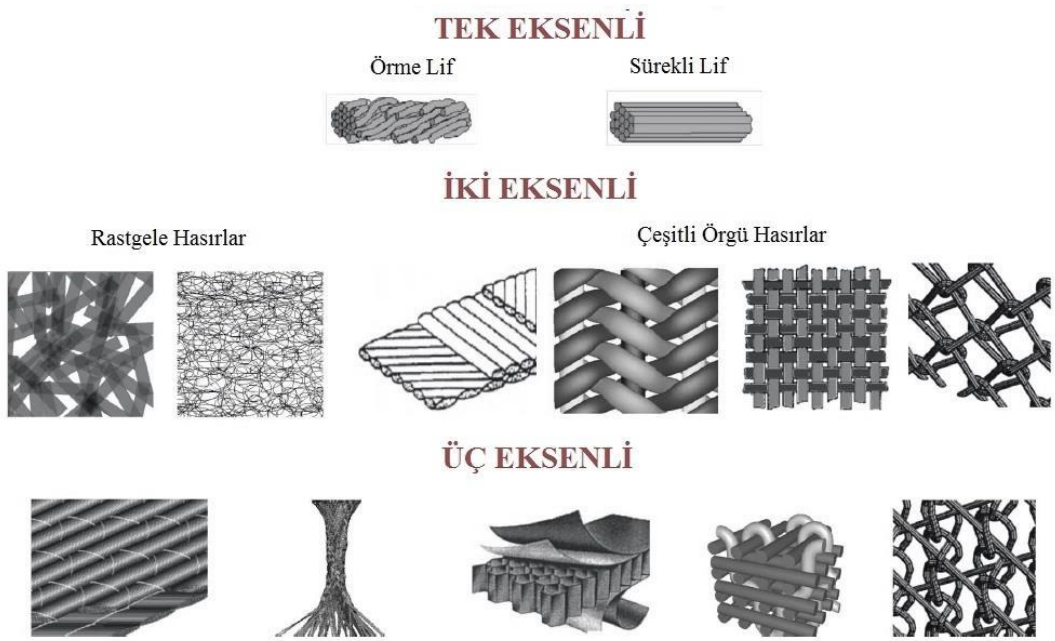
- Dayanım ve rijitlik
- Kürlenme sonrası boyutsal değişim [6]

SMC'lerin özellik optimizasyonu için geniş bir matris ve takviye seçeneği mevcut olmasına rağmen, maliyet avantajı, kısa üretim döngüsü, iyi dayanım ve fiziksel özellikler sağlaması ve atmosfer dayanımı açısından avantajlı olan Doymamış Polyester (UP) reçineler en büyük kullanım alanına sahiptir. [11]

4. MEKANİK ÖZELLİKLER

4.1 Anizotropi

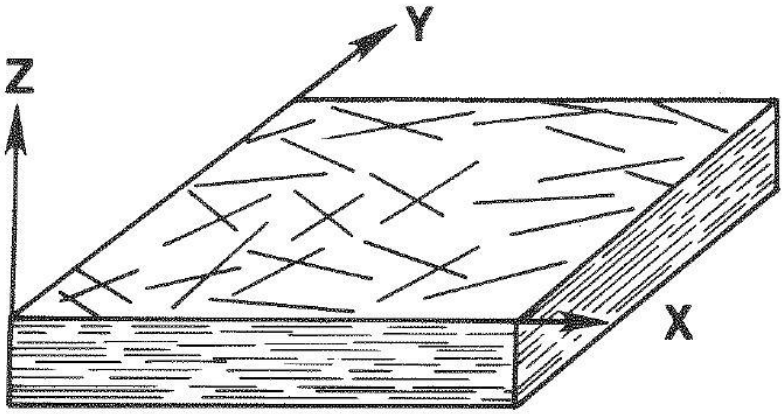
Kompozitin mekanik sabitleri, malzemenin yüklemeye karşı vereceği tepkileri bilebilmek adına gerekli ve anlamlıdır. Malzemenin mekanik karakterini tanımlayabilmek için gerekli malzeme sabiti sayısı, malzemenin üç boyutlu uzaydaki simetrisiyle belirlenebilir. Şekil 4.1'de çeşitli kompozitlerin eksenleri görülmektedir.



Şekil 4.1 : Çeşitli kompozitlerin uzaydaki eksenleri. [4]

Hazır kalıplama pestil kompozitler, uzayda iki eksenli simetriye sahiptir ve bölgesel homojensizlikleri ihmal edildiğinde, enlemesine izotropik sayılabilir. (Şekil 4.2)

Bu durumda, bölgesel homojensizlikler ihmal edildiğinde x ve y yönündeki mekanik sabitlerinin eşit olması beklenirken, z yönünde farklı bir karakteristik beklenmektedir. ([Çekme Dayanımı]$_x$=[Çekme Dayanımı]$_y$)

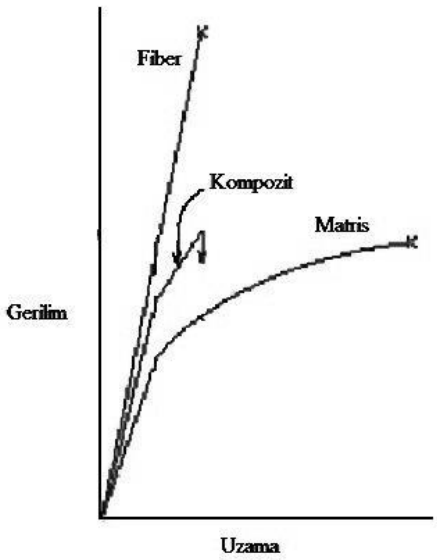


Şekil 4.2 : SMC'lerin eksenleri. [12]

4.2 Mekanik Özellikleri Etkileyen Faktörler

4.2.1 Fiber oranının etkisi

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, takviye ve matrisin özellikleri arasında bir konumda yer almaktadır. Bileşenlerin oranları, kompozitin özelliklerinin matris veya takviye özelliklerine doğru kaymasına yol açmaktadır.



Şekil 4.3 : Kompoziti oluşturan bileşenler ve kompozitin çekme eğrisi. [13]

Aşağıdaki formülde görülen karışım kuralı, kompozitin Elastisite Modülünün, matrisin ve fiberin hacim oranıyla ilişkisini göstermektedir.

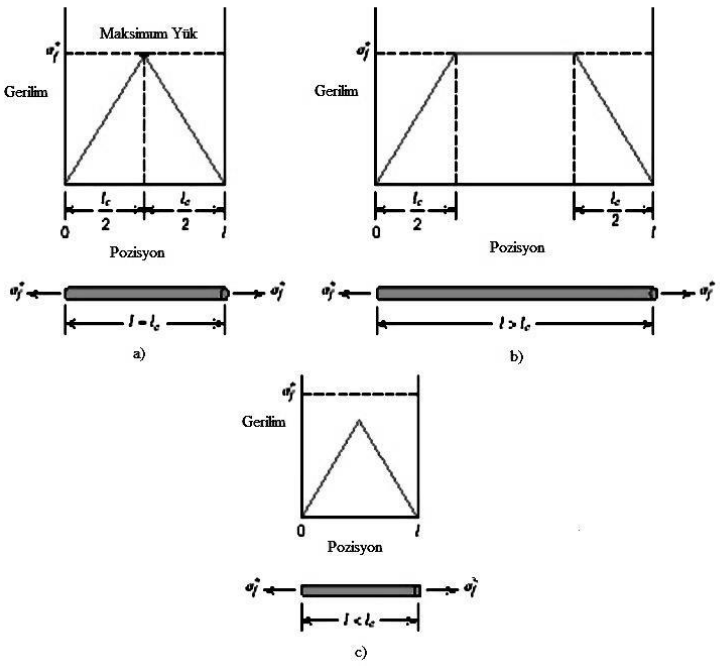
$$E_k=E_mV_m+E_fV_f \quad \textbf{(4.1)}$$

2007 yılında, H. Teodorescu, S. Vlase, D. Cotoros, V. Munteanu and V. Guiman ‘ın “SMC lerin, eksenel özelliklerinin modellenmesi” isimli çalışmasında [9], karışım kuralı temelinde oluşturulan model, çalışılan hazır kalıplama pestil kompozit üzerinde uygulanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1 : Karışım kuralı deneysel ve hesaplamalı karşılaştırma. [9]

	Reçine	Fiber	Dolgu	Matris	Kompozit	Deneysel Değer
Elastisite Modülü (Gpa)	3,52	73	47,8	3,53	16,03	14

4.2.2 Fiber uzunluğunun etkisi



Şekil 4.4 : Fiber uzunluğu etkisi. a) Fiber Uzunluğu Kritik Fiber Uzunluğuna Eşit, b) Fiber Uzunluğu Kritik Fiber Uzunluğundan Fazla c) Fiber Uzunluğu Kritik Fiber Uzunluğundan Kısa. [13]

Kompozitlerde mekanik dayanım, takviye malzemesinin dayanımına ve matrisin fiberlere ne kadar yük aktarabildiğine bağlıdır. Bu durum ise matris ve fiber arasındaki bağlanma kuvvetiyle belirlenir. Bu bağlanma fiber yüzey alanı ile ilişkili olup, kritik fiber uzunluğu, fiber çapı (şekli), fiber çekme dayanımı ve fiber/matris arasındaki yapışma kuvvetine bağlıdır. (Şekil 4.4)

4.2.3 Termal Yaşlanma

Termal yaşlanma, yüksek sıcaklıklarda polimerin fiziksel ve kimyasal yapısında oluşan bir dizi işlem bütünüdür. Sıcaklık yükseldikçe, polimer yapısını etkileyen oksitlenme, kimyasal atak ve mekanik sürünme prosesi de hızlanır. Yüksek sıcaklıklarda kullanılan polimerlerde en önemli yapısal değişiklik oksitlenmedir. Sıcaklığın oksitlenmeye etkisi, polimerin kimyasal yapısıyla alakalıdır. Termal oksidasyon serbest radikallerin oksijenle reaksiyonuyla başlar. [14]

$$P^{*} + O_2 \rightarrow POO^{*} \qquad \textbf{(4.2)}$$

Bütün polimerler, polimerizasyon ve üretim koşullarına bağlı olarak benzer serbest radikaller içerirler. Aynı zamanda, polimerin ışık, radyasyon veya geçiş metalleri içermesi ile de, serbest radikallerin oranının artması mümkündür. Bu reaksiyon yayıldıkça, polimer zincirlerini koparmaktadır. Gelişen oksitlenme ile beraber, polimerin fiziksel ve kimyasal yapısında oluşan değişiklikler, yapının mekanik özelliklerini de olumsuz olarak etkilemektedir. Dolayısıyla, sıcaklıkla beraber artan bu oksitleme süreci, polimerin servis edilebilirlik süresi hakkında yorum yapmayı sağlamaktadır. [14]

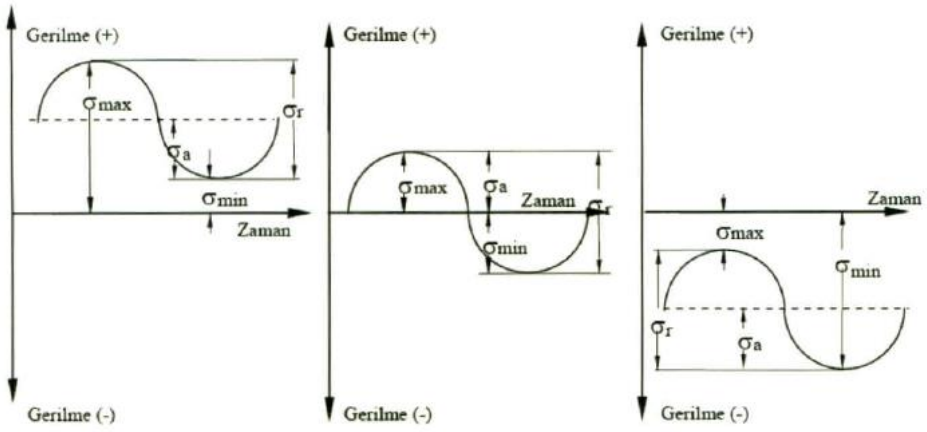
4.3 Yorulma Özellikleri

Malzemenin maruz kaldığı tekrarlı yükler karşısında, malzemenin deforme olmasına “yorulma” denmektedir. Yorulmada malzemenin akma veya çekme dayanımının altındaki yüklerin tekrarlı olması etkili olduğundan, belirleyici unsur, belli bir yüke kaç çevrim dayanabildiğidir.

Yorulma ASTM E206 standardında; “bazı nokta veya noktalardaki tekrarlı gerilme veya birim şekil değişimine maruz kalan malzemelerde rastlanan, yeterli çevrim sayısından sonra çatlakların oluşmasına/büyümesine ve tamamen kırılmasına sebep olan, sürekli gelişen deformasyon olayı” olarak tanımlanır. [3]

Yorulma hasarı oluşurken herhangi bir belirti göstermeyebileceğinden, kullanılan parçanın, ömür tayini için hassasiyetle belirlenmesi gereken bir malzeme özelliğidir.

Yorulma dayanımı aynı zamanda, polimer matris, cam elyafı takviyeli kompozitlerin özelliklerinin de önemli bir fonksiyonudur. Şekil 4.5’de yorulma hasarına yol açan bazı yükleme çeşitleri görülmektedir.



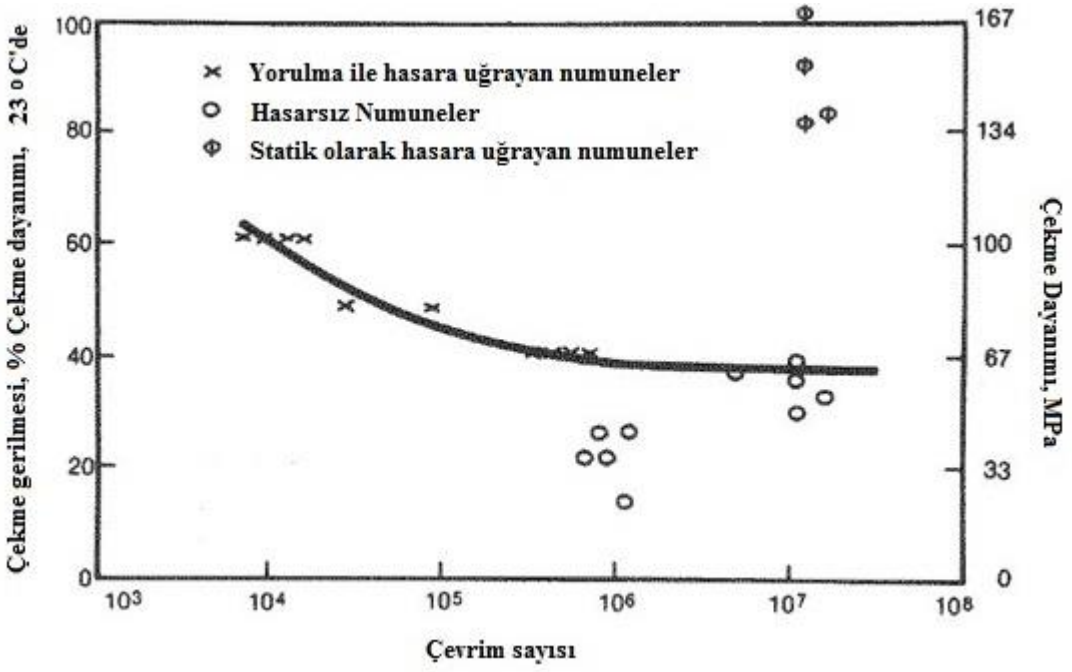
Şekil 4.5 : Farklı yükleme çeşitleri. [3]

Malzemenin yorulma dayanımı belirlenirken tekrarlı yükler, çekme-çekme, çekme-basma, basma-basma yönünde uygulanabilir. Uygulanan yük/uzama ile malzemenin kırıldığı tekrar sayısı arasında bir grafik çizilerek, çevrim sayısı yükün bir fonksiyonu olarak tanımlanır.

Malzemede, uygulanan en büyük gerilme sebebiyle hasarın meydana geldiği çevrim sayısı arasında çizilen eğrilere S-N (gerilme-çevrim sayısı) eğrileri denir. Bu eğride kırılma çevrim sayısı (N), gerilme aralığının (S) bir fonksiyonudur. S-N eğrisinin eğimi, yorulma dayanımının bir ölçüsüdür ve malzemeye bağlı olarak değişir.

Eş eksenli kompozitlerde yorulma eğrileri oldukça belirgin bir yorulma dayanımı sınırı gösterirken, kırpılmış kompozitlerin yorulma verileri, eş eksenli kompozitler kadar tekrarlanabilir değildir.

Douglas L. Denton tarafından yayınlalan, “Mechanical Properties Characterization of an SMC-R50 Composite” isimli makalede [12], %50 kırpılmış fiber takviyeli polyester matrisli hazır kalıplama pestil (SMC) kompozitlerin yorulma davranışları için yapılan çalışmada, oda sıcaklığında aşağıdaki grafikte görülen sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.6 : %50 cam elyafı destekli SMC S-N eğrisi. [12]

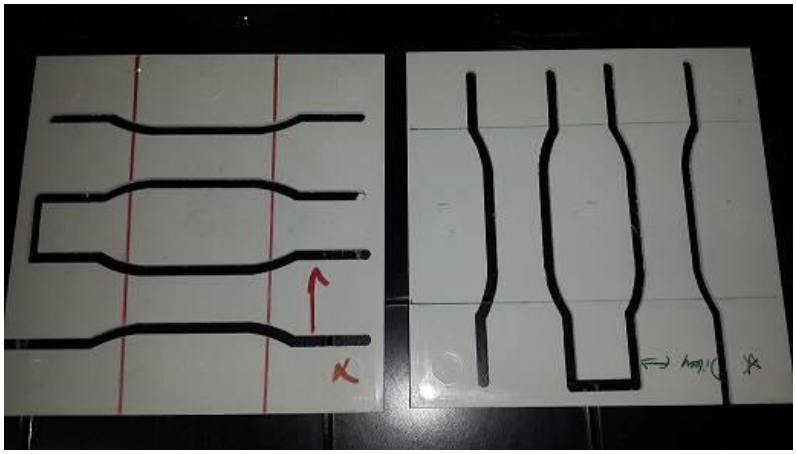
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada % 25 cam elyafı takviyeli, doymamış polyester matrisli hazır kalıplama pestil kompozitlerden üretilen plakalardan, üretim yönünde ve üretim yönüne dik olmak üzere numuneler çıkartılarak karakterize edilmiş ve kıyaslanmıştır. Yapılan deneyler sırasıyla aşağıdaki gibidir.

- Termal yaşlandırma işlemleri
- Yoğunluk deneyi
- Çekme deneyi
- Üç nokta eğme deneyi
- İzod darbe deneyi
- Eksenel yorulma deneyi

5.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneylerde kullanılan ağırlıkça % 25 cam elyafı takviyeli, doymamış polyester matrisli hazır kalıplama pestil kompozit hammaddesi, 4 mm kalınlığında, 200x200 mm boyutlarında "CTP Kompozit Plastik San. Tic. Ltd. Şti." tesislerinde, yaklaşık 150 °C'de ve 150 bar basınçta kalıplanmıştır.



Şekil 5.1 : Levhalardan üretim yönüne bağlı numune çıkartılması.

Oluşturulan plakalardan her bir deney için ayrı ayrı olmak üzere, üretim yönünde ve üretim yönüne dik olacak şekilde numuneler, robot kesimle çıkartılmıştır.

Şekil 5.1'de hazırlanan plakalardan, üretim yönünde ve üretim yönüne dik olarak çıkartılan çekme ve yorulma deney numunelerinin kesimi görülebilmektedir.

5.2 Termal Yaşlandırma Deneyi

Deneylerde kullanılan yorulma numuneleri hariç bütün numuneler iki gruba ayrılarak, bir grubu ISO 188 standardına uygun olarak termal yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Termal yaşlandırma öncesinde ve sonrasında numunelerin ağırlıkları ölçülmüş, ağırlık kaybı hesaplanmıştır.

Termal yaşlandırma, Şekil 5.2'de görülen BINDER markalı etüvde, 150°C'de 225 saat bekleme süresinde gerçekleştirilmiştir.

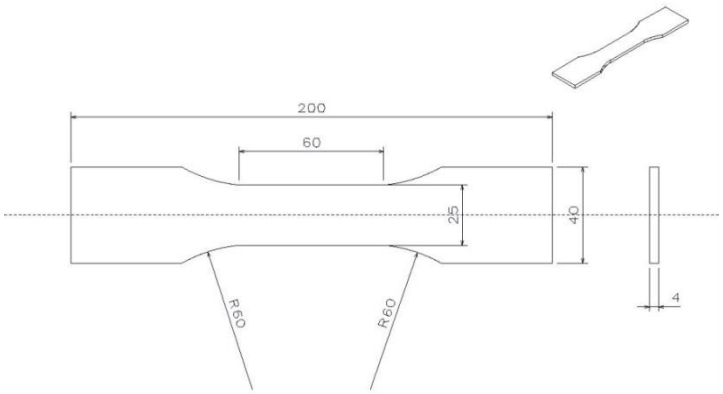
Şekil 5.2 : BINDER marka etüv.

5.3 Yoğunluk Deneyi

Yoğunluk deneyi için, numune içinde en az bir fiberi her yönde temsil edecek şekilde, 25 x 25 mm ölçülerinde 6 adet numune hazırlanmıştır. Numunlerin yoğunlukları, Arşimet prensibine uygun olarak ve saf su kullanılarak ölçülmüştür.

5.4 Çekme Deneyi

Çekme deneyi numuneleri, Şekil 5.3'de görülen ölçülerde, ölçüm bölgesinde en az bir fiberi temsil edecek şekilde (25 mm) her bir grup için 3'er adet hazırlanmıştır.



Şekil 5.3 : Çekme-Yorulma deney numunesi (Ölçüler mm'dir.)

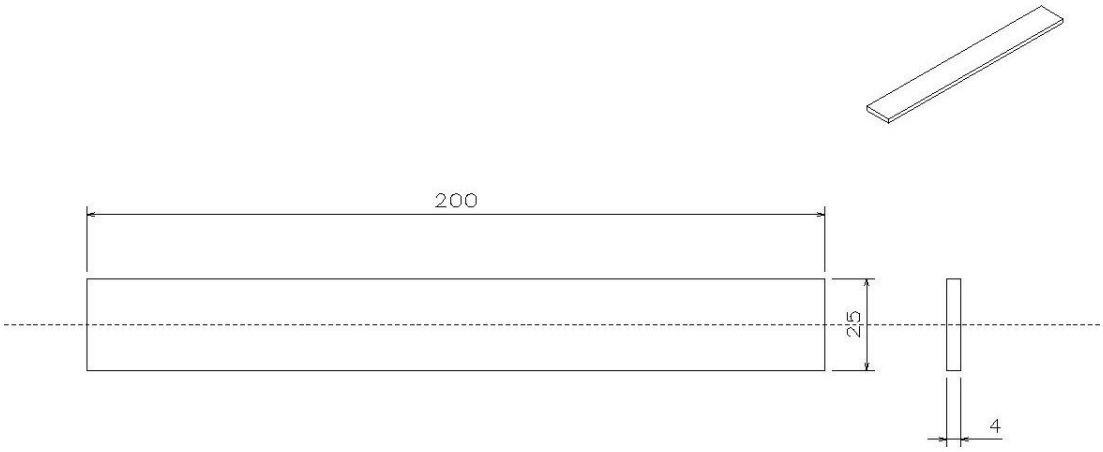
Çekme deneyleri, üretim yönünde (yaşlandırılmış-orijinal), üretim yönüne dik (yaşlandırılmış-orijinal) olmak üzere tüm gruplara Instron 8801 marka universal deney cihazı (Şekil 5.4) ile, 2 mm/dakika çene hızında ISO 527 standardına uygun olarak yapılmıştır. Elastisite modülü ölçümü, ölçü uzunluğu 50 mm olan bir ekstansometre kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 5.4 : Instron 8801 marka test cihazı.

5.5 Üç Nokta Eğme Deneyi

Üç nokta eğme deneyi Şekil 5.5'de görülen Shimadzu marka AGS-J model universal deney cihazı kullanılarak 3 noktalı eğme deneyi presiplerine göre yapılmıştır. Deneylerde, ISO 178 [18] standardına uygun olarak hazırlanan ve Şekil 5.6'da gösterilen numuneler kullanılmış. Üretim yönü ve üretim yönüne dik olarak hazırlanan numuneler orijinal ve yaşlandırılmış halde deneye tabi tutulmuştur. Her bir grup için 3 adet numune kullanılmıştır. Eğme deneyleri ile, eğme elastisite modülü ve eğme dayanımı belirlenmiştir.

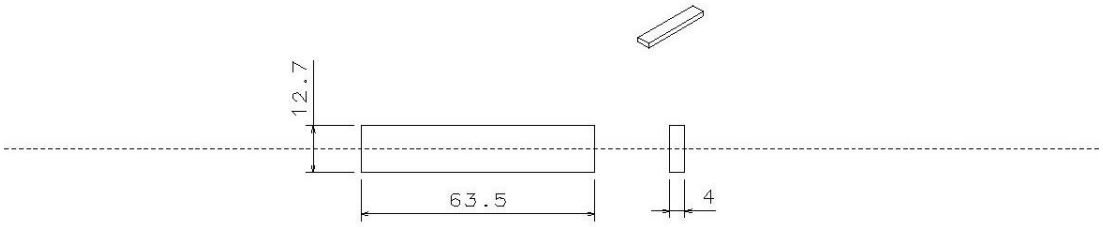
Şekil 5.5 : Shimadzu üniversal test cihazı.



Şekil 5.6 : Eğme deneyi numunesi (Ölçüler mm'dir.)

5.6 İzod Darbe Deneyi

İzod darbe deneyi ISO 180 Metod A [15] standardına uygun olarak hazırlanan ve Şekil 5.7'de görülen çentiksiz numuneler kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde, genel görünümü Şekil 5.8'de görülen Zwick marka darbe deney cihazı kullanılmıştır. Deneylerde, üretim yönü ve üretim yönüne dik olarak hazırlanan numuneler orijinal ve yaşlandırılmış halde deneye tabi tutulmuş ve her bir grup için 10 adet numune kullanılmıştır. Çentiksiz Izod darbe deneyleri sonunda, birim alan başına darbe direnci değerleri belirlenmiştir.



Şekil 5.7 : İzod darbe deneyi numunesi (Ölçüler mm'dir.)

Şekil 5.8 : Zwick marka darbe dayanımı test cihazı

5.7 Yorulma Deneyi

Eksenel yorulma deneyleri Şekil 5.4'te gösterilen, Instron 8801 marka dinamik deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Yorulma deneylerinde, çekme deneyi numuneleri ile aynı şekil ve ölçülere sahip numuneler (Şekil 5.3) kullanılmıştır. Yorulma deneyleri, üretim yönünde ve üretim yönünde dik hazırlanmış numuneler kullanılarak yapılmıştır.

Yorulma deneyleri, ASTM D 3479 [19] standardına uygun olarak, 10 Hz deney frekansında, gerilme oranı (R= σ min/ σ max) 0,1 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Her iki gruptaki (üretim yönünde 16 adet ve üretim yönüne dik 13 adet) numunelerin kırılmaya kadar maruz kaldıkları çevrim sayısı kaydedilmiştir. Her iki grubun yorulma davranışları, gerilme aralığı ($\Delta\sigma$) - çevrim sayısı (S-N) eğrisi çizerek incelenmiş ve 10^6 çevrim sonunda kırılmayan numuneler için deney sonlandırılmıştır. Gerilme aralığı Eşitlik 5.1 gereğince hesaplanmıştır.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \qquad \textbf{(5.1)}$$

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

6.1 Termal Yaşlandırma Deneyi Sonuçları

Polimer ömrüne sıcaklığın etkisinin tesbit edilmesi amacıyla yapılan termal yaşlandırma deneyi, ISO 188 standardına uygun olarak, yorulma deneyi numuneleri hariç, diğer tüm deney numunelerinin 150°C sıcaklıkta 225 saat bekletilmesi şeklinde yapılmıştır. Termal yaşlandırma sonunda, ağırlık, yoğunluk, çekme özellikleri, üç nokta eğme özellikleri ve darbe direnci belirlenerek termal yaşlandırma yapılmamış numunelerle kıyaslanmıştır. Numunelerin termal yaşlandırma sonrası ağırlık kaybı Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 : Termal yaşlandırma sonrası ağırlık kaybı

	Ağırlık Kaybı (%)
Tüm Numuneler	0,77 – 0,84

Termal yaşlandırma sonrasında, numune şekli, boyutu ve üretim yönüne bağlı olarak ağırlık kaybında belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Oluşan küçük ağırlık kaybının polimere eklenen çeşitli katkıların uçuşu ve kısmi oksitlenmeden kaynaklandığı düşünülmektedir. Oluşan ağırlık kaybının kompozitinin mekanik özelliklerinde sebep olduğu değişim ayrı ayrı incelenmiştir.

6.2 Yoğunluk Deneyi Sonuçları

Orijinal ve termal yaşlandırma uygulanmış numunelerin, Arşimet metoduna göre yapılan yoğunluk ölçüm sonuçları Çizelge 6.2'de görülmektedir.

Üretim yönünde ve üretim yönüne dik numunelerde termal yaşlandırma öncesinde ve sonrasında yapılan yoğunluk ölçümlerinde belirgin bir farklılığa rastlanmamıştır. Ölçülen yoğunluk değeri üreticinin ölçümleriyle uyumludur.

Çizelge 6.2 : Yoğunluk ölçüm sonuçları

	Yoğunluk (g/cm^3)
Orijinal	1,87 ± 0,02
Yaşlandırılmış	1,86 ± 0,02

6.3 Çekme Deneyi Sonuçları

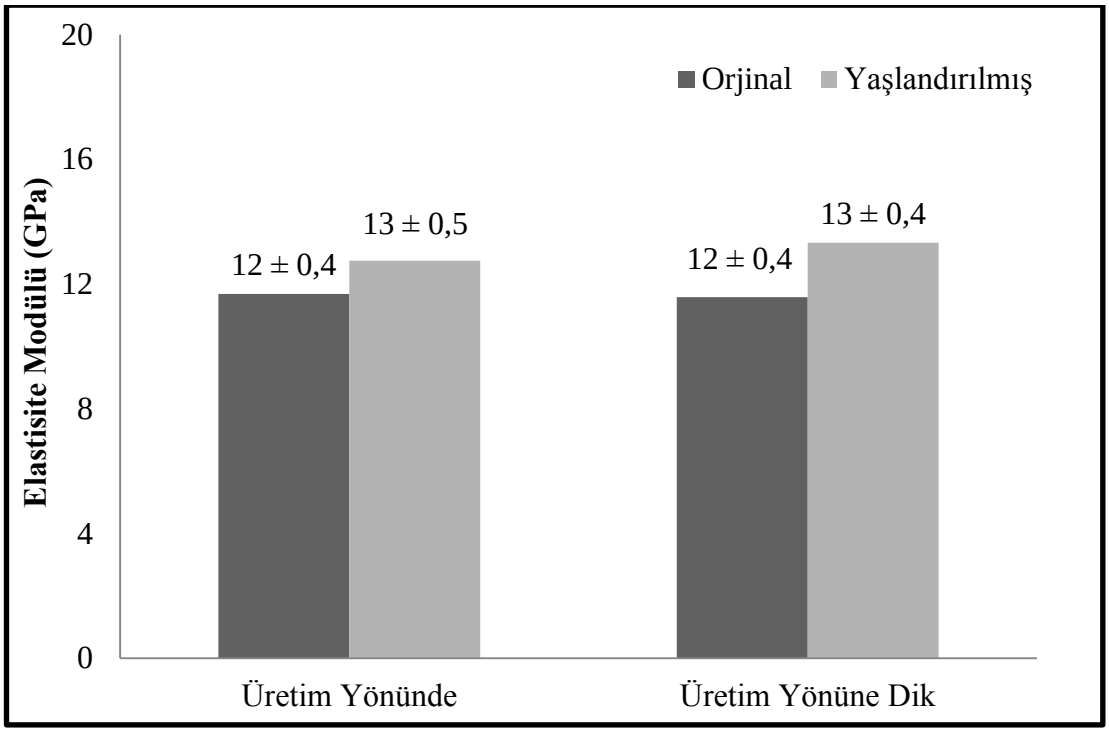
Çekme deneyi ile, üretim yönünde (orijinal-yaşlandırılmış) ve üretim yönüne dik (orijinal-yaşlandırılmış) olarak, % 25 cam elyafı takviyeli, doymamış polyester matrisli hazır kalıplama pestil kompozitten hazırlanan numunelerin, çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri belirlenmiştir. Çekme deneyi sonuçları, Çizelge 6.3'de görülmektedir.

Orijinal numunelerin Elastisite Modülü ve Çekme Dayanımı değerleri, Magnus Oldenbo'nun "SMC'lerin anizotropik ve non-lineer özellikleri" isimli doktora çalışmasında bulduğu Elastisite Modülü için 11,7 ± 0,8 GPa ve Çekme dayanımı için bulduğu 79 ± 11 MPa değerlerle [7] ve benzer ürünlerin teknik veri sayfalarıyla uyumludur. [20]

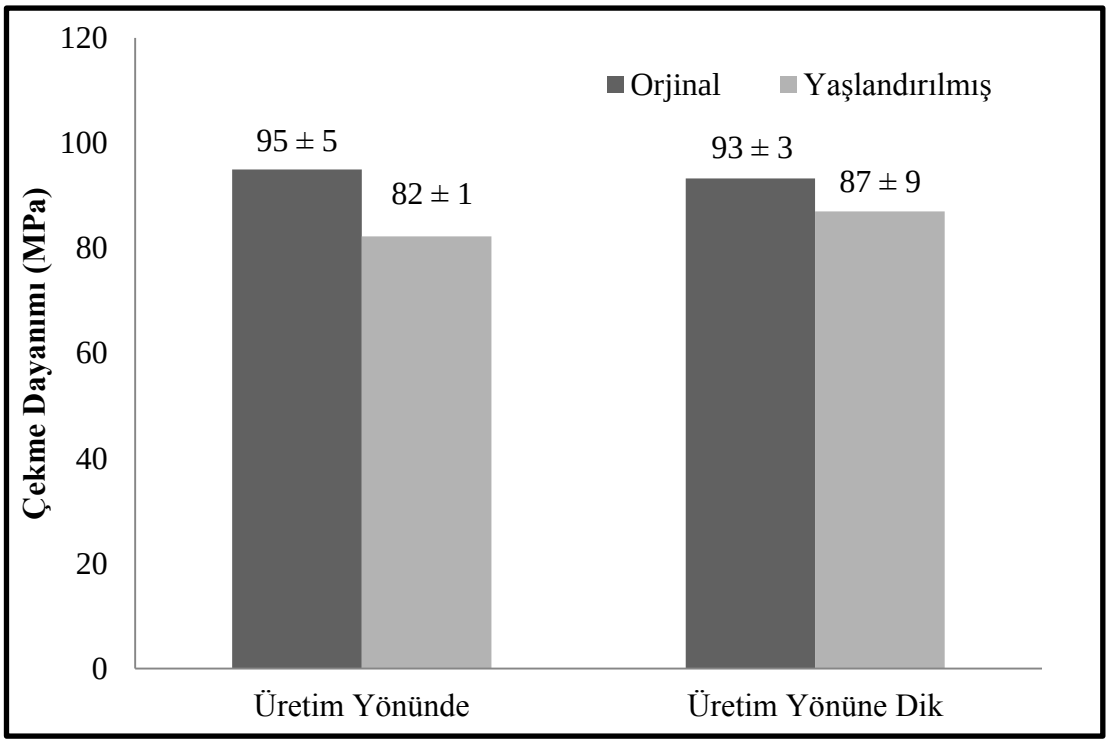
Termal yaşlandırmanın etkisiyle, elastisite modülü değerleri yükselirken, çekme dayanımı değerleri düşmüştür. Termal yaşlandırmanın, polimer yapısında yaptığı etkinin direngenlik artışına ve dayanım düşüşüne sebep olduğu görülmüştür. (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2) Fakat bu değişiklik, varyasyon içerisinde kalmış, termal yaşlanmanın etkisinin ihmal edilebilir olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.3 : Çekme deneyi sonuçları.

	Elastisite Modülü (GPa)		Çekme Dayanımı (MPa)	
	Üretim Yönünde	Üretim Yönüne Dik	Üretim Yönünde	Üretim Yönüne Dik
Orijinal	12 ± 0,4	12 ± 0,4	95 ± 5	93 ± 3
Yaşlandırılmış	13 ± 0,5	13 ± 0,4	82 ± 1	87 ± 9
Özellik Kaybı (%)	-10	-15	13	7



Şekil 6.1 : Elastisite modülü karşılaştırmalı grafiği.



Şekil 6.2 : Çekme dayanımı karşılaştırmalı grafiği.

6.4 Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

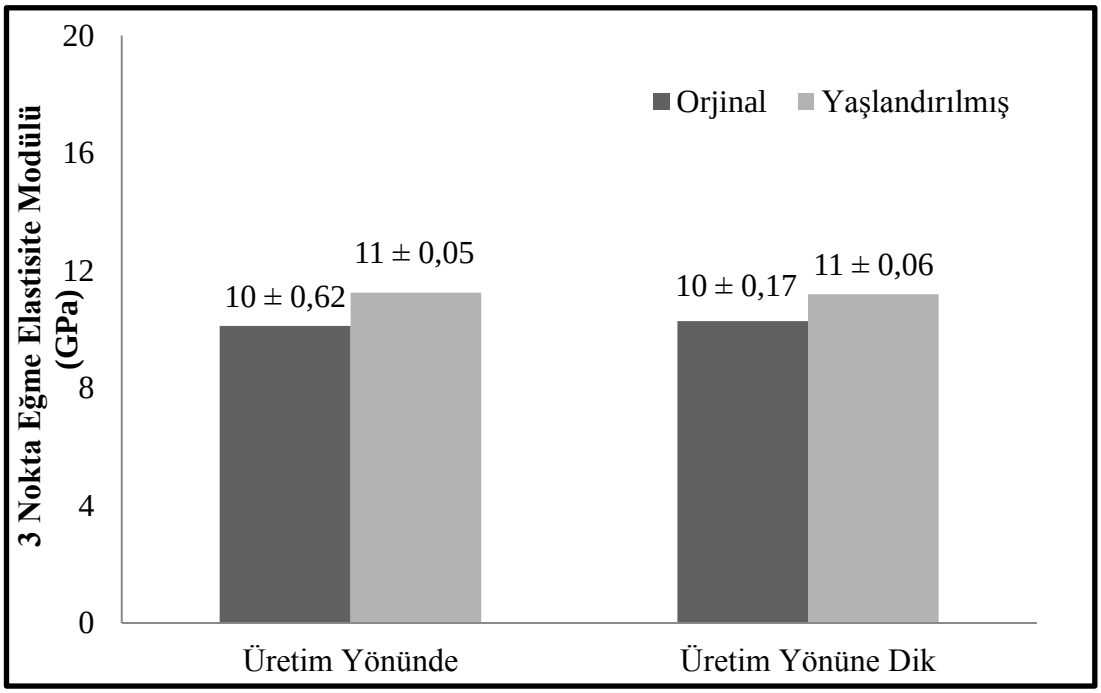
Üç nokta eğme deneyi, üretim yönünde (orijinal-yaşlandırılmış) ve üretim yönüne dik (orijinal-yaşlandırılmış) olarak hazırlanmış numunelere uygulanmış ve üç nokta eğme elastisite modülü ile üç nokta eğme dayanımı elde edilmiştir. 3 nokta eğme deneyi sırasında cihaz ve numuneni görünümü Şekil 6.3'de, 3 nokta eğme deneyi sonuçları ise Çizelge 6.4'da görülmektedir. Çizelge 6.4'deki değerler kullanılarak elastisite modülünün ve eğme dayanımının, numune yönü ve termal yaşlanma işlemine bağlı olarak değişimi, sırasıyla Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'de verilmiştir.

Şekil 6.3 : 3 nokta eğme deneyinin görünümü.

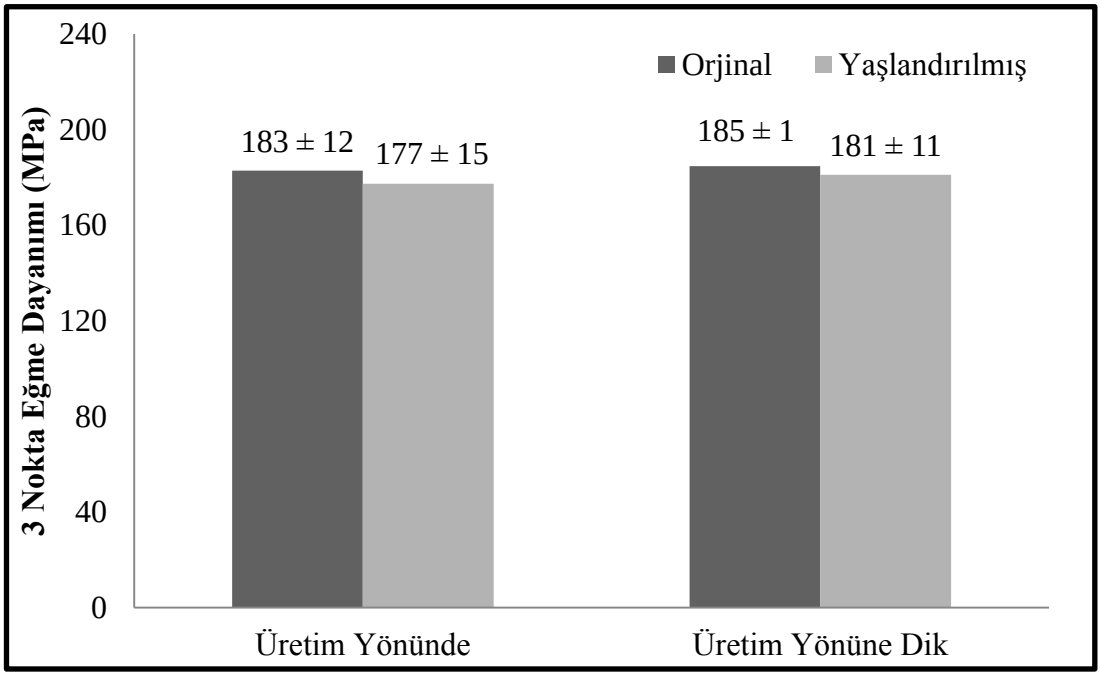
Çizelge 6.4 : Üç nokta eğme deneyi sonuçları

	3 Nokta Eğme Elastisite Modülü (GPa)		3 Nokta Eğme Dayanımı (MPa)	
	Üretim Yönünde	Üretim Yönüne Dik	Üretim Yönünde	Üretim Yönüne Dik
Orijinal	10 ± 0,6	10 ± 0,2	183 ± 12	185 ± 1
Yaşlandırılmış	11 ± 0,1	11 ± 0,1	177 ± 15	181 ± 11
Özellik Kaybı (%)	-11	-9	3	2

Sonuçlar, benzer bileşimde üretilen MENZOLİT SMC 0400 ticari isimli hammaddenin, teknik veri sayfasında, eğme modülü için 10 GPa, eğme dayanımı için 180 MPa bilgileri ile uyumluluk göstermektedir. [20]



Şekil 6.4 : Eğme modülü karşılaştırmalı grafiği.

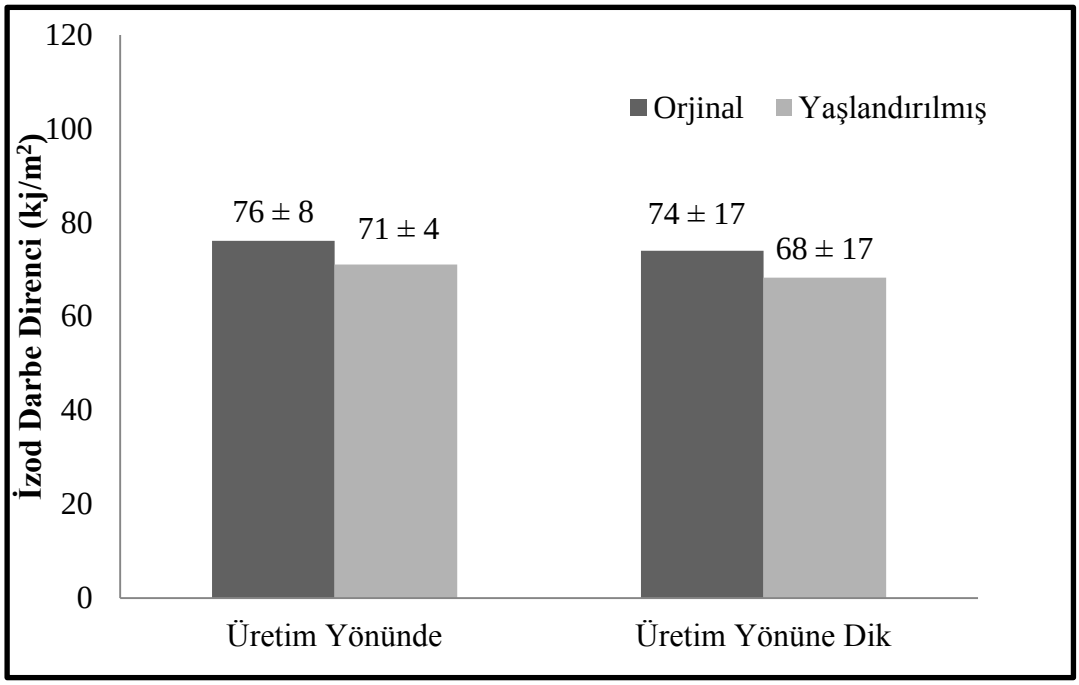


Şekil 6.5 : Eğme dayanımı karşılaştırmalı grafiği.

6.5 Izod Darbe Deneyi Sonuçları

ISO 180 [15] standardına uygun olarak yapılan izod darbe deneyi, üretim yönünde (orijinal-yaşlandırılmış) ve üretim yönüne dik (orijinal-yaşlandırılmış) olarak hazırlanmış numunelere uygulanmış olup, birim alan başına darbe dayanımı değerleri, Çizelge 6.5'de belirtilmiştir. Çizelge 6.5'deki değerler kullanılarak birim alan başına darbe dayanımının, numune yönü ve termal yaşlanma işlemine bağlı olarak değişimi ise Şekil 6.6'da görülmektedir.

Termal yaşlandırma darbe direncini belli oranda düşürürken, darbe direncindeki varyasyonun artışı, termal yaşlandırmanın darbe direncini kararsız bir yapıya döndüğünü göstermektedir.



Şekil 6.6 : Darbe dayanımı karşılaştırmalı grafiği.

Çizelge 6.5 : İzod darbe deneyi sonuçları

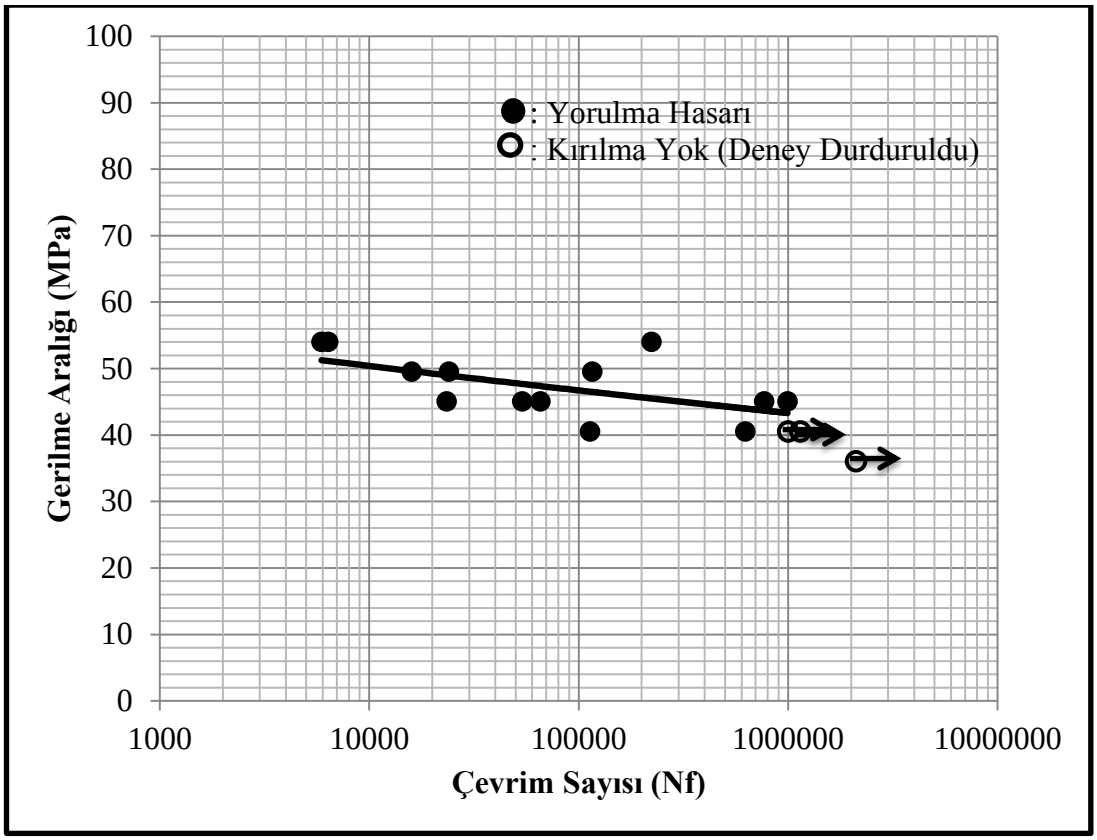
	İzod Darbe Direnci (kj/m^2)	
	Üretim Yönünde	Üretim Yönüne Dik
Orijinal	76 ± 8	74 ± 17
Yaşlandırılmış	71 ± 4	68 ± 17
Özellik Kaybı (%)	6	7

6.6 Yorulma Deneyi Sonuçları

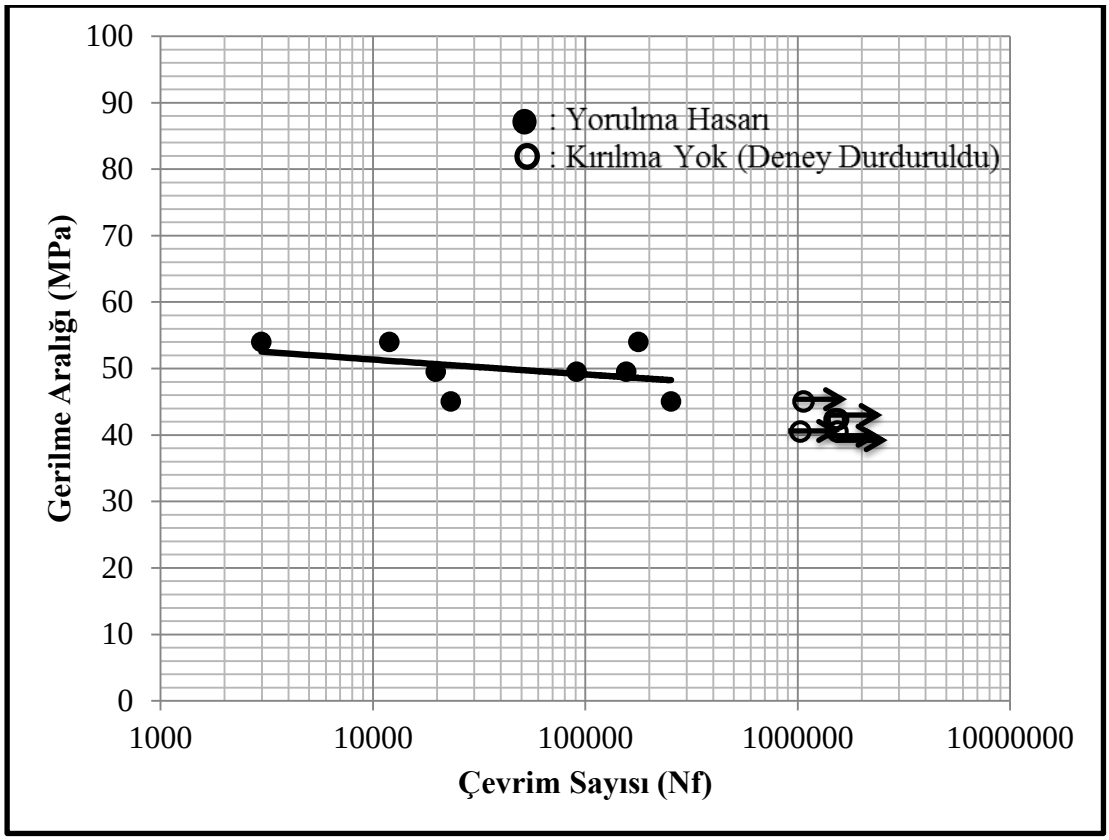
Yorulma deneyine tabi tutulan numunelere uygulanan gerilme aralığı ($\Delta\sigma$) ve kırılıncaya kadarki çevrim sayıları (N_f) kaydedilmiştir.

Şekil 6.7 ve 6.8'de sırasıyla üretim yönünde ve üretim yönüne dik numuneler için çizilmiş S-N eğrileri gösterilmiştir. Numunelerin 10^6 çevrimde kırılmaması üzerine deney sonlandırılmış ve grafik üzerinde ok ile belirtilmiştir.

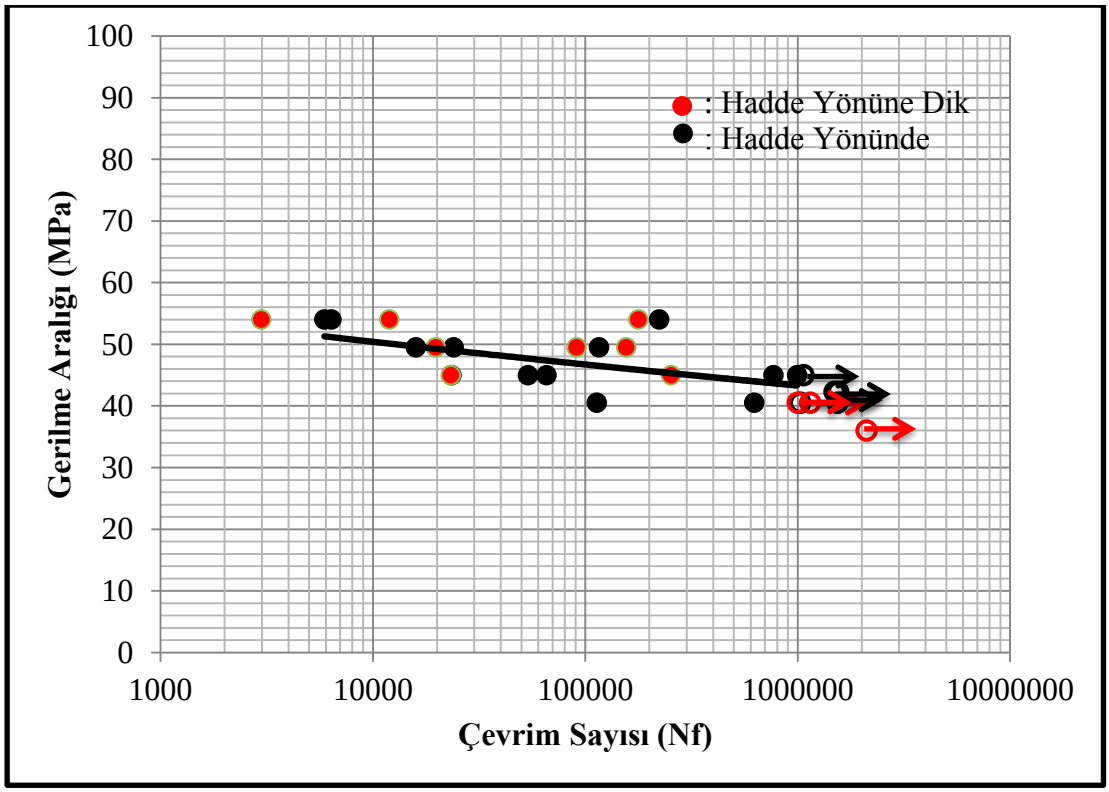
Şekil 6.7'de gösterilen üretim yönünde hazırlanan numunelerle yapılan deney sonuçları ile Şekil 6.8'de görülen üretim yönüne dik numunelerle yapılan deney sonuçları arasında görülen farklılığın, sonuçlardaki saçılımın içinde kaldığı kabul edilerek, üretim yönünde ve üretim yönüne dik numunelerin sonuçları beraber kullanılarak, Şekil 6.9'da gösterilen gerilme aralığı-kırılma çevrim sayısı grafiği çizilmiştir.



Şekil 6.7 : Üretim yönünde gerilme genliği-çevrim sayısı grafiği



Şekil 6.8 : Üretim yönüne dik gerilme genliği-çevrim sayısı grafiği.



Şekil 6.9 : Tüm numune sonuçlarının gerilme genliği-çevrim sayısı grafiği.

Gerilme kontollü yorulma deneylerini karakterize etmek amacıyla kullanılan Basquin bağıntısı, uygulanan gerilme ve çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi vermektedir. Basquin bağıntısının sabitleri hesaplanırken 10^6 çevrim sayısında kırılmayan numuneler dikkate alınmamış, hesaplamalar sadece kırılan numunlerin verileri kullanılarak Eşitlik 6.1 ile hesaplanmıştır.

$$\Delta\sigma = SRI \times (N_f)^b \qquad \textbf{(6.1)}$$

Burada,

$\Delta\sigma$: Gerilme Aralığı

SRI : (Stress Range Intercept) Eğrinin gerilme eksenini kestiği nokta

N_f : Kırılma çevrim sayısı

b : Basquin Sabiti olarak tanımlanmaktadır.

Yorulma deneyleri sonunda hesaplanan Basquin sabitleri, Çizelge 6.6'da görülmektedir. Literatürde, aynı bileşime sahip bir SMC kompozit için yorulma verilerine rastlanmamıştır. Farklı bileşimlerde yapılan kırpılmış fiber içeren polimer matris kompozitlerin deney sonuçlarındaki varyasyon benzer şekilde oldukça yüksektir. Öte yandan, SMC kompozitlerin doğası yüksek varyasyon, R, Marissen, J. Linsen tarafından "SMC'lerin eğme dayanımındaki varyasyon" konulu makalede değrlendirilerek, numune kalınlığıyla ilgili bir yaklaşım türetilmiştir. [21]

Çizelge 6.6 : Basquin bağıntısına göre hesaplanan sabitler.

	Üretim Yönünde	Üretim Yönüne Dik	Bütün Numune Ortak Veri
b	-0,033	-0,019	-0,03
SRI (MPa)	68	61	67

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, % 25 kırpılmış cam elyafı takviyeli, doymamış polyester matrisli kompozit düz plakalar kullanılmıştır. Elyaf yönlenmesinin etkisini göz önüne alarak, yorulma bazlı bir tasarımda ihtiyaç duyulabilecek malzeme özelliklerini belirlemek amaçlanmıştır. Bu tez çalışması sonunda aşağıdaki genel özellikler elde edilmiştir.

1) Yapılan termal yaşlandırma işleminin, orijinal duruma göre malzeme özelliklerinde değişikliğe sebep olduğu gözlenmiş, fakat bu değişikliğin dizayn ve hedeflenen ömrü değiştirme kabiliyeti ile ilgili ölçülebilir bir sonuç elde edilememiş, çoğu zaman sonuçlardaki saçılma içerisinde bulunan bu değişikliğin, termal etkilerin öncelikli dizayn kriteri olamayacağı kanaatine ulaşılmıştır.
2) Termal yaşlandırma sonrasında oldukça düşük seviyelerde oluşan ağırlık kaybının, polyesterin polimer yapısının kısmen bozulmasından kaynaklandığı ve bu etkinin malzemenin mekanik dayanımına etkisinin oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir.
3) Elyaf yönlenmesinin etkisinin anlamlı olması beklenirken, standartlara uygun olarak düz plakalardan alınan numunelerde, elyaf yönlenmesinin, düz plakalarda üretim yönüne bağlı olmadığı ve değişikliğin yine sonuçlardaki saçılma içerisinde kaldığı görülmüştür.
4) Yapılan çekme ve eğme deneylerinde, global eksende “x” yönünü üretim yönü; “y” yönünü üretime dik yön, “z” yönünü ise eğme testi sonuçları ile belirlemek amaçlanmıştır. “x” ve “y” yönündeki çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri aynı çıkarken, “z” (eğme) yönünde dayanım yaklaşık 2 kat yüksek olarak belirlenmiş, elastisite modülünün ise yaklaşık aynı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda malzemenin eğme koşulları altında daha yüksek yüklerde çalışabileceği belirlenmiştir.
5) Yorulma deneylerinde edinilen sonuçlardaki yüksek saçılımın, malzemenin çevrimsel yüklerde daha kararsız davrandığı, bu sebeple çevrimsel yüklerde

çalışacak dizaynlarda hedeflenen çevrim sayısına karşılık gelen gerilmelerin aşılmaması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

6) Yorulma deneylerinde saçılmanın, üretim yönü veya üretim yönüne dik numunelerde belirgin olması, elyaf dağılımının etkisinin düz plakalarda olmadığını göstermiş, bu sebeple verilerin ortak kullanımından elde edilen değerlerin kullanılmasının uygun olduğu kannatine ulaşılmıştır.

7) Çalışmada elde edilen malzeme özellikleri ile SMC ile dizayn edilen yeni parçalar için bilgisayar destekli analiz yapılabilmesi ve ömür tayini sağlanmış, oluşturulan dizaynın optimize edilmesi olanağı oluşmuştur.

KAYNAKLAR

[1] **U.S. Department of Energy, Vehicle Technologies Office** (2013). Trucks and Heavy-Duty Vehicles Technical Requirements and Gaps for Lightweight and Propulsion Materials, *Workshop Report*, USA

[2] **U.S. Department of Transportation** (2012). Investigation of Opportunities for Lightweight Vehicles Using Advanced Plastics and Composites, USA.

[3] **Karacaer, Y.** (2009). Cam Kumaş Takviyeli Delikli SMC Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

[4] **Harper, L.T.** (2006). Discontinuous Carbon Fibre Composites For Automotive Applications, *Doctoral Thesis*, University of Nottingham.

[5] **Orgeas, L., Dumont P.J.J,** (2012). Sheet Moulding Compounds, *Grenoble Institue of Technology*, Grenoble, France

[6] **ASM Metals Handbook,** (2001). Composites, Volume 21, Tenth Edition, *ASM International*.

[7] **Oldenbo, M.** (2004). Anisotropy and Non-linear Effects in SMC Composites, *Doctoral Thesis*, Lulea Univercity of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Polymer Engineering, Göteborg, Sweden.

[8] **Fisk, M.** (2006). Damage Level Calculation in SMC Composite Structures, *Master's Thesis*, Lulea Univercity of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Polymer Engineering, Göteborg, Sweden.

[9] **Teodorescu, H., Vlase, S., Cotoros, D., Munteanu, V., Guiman, V.** (2007). Modelling of Tensile Behaviour of Sheet Moulding Compounds, Proceedings of the World Congress on Engineering 2007 Vol II. London, U.K.

[10] **www.nuplex.com**/Composites/processes/hot-moulding-processes

[11] **Malik M, Choudhary C, Varma IK. J** (2000). *Rev Macro Chem. Phy*, J Macro Science

[12] **Denton, D. L.** (1980), Mechanical Properties Characterization of an SMC-R50 Composite, *Society of Automotive Engineers, Inc*, Granville, OH.

[13] **Bastawros, A. F.** *Teaching Notes*, Iowa State University

[14] **Maxwell, A.S., Broughton, W.R., Dean, G., Sims, G.D. (**2005). Review of accelerated ageing methods lifetime prediction techniques for polymeric materials, *NPL Report*, National Physical Laboratory, U.K.

[15] **ISO 180.** (2000). Plastics – Determination of Izod Impact Strenght, *International Standarts Organization.*

[16] **ISO 188.** (2011). Rubber, vulcanized or thermoplastic – Accelerated ageing and heat resistance tests, *International Standarts Organization.*

[17] **ISO 527 All.** (2012). Plastics – Determination of Tensile Properties, *International Standarts Organization.*

[18] **ISO 178.** (2010). Plastics – Determination of Flexural Properties, *International Standarts Organization.*

[19] **ASTM D 3479.** (2012). Standart Test Method For Tension – Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials, *American Standarts.*

[20] **Menzolit SMC 0400.** Product Information – Technical Data Sheet

[21] **Marissen, R., Linsen, J.** (1999). Variability of the flexural strength of sheet moulding compounds – *Composites Science and Technology,* Netherlands

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad:	Mehmet Akif ÜNAL
Doğum Yeri ve Tarihi:	SEYDİŞEHİR / 17.02.1986
Adres:	Sultantepe mah. Selmanağa Bostanı Sk. No:58 D:3 Üsküdar/İSTANBUL
E-Posta:	munal@itu.edu.tr
Lisans:	İstanbul Üniversitesi – Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (2004-2010)
Yüksek Lisans:	İstanbul Teknik Üniversitesi – Malzeme Mühendisliği (2011-2015)

Mesleki Deneyim:

- Ford Otomotiv San. A.Ş. – Ürün Geliştirme Mühendisi (06.2013-halen.)