

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT MALZEMELERDE MEKANİK ÖZELLİKLERİN
İSTATİKSEL DENEY TASARIMI İLE MODELLENMESİ VE
OPTİMİZASYONU

ESRA KAYMAK AKSU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2018

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT MALZEMELERDE
MEKANİK ÖZELLİKLERİN İSTATİKSEL
DENEY TASARIMI İLE MODELLENMESİ
VE OPTİMİZASYONU

ESRA KAYMAK AKSU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. MAHMUT BAYRAMOĞLU

GEBZE
2018

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**MODELLING AND OPTIMIZATION OF
MECHANICAL PROPERTIES IN
COMPOSITE MATERIALS BY
STATISTICAL EXPERIMENTAL DESIGN**

ESRA KAYMAK AKSU
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. MAHMUT BAYRAMOĞLU

GEBZE
2018

GTÜ Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve/..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 17/01/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Esra Kaya Akay'ın tez çalışması Kıyıkıya Mimarlığı Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Prof. Dr. M. Baymazlı

ÜYE

: Doç. Dr. Levent Demir Coker

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Ömer ARAS

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu tez çalışmasında; otomotiv, havacılık gibi birçok endüstriyel alanda kullanılan, “*reçine enjeksiyon transfer yöntemi*” ile üretilen cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, cam elyaf tipi, aktivatör, metil etil keton peroksit ve kalsit miktarı gibi sayısal/kategorik tip değişkenler kullanılarak *çok amaçlı(yanıtlı) deneysel optimizasyon* çerçevesinde *istatistiksel D-optimal deney tasarımı* ile incelenmiştir.

Deneysel çalışma verileri kullanılarak ikinci dereceden regresyon denklemleri elde edilmiş ve değişik istatistiksel analiz metotları ile test edilmiştir. Bu denklemler kullanılarak, kompozit malzemenin çekme, darbe ve eğilme dayanımı gibi önemli mekanik özellikleri değişik yaklaşımlarla optimize edilmiş ve %90 güven aralığında anlamlı sonuçlar elde edilmiştir.

Bütün mekanik özellikler kompozit yapıdaki elyaf tipi tarafından etkilenmektedir. Bağımsız değişkenlerin tümü eğilme dayanımı üzerinde etkilidir. Diğer yandan, aktivatör miktarı sadece eğilme dayanımı üzerinde etkilidir. Optimizasyon çalışması; 5 mm CTP malzemede maksimum mukavemet sağlanması için %18 kalsit ve 600 RTM tipi elyaf kullanılmasının gerektiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam Elyaf Takviyeli Kompozit, Çok Amaçlı Deneysel Optimizasyon, D-Optimal Tasarım.

SUMMARY

In this thesis study, the mechanical properties of glass-fiber reinforced composite materials used in various industrial fields such as automotive, aviation and prepared by “*reaction injection transfer method*” were investigated in the context of multi-objective experimental optimization using *D-optimal experimental design* by considering various numerical/categoric variables such type of glass fiber, amounts of activator, methyl ethyl ketone peroxide and calcite.

Quadratic regression equations were obtained using experimental results and tested with various statistical analysis methods. Some important mechanical properties like tensile, impact and bending strengths were optimized by means of these equations and significant results was achieved in the 90% confidence interval.

All mechanical properties are influenced by the fiber type. All of the independent variables affect the flexural strength. Furthermore, activator amount affects only the flexural strenght. Optimization study showed that 18% calcite and 600 RTM type fiber must be used to ensure maximum strength to 5 mm FRP material.

Key Words: Glass-Fiber Reinforced Composite, Multi-Objective Experimental Optimization, D-Optimal Design.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU'na, çalışmalarımı yürütme imkanı veren Sazcılar Otomotiv A.Ş ve değerli çalışanlarına, göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili eşim Eren AKSU'ya ve tüm bu çalışmaları yaparken desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	2
2.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı	5
2.1.1. Matris Malzemesi	5
2.1.2. Takviye Elemanı	5
2.1.3. Katkılar	6
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	6
2.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	6
2.2.2. Seramik Matrisli Kompozitler	7
2.2.3. Polimer Matrisli Kompozitler	7
2.3. Elyaf Takviyeli Kompozitler	8
2.3.1. Elyaf lar	9
2.3.1.1. Cam Elyaf	10
2.3.1.2. Karbon Elyaf	11
2.3.1.3. Aramid Elyaf	11
2.3.2. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Matris Elemanları	11
2.3.2.1. Polyester Reçine	12
2.3.2.2. Vinilester Reçine	13
2.3.2.3. Epoksi Reçine	14
2.3.2.4. Fenolik Reçine	14
2.3.3. Jelkotlar, Katkılar ve Dolgu Malzemeleri	14

2.3.3.1. Jelkotlar	14
2.3.3.2. Sertleştirici Katalizörler	15
2.3.3.3. Hızlandırıcı Katalizörler	16
2.3.3.4. Dolgu Malzemeleri	16
2.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	18
2.4.1. El Dökümü	19
2.4.2. Reçine Transfer Kalıplama (RTM)	20
2.4.3. Profil Çekme	22
2.4.4. Elyaf Sarma	22
2.4.5. Otoklav	23
2.4.6. Levha Kalıplama Karışımı (SMC)	24
2.4.7. Yığın Kalıplama Karışımı (BMC)	24
2.4.8. Püskürtme Yöntemi	25
2.4.9. Enjeksiyon Kalıplama	26
2.4.10. Santifrüz Kalıplama	26
2.4.11. Sürekli Levha Üretim Metodu	27
3. DENEYSEL KISIM	28
3.1. Deney Tasarımı	28
3.1.1. İstatistiksel Metotlar	30
3.1.2. Deney Tasarımının Uygulama Aşamaları	31
3.1.2.1. Problemin Belirlenmesi	31
3.1.2.2. Faktör ve Seviyelerinin Belirlenmesi	31
3.1.2.3. Çıktı Değişkeninin Seçilmesi	32
3.1.2.4. Deney Tasarımının Seçimi	32
3.1.2.5. Deneylerin Yapılması	32
3.1.2.6. Verilerin Analizi	32
3.1.2.7. Sonuç	32
3.1.3. Deneysel Tasarım Türleri	33
3.2. Metod	33
3.2.1. Deneysel Tasarım Uygulama Aşamaları	33
3.2.2. Deney Tasarımı Seçimi	36
3.2.3. Deneylerin Yapılması	37
3.2.4. Verilerin Analizi	40

4. DENEY SONUÇLARI	42
4.1. Çekme Dayanımı	42
4.2. Eğilme Dayanımı	46
4.3. Darbe Dayanımı	51
4.4. Optimizasyon Çalışması Sonuçları	55
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	73
6. SONUÇ	79
 KAYNAKLAR	 80
ÖZGEÇMİŞ	82

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

a_{IU}	: Darbe dayanımı
b	: Numune genişliği
cc	: Santimetreküp
E_c	: Absorblanan enerji
α_F	: Eğilme gerilme parametresi
σ	: Çekme dayanımı
F	: Kuvvet
g	: Gram
h	: Numune genişliği
J	: Joule
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
L	: Mesnetler arasındaki mesafe
A	: Aktivatör
AB	: Aktivatör ile metil etil keton peroksit etkileşimi
AC	: Aktivatör ile kalsit etkileşimi
AD	: Aktivatör ile elyaf tipi etkileşimi
A^2	: Aktivatörün ikinci derece değişimi
B	: Metil etil keton peroksit
BC	: Metil etil keton peroksit ile kalsit etkileşimi
BD	: Metil etil keton peroksit ile elyaf etkileşimi
BMC	: Yığın kalıplama karışımı
B^2	: Metil etil keton peroksitin ikinci derece değişimi
C	: Kalsit
CD	: Kalsit ile elyaf tipi etkileşimi
CTP	: Cam elyaf takviyeli kompozit
C^2	: Kalsitin ikinci derece değişimi
ÇD	: Çekme dayanımı

D	: Elyaf tipi
DD	: Darbe dayanımı
D1	: 300 RTM Elyaf
D2	: 450 RTM Elyaf
D3	: 600 RTM Elyaf
D4	: 300+450 RTM Elyaf
D5	: 300+600 RTM Elyaf
DOE	: Deneysel tasarım
ED	: Eğilme dayanımı
ISO	: International Organization for Standardization
MEKP	: Metil etik keton peroksit
PI	: Tahmin aralığı
PTM	: Polimer matrisli malzeme
RTM	: Reçine transfer kalıplama
SE	: Standart Hata
SMC	: Levha kalıplama karışımı
UV	: Ultraviyole
2FI	: İki faktör etkileşimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Alkolün bir organik asitle tepkimeye girmesiyle elde edilen ester bağlayıcı.	13
2.2: El dökümü yöntemi ile üretim.	20
2.3: Reçine transfer kalıplama yöntemi ile üretim.	21
2.4: Profil çekme yöntemi ile üretim.	22
2.5: Elyaf sarma yöntemi ile üretim.	23
2.6: Otoklav yöntemi ile üretim.	23
2.7: SMC yöntemi ile üretim.	24
2.8: BMC yöntemi ile üretim.	25
2.9: Püskürtme yöntemi ile üretim.	26
2.10: Santifrüj kalıplama metodu ile üretim.	27
2.11: Sürekli levha üretim metodu ile üretim.	27
3.1: Bir sistemin veya sürecin genel gösterimi.	29
3.2: Çekme dayanımı test cihazı.	34
3.3: Eğilme dayanımı test cihazı.	35
3.4: Darbe dayanımı test cihazı.	35
3.5: a) Kalıbın hazırlanması, b) Jelkot uygulanması.	38
3.6: a) Kürlenmiş jelkotlu yüzey görünümü, b) Jelkotlu yüzeye elyaf serilmesi.	38
3.7: a) Kürlenme sonrası parça görünümü, b) Parçanın kalıptan parçanın çıkarılması.	38
3.8: Bağımlı bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimler.	40
4.1: Çekme dayanımı birinci model beklenen ve gözlenen değerler.	43
4.2: Çekme dayanımı, kalsit-aktivatör faktörleri arası etkileşim.	44
4.3: Çekme dayanımı, aktivatör-MEKP faktörleri arası etkileşim.	45
4.4: Çekme dayanımı, aktivatör faktörü etkisi.	45
4.5: Çekme dayanımı, kalsit-elyaf tipi faktörleri arası etkileşim.	45
4.6: Eğilme dayanımı birinci model beklenen ve gözlenen değerler.	48
4.7: Eğilme dayanımı, aktivatör-MEKP faktörleri arası etkileşim.	49

4.8:	Eğilme dayanımı, aktivatör-kalsit faktörleri arası etkileşim.	49
4.9:	Eğilme dayanımı, elyaf tipi-kalsit faktörleri arası etkileşim.	49
4.10:	Eğilme dayanımı, elyaf tipi-aktivatör faktörleri arası etkileşim.	50
4.11:	Eğilme dayanımı, elyaf tipi-kalsit faktörleri arası etkileşim.	50
4.12:	Darbe dayanımı birinci modele ait beklenen ve gözlenen değerler.	52
4.13:	Darbe dayanımı, kalsit-MEKP faktörleri arası etkileşim.	53
4.14:	Darbe dayanımı, aktivatör-MEKP faktörleri arası etkileşim.	54
4.15:	Darbe dayanımı, elyaf tipi-MEKP faktörleri arası etkileşim.	54
4.16:	Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon çalışması sonrasında istenirlik değerleri.	56
4.17:	Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-MEKP grafik gösterimi.	57
4.18:	Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-kalsit grafik gösterimi.	58
4.19:	Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon MEKP-kalsit grafik gösterimi.	58
4.20:	Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki rampa gösterim.	59
4.21:	Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyondaki istenirlik değerleri.	60
4.22:	Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-MEKP grafik gösterimi.	61
4.23:	Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-kalsit grafik.	62
4.24:	Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon MEKP-kalsit grafik gösterimi.	62
4.25:	Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki rampa gösterimleri	64
4.26:	Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyondaki istenirlik değerleri.	65

4.27:	Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-MEKP grafik gösterimi.	66
4.28:	Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-kalsit grafik gösterimi.	66
4.29:	Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon MEKP-kalsit grafik gösterimi.	66
4.30:	Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki gösterimleri.	68
4.31:	Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyondaki istenirlik değerleri.	69
4.32:	Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör- MEKP grafik gösterimi.	70
4.33:	Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-kalsit grafik gösterimi.	70
4.34:	Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon MEKP-kalsit grafik gösterimi.	71
4.35:	Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki rampa gösterimleri	72
5.1:	Farklı optimizasyon çalışmalarında dayanım değerleri.	74

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Kompozit kalıplama yöntemleri.	19
3.1: Deney tasarım özet bilgileri.	37
3.2: Deney plan kodlama bilgileri.	37
3.3: Deney planı.	39
3.4: Tasarım özet tablosu.	41
4.1: Çekme dayanımı regresyon model listesi.	42
4.2: Çekme dayanımı p değeri istatistiksel tablosu.	43
4.3: Eğilme dayanımı regresyon model listesi.	47
4.4: Eğilme dayanımı p değeri istatistiksel tablosu.	48
4.5: Darbe dayanımı regresyon model listesi.	52
4.6: Darbe dayanımı p değeri istatistiksel tablosu.	53
4.7: Model analiz tablosu.	55
4.8: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon kriterleri.	56
4.9: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon istenirlik en yüksek olan ilk 5 kombinasyon.	57
4.10: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki istenen değerler için nokta tahmini parametreleri.	59
4.11: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki istenen değerler için nokta tahmini.	59
4.12: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon kriterleri.	60
4.13: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki istenirlik en yüksek olan ilk 10 kombinasyon.	61
4.14: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini parametreleri.	63

4.15:	Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini.	63
4.16:	Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon kriterleri.	64
4.17:	Çekme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki istenirlik en yüksek olan ilk 10 kombinasyon.	65
4.18:	Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini parametreleri.	67
4.19:	Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini.	67
4.20:	Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon kriterleri.	68
4.21:	Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki istenirlik en yüksek olan ilk 10 kombinasyon.	69
4.22:	Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini parametreleri.	71
4.23:	Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini.	71
5.1:	%90-95 güvende yanıt değeri üzerinde etkili parametreler.	74
5.2:	Farklı optimizasyon koşullarında istenirlik değerleri.	75
5.3:	Farklı optimizasyon şartlarında bağımlı-bağımsız değişken değerleri.	76

1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojinin büyük bir hızla ilerlediği günümüzde otomotiv, havacılık, uzay ve savunma gibi endüstrilerde her geçen gün yeni ve üstün özelliklere sahip malzeme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Gelişen teknoloji ve rekabet koşullarının ağırlaşması kompozit malzemelerin daha ekonomik, mukavemetli ve aynı zamanda daha hafif olmasından dolayı klasik malzemelere alternatif olarak sunulmuştur. Kompozit malzemelerde en geniş ölçüde kullanılan cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerdir.

CTP'ler yüksek mukavemet, modül, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık, hafif ağırlık gibi özellikleriyle pek çok avantajları bulunmaktadır. CTP'lerin kullanım alanına göre sahip oldukları özellikler farklılık gösterir. İstenen niteliklerdeki kompozit malzeme üretiminde üretim tekniğine bağlı olarak uygun matris ve takviye eleman çiftinin seçimi önemlidir. Mekanik dayanım özelliklerinin talep edilen ideal koşulları optimizasyon çalışmalarında, hammadde ve üretim faktörleri göz önüne alınarak deneysel tasarım teknikleri kullanılarak sağlanır.

Deneysel tasarımın amacı genel olarak bir sürecin gösterdiği davranışlar hakkında bilgi toplayarak, bu sürecin kalite parametrelerini etkileyen faktörleri belirlemek ve sürecin kalitesini iyileştirilebilmesi için hangi faktörlerin hangi seviyede olması gerektiğini tespit etmektir. Bu şekilde süreçten beklenen performans özelliklerinin en iyilemesi için optimum faktör seviyeleri belirlenmiş ve ilgili sürecin kalitesi geliştirilmiş olur.

Bu çalışmada RTM üretim metodu ile CTP üretimi alanında deney tasarımı uygulanmıştır. CTP ürünlerin özelliklerinin geliştirilmesi için, kullanılan hammadde ve üretim proses parametrelerinin değişiminin mekanik özelliklere etkisini inceleyerek istatistiksel analizler yolu ile bir optimizasyon modeli geliştirmesi hedeflenmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

1900'lerin başında gelişmeye başlayan sentetik plastikler 1930'ların sonunda mekanik özellikler bakımından gelişerek uygulamalarda alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Polimerler, yapıları gereği çelik ve diğer konvansiyonel malzemelerden farklıdırlar ve polimerlerin avantajlı yanlarının ön plana çıkarak kullanım alanları giderek genişlemektedir [1].

Polimer esaslı kompozit malzemeler polimer malzemelerin mekanik mukavemetlerinin düşük olması nedeniyle 1950'li yıllarda geliştirilmeye başlanmıştır.

Kompozit malzemeler kimyasal bileşenleri farklı birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin kullanım yerindeki aranan özellikleri verebilecek daha uygun malzeme oluşumu için makro seviyede birleştirilmesi sonucu meydana gelen malzemelere denilmektedir. Doğadaki bileşik yapılu maddeler, kompozit malzemelere birer örnektir. Yeni üretilen malzemenin özelliği, yapıyı oluşturan bileşenlerinden daha üstün ve yeni özelliklere sahip yapılar oluşturmaktadır. Kompoziti oluşturan bileşenleri, çok çeşitli malzemelerden farklı form ve özellikte seçmek mümkündür [1].

Kompozit ve özellikle polimerik kompozitler sağladıkları mekanik, ısı ve tribolojik özellikler ve ayrıca metallere kıyasla daha hafif olması nedeniyle uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Şekillendirme kabiliyetleri, metal malzemelere kıyasla düşük yoğunlukta olması, korozyon direnci yüksek olmasından dolayı polimer malzemelerin en önemli özelliklerindendir.

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanı çok geniş boyutlara ulaşmıştır. Kompozit malzemelerin başlıca kullanım alanları ve bu alanlarda sağlanan avantajlar şu şekilde sıralanabilir.

- Şehircilik; Toplu konut yapımında, peyzaj (heykel, banklar, elektrik direkleri v.s.) kullanılmaktadır.
- Ev Aletleri; Masa, sandalye, televizyon kabinleri, saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve dekoratif ev eşyalarında kullanılmaktadır.
- Elektrik ve Elektronik Sanayi; Kompozitler, başta elektriksel izolasyon olmak üzere her türlü elektronik malzemenin yapımında kullanılmaktadır.

- Havacılık Sanayi; Havacılık sanayiinde kompozitler, gün geçtikçe daha geniş bir uygulama alanına sahip olmaktadır. Planör gövdesi, uçak modelleri, uçak gövde ve iç dekorasyonu, helikopter parçaları ve uzay araçlarında başarıyla kullanılmaktadır.
- Otomotiv Sanayi; Kompozitlerden oluşan başlıca ürünler; otomobil kaportası parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve oto lastikleridir.
- İş Makinaları; İş makinalarının kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler kullanılmaktadır.
- İnşaat Sektörü; Cephe korumaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları birer kompozit malzeme uygulamalarıdır.
- Tarım Sektörü; Seralar, tahıl toplama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında kompozitler özel bir öneme sahiptirler.
- Spor Araçları; Spor ekipmanlarında kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe daha da çok tercih edilmektedir. Birim ağırlık başına gösterdiği mukavemet, kullanıcının hareket kabiliyetinin artırmakta, malzemenin ise uzun süreler boyunca kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Deniz ulaşım araçlarında kompozitler malzemeler sahip oldukları malzeme yoğunluğu ve darbe dayanımı nedeniyle tercih edilir. Dağ bisikletleri en yüksek dayanım/ağırlık oranı kazanmak için karbon elyafı ile üretilmektedir. Bir diğer yandan golf sopası ve tenis raketi gibi spor ürünlerinde hafiflik karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler sayesinde kazanılmaktadır. Kompozitlerin düşük yoğunluğu, hafif konstrüksiyonlarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dirençleri, termal ve yalıtkan özellikleri ilgili kullanım alanları için bir avantaj teşkil eder. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi derlenmiştir.
- Yüksek Mukavemet; Çekme ve eğilme dayanımları metal malzemelere göre oldukça yüksektir. Bir diğer yandan kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede beklenen mukavemet verilebilir. Bu sayede daha az malzeme kullanımı ile maliyet azaltılma gözlenir.
- Kolay Şekillendirebilme; Yüksek hacimler ve grift parçalar tek bir işlemle bir parça halinde üretimi yapılabilir. Bu sayede malzeme ve işçilikten fayda sağlanmış olur.

- Elektriksel Özellikler; Bileşen seçimi ile kompozit malzemenin elektriksel özellikleri artırılabilir. Günümüzde enerji nakil hatlarında kompozitler kullanım amacına yönelik iletken ya da yalıtkan amaçlı kullanılabilir.
- Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Direnç; Kompozitler malzemeler atmosferik ortam, alkali yada asit gibi agresif ortamlardan etkilenmezler. Bu özellikler kompozit malzemelerin kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında kullanımına olanak sağlamaktadır. Özellikle korozyona karşı dayanımı yüksek olmasından dolayı, endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.
- Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı; Isıl dayanımı yüksek malzemelerden oluşan kompozitler yüksek ısı altında çalışabilmekte, ısıya dayanımı düşük kompozitler ise kullanılan katkı malzemeleri ile ısıya karşı dayanımları artırılabilir.
- Kalıcı Renklendirme; Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler ile ekonomik biçimde kompozit malzemelere renk kalıplama esnasında verilebilir.
- Titreşim Sönümlendirme; Sünek yapısı kompozit malzemelerin darbe absorblama yeteneği kazandırır. Çatlak ilerlemesinde böylece minimize seviyededir.

Sayılan avantajlarının yanında kompozit malzemelerin uygun olmayan yanları da şu şekilde sıralanabilir.

- Kompozit malzemelerde üretim esnasında oluşan hava boşlukları yorulma dayanımını düşürür.
- Kompozit malzemenin kimyasal dirençleri matrise bağlıdır ve bu matris malzemeler polimerlerdir. Bazı polimerlerin kimyasal dirençleri düşüktür.
- Kompozit malzemelerin mekanik dayanımları yönlenmeye bağlı olarak değişim göstermektedir.
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- Kompozitler geri dönüşümü olmayan maddelerdir.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme gibi talaşlı imalat sonrasında liflerde açılmaya neden olduğundan dolayı bu tür malzemelerde hassas imalattan uygulanamaz.

Kompozit malzemelerde hedef, farklı malzemelerin farklı ve değişken özelliklerinin en uygun şekilde kullanılması, hatta oluşan kompozit malzemenin daha üstün özelliklere kavuşturulmasıdır.

Mühendislikte yaygın olarak kullanılmakta olan çok farklı malzemeler mevcut olup bunlar genelde; plastikler, metaller ve seramikler olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Bunların birbirine göre zayıf ve üstün yanları vardır.

2.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı

Kompozit malzemeler üç ana elemandan meydana gelmektedir.

2.1.1. Matris Malzemesi

Kompozit malzemedeki sürekli fazı matris malzemesi oluşturur. Elyaf matris malzemesinin içinde yer alır ve matris elyafın bir arada tutmasını sağlar. Elyafın bireysel hareket etmesini engelleyerek malzemeye şeklini vererek ve malzemenin katı durmasını sağlamaktadır. Matris malzeme kompozit malzemeye yüklenen yükü elyafıya transfer etmektedir. Kompozit malzemelerde matrisin zayıf halka olması, herhangi bir yükleme durumunda matriste, başlangıçta mikro düzeyde olan ancak zamanla ilerleye bilen çatlakların oluşmasına sebep olmaktadır. Dışarıdan gelebilecek nem, ısı, kimyevi her türlü çevresel etkilere ilk maruz kalan malzeme matris olduğu için kompozit malzemenin özelliklerini belirler ve kimyasal, fiziksel zararlara karşı kompozit malzemeyi korur. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafı sağlam ve uygun şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir [2]. Kür zamanı ve sıcaklığı gibi fiziksel özelliklerde matris seçiminde önemli rol oynar.

2.1.2. Takviye Elemanı

Kompozitte uygulanan yükün çoğunu elyafıya taşıyıp yapıya mukavemet sağlar. Yüksek elastik modüle, sertlikte ve yüksek sıcaklıkta dayanımları ve diğer yapısal özellikleriyle kompozit malzemeyi kararlı kılar. Takviye malzemesi olarak farklı malzemeler kullanılmaktadır ve bunların kullanım şekline bağlı olarak kompozit

malzemeler sınıflandırılmıştır. Takviye malzemesi olarak kullanılacak yapının, kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemesi açısından önemi büyüktür ve seçiminin doğru yapılması gerekir.

2.1.3. Katkılar

Dolgu malzemeler, kimyasallar ve diğer katkıların kompozit malzemeye ilave edilmesinin asıl amacı matrise niteliklerine göre özelliklerinin geliştirilmesi içindir. Maliyetleri düşürmek, viskoziteyi arttırmak, rijitliği arttırmak, kalıptaki kırıkları azaltmak, yumuşak yüzey elde etmek gibi sebeplerden dolayı kullanılmaktadır.

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompoziti oluşturan matris ve mukavemetlendirici bileşenlerinin çok çeşitli malzemelerden farklı form ve özellikte seçmek mümkündür. Genelde matris fazı süreklilik içerir ve yapı içinde değişik mimaride dağılmış mukavemetlendirici fazı çevreler. Başlatabilecek fiziksel hasarlara karşı korur. Kompozitlerde matris olarak kullanılmakta olan malzemeler genel olarak polimerler, metaller ve seramikler olmak üzere üç gruba ayrılırlar [3].

2.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Makine ve metalürji mühendisliği alanında en yaygın olarak tercih edilen malzeme türü olan metaller, orta ve yüksek yoğunluğa sahip ancak tokluk ve dayanımını özellik çiftinin en uygun olduğu gruptur. Metallerin saf halde sertlik ve dayanımları düşüktür. Ancak alaşımlama, soğuk biçimlendirme, ısıl işlemle dayanım ve sertlikleri artırılabilir. Metal malzemeler, yüksek zorlamalara maruz kaldığı zaman kırılmaz, sadece şekil değiştirir ve yükü bütün sisteme dağıtır bu da kullanımda güvenilirlik sağlar. Ayrıca metaller kolaylıkla dökülerek veya plastik deformasyon oluşturularak şekillendirilebilir ve karmaşık montajlarda kaynak, vida ile birleştirmeye elverişlidir. Ağır ve korozyif olmaları kullanımda zorluk yaratan özellikleridir. Bazı metaller, liflerle veya taneciklerle takviyelendirilerek kompozit elde edilebilir.

2.2.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Düşük yoğunluklu, mukavim ve sert olmalarına rağmen çok gevrek olan seramikler plastik davranışı göstermezler. Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC gibi matrisler kullanılarak seramik kompozit yapı elde edilebilir. Seramik fiberlerin yüksek oksidasyon direncine sahip olmaları nedeniyle yüksek sıcaklık kullanımlarında metal ve karbon fiberlerden daha üstündür. Seramik esaslı kompozit malzemeler nükleer uygulamalarda, gaz türbinlerinde ve uzay- havacılık sektöründe kullanılır.

2.2.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Endüstride en yaygın uygulamaya sahip olan kompozitler, polimer esaslı kompozitlerdir. Polimer esaslı kompozitler ile rahatlıkla form verilebilen ve takviye elyaflar sayesinde oldukça sağlam, sert ve hafif malzemeler elde edilebilir. Metallere nazaran yorulma ile korozyona direnci ve malzeme yapısında meydana gelen hasarların tolere edilebilmesi avantaj oluşturmaktadır.

Polimer matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi polimerlerdir. Kimyasal olarak büyük polimer moleküllerinin doğrudan elde edilmesi mümkün olmaz. Öncelikle monomer adı verilen aktif grupların üretilmesi gerekir. Çok sayıda küçük moleküller birbirine bağlanarak uzun molekül zincirleri meydana getirir. Monomer birimlerinden oluşan uzun molekül zincirlerine ise “polimer” adı verilir. Kompozitlerde matris malzemesi olarak termoset ve termoplastik polimer malzemeler kullanılır. Bu polimer malzemelerin ısı davranışları birbirinden farklıdır.

Termoset polimer esaslı malzemeler üretimi aşamasında bir defaya mahsus ısıtılıp şekillendirilir ve bundan sonra malzemeye tekrar ısı verilip şekillendirilemez. Malzemelerin molekülleri birbirlerine çapraz bağlı oldukları için geri dönüşümü yoktur.

Termoplastik polimer esaslı malzemeler, oda sıcaklığında katı malzeme olarak adlandırılır. Isıtılırsa yumuşar, sıcaklık arttıkça viskozitesi düşer. Bu özellik bunlardan yapılan ürünleri daha ekonomik yapar ve kolaylıkla şekillenmesini sağlar. Tekrar soğutulduğunda ise yeniden sertleşir. Sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda viskozitesi yüksektir. Bu nedenle ara yüzey bağı termosete göre daha zordur. Ancak şekillendirme

kapasitesi iyi olduğundan kullanımları yaygınlaşmaktadır. Genel olarak polimer matrisli kompozitlerin özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Birim alan ağırlığında hem takviyesiz plastiklere hem de metallere göre daha yüksek mukavemet değerleri sunar.
- Tasarımcının aklına gelebilecek her türlü karmaşık, basit, geniş, küçük, yapısal, estetik, dekoratif ya da fonksiyonel amaçlı olarak tasarlanabilirler.
- Çeşitli mekanik, çevresel baskılar altında termoset kompozit ürünler şekillerini ve işlevselliklerini koruyarak ve boyutsal kararlılığa sahiptirler.
- Birçok bileşenin üretiminde elektrik yalıtım özelliğinden dolayı tercih edilirler.
- Çelik türündeki geleneksel malzemelerde karşılaşılan birçok parçanın birleştirilmesi ve sonradan monte edilmesi işlemini tek parçada kalıplama olanağı ile ortadan kaldırır.
- Polyester reçine, özel pigment katkıları ile renklendirilmek suretiyle, amaca uygun kendinden renkli olarak da üretilebilir.
- Tam şeffaf olması nedeni ile ışığı yayması sayesinde, difüze ışığın önem kazandığı seralarda ve güneş kolektörü yapımında önemli avantaj sağlar.
- Beton, ahşap ve demir yüzeylere, PMK'ler mükemmel yapışır.
- Kullanılan polysterin “alev dayanımlı” olmasına bağlı olarak yanmazlık özelliğine sahip olurlar.
- PKM'ler tahta gibi kolayca kesilir, delinir, zımparalanır.

Kompozit üretimini sıvı polimerin mukavemetlendiriciyi ıslatması ile başlar ve reçine kalıplama sırasında katı hale geçerek geri dönüşümsüz bir proses gerçekleşir. Termoset reçineden oluşan kompozit malzemeler, ısıya ve kimyasala karşı dirençli olmasının yanında yüksek fiziksel özellikleri ve yapısal dayanıklılığından dolayı termoplastik esaslı kompozit malzemelere göre daha üstündür.

2.3. Elyaf Takviyeli Kompozitler

Son yıllarda elyaf takviyeli polimer kompozitler teknoloji alanında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleri, kullanım amacına göre tasarım kolaylığı, boya ve benzeri katkı maddelerinin

uygulanabilirliği gibi nedenler ile kullanım olanakları geniş ve ekonomik bir malzeme özelliği taşımadır. Uygun reçine seçimi tasarımcıya servis sıcaklık kapasitelerini, kimyasal direnç özelliklerini, elektriksel özelliklerini, ateşe karşı direncini ve kompozit ürünün yapışma karakteristiğini değiştirmesini sağlar.

CTP'yi oluşturan iki ana malzeme reçine ve elyaflardır. Sistemde elyaf takviyeyi, reçine ise matrisi oluşturur. Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir.

2.3.1. Elyaf lar

Elyaf lar kendi aralarında özelliklerine göre E (elektriksel), C (kimyasal) ve S (yüksek çekme gücüne sahip) olmak üzere e ayrılırlar. En gok kullanılan E tipi esas olarak elektrik amaçlı düşünülmesine rağmen iyi mekanik özelliklere ve ısı dirence sahip olduğu için bugün birçok sanayi dalında kullanılmaktadır. C tipi cam kimyasal korozyona karşı oldukça dirençlidirler, mekanik zellikleri E camına göre daha dşktir. Bunun yanında maliyeti de yüksektir. S camlarında S harfi, yüksek mukavemet ve modülü temsil eder [4].

Kompozit malzemelerde kullanılan elyafların fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri üzerinde gok önemli bir faktördür. Takviyeler temel olarak sürekli ve süreksiz olmak üzere iki farklı biçimde bulunmaktadırlar.

Süreksiz elyaflar doğranmış elyaflar, öğütülmüş elyaflar ve liflerdir. Kırılmış elyaf sıklıkla enjeksiyon ve basınçlı kalıplamada makine parçaları ve kimyasal valf imalatında kullanılır.

Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise elyaflar ile temas azalacaktır. Nem absorbsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir.

Elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan elyaf malzemeler, üretilen malzemenin dayanım ve rijitlik gibi özelliklerini geliştirmekle birlikte kompozit malzemenin çalışma sıcaklığında da iyileştirmeler yapmaktadır.

Elyaf lar kompozit yapının güçlendirici görevini üstlenen bileşeni olup, yükün taşınmasından sorumludur ve yapıya mukavemet sağlar. Aramid ve karbon elyaflar gibi yüksek mukavemetli elyaflar birçok gelişmiş uygulamalarda kullanılmasına

rağmen cam elyaflar en çok kullanılan malzemedir. Takviye malzemeleri içinde, tüketim ve satış miktarları açısından, en geniş ölçüde kullanılan takviye malzemesi cam elyafıdır. Cam elyaf takviyeli kompozitler diğer mühendislik malzemeleri karşısında sahip oldukları bu üstün özellikleri sebebi ile kullanım alanı giderek artmaktadır.

2.3.1.1. Cam Elyaf

Elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan takviye malzemesidir. Aramid ve karbon elyafa göre oldukça ucuz ve kolay bulunabilmektedir.

Cam elyaf silika, alüminyum oksit, soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Elyaf kumaşları genellikle sürekli cam elyaf lifleri ile üretilmektedir. Cam elyafın üretim prosesinde elyafın yüzeyi yapışma özelliklerini kazandıran ve aşınmaya karşı direncini artıran kimyasallar ile kaplanır. Genellikle cam elyaf ile matris arasında yapışma gücünü artıran ‘silan’ bağlayıcılar kullanılır. Bağlayıcılar, cam elyafın kalıplama özelliklerini ve elyaf-matris bileşiminde belirlemektedir. Kompozitin mukavemeti reçine-cam bağının kuvveti ile doğru orantılıdır. Çeşitli kimyasal ilaveleri ve farklı üretim yöntemleri ile değişik türde cam elyaflar üretilir. Cam elyaf, kullanım yeri ve amacına göre aşağıdaki gibi yapılar da bulunabilir.

- Tek ve çok uçlu fitiller
- Keçe ve kumaşlar
- Dokunmuş kumaşlar
- Dikilmiş kumaşlar

Cam elyafların özellikleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- Yüksek çekme mukavemetine sahiptirler, birim ağırlık başına mukavemeti çelikten yüksektir.
- Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar. Malzemelerin ısı özellikleri katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilebilir.
- Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.

- Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam elyafı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir delaminasyon olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.
- Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyafı kompozitlerin kullanılmasına imkân tanır.

2.3.1.2. Karbon Elyaf

Karbon elyaflar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Çeşitli plastik matrisler ile en yaygın olarak ise epoksi reçinelerle kullanılırlar. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler.

2.3.1.3. Aramid Elyaf

Aramid aromatik polyamitin kısaltılmış adıdır. Pazardaki adları Kevlar (DuPont) ve Twaron (Akzo Nobel) olarak bilinmektedir. Farklı uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için birçok farklı özelliklerde aramid elyafı üretilmektedir.

Aramid elyaflar yüksek darbe direnci, çekme mukavemeti, düşük maliyet özelliklerine sahiptir. Kevlar elyafı kullanarak üretilen kompozitler cam elyafı ile üretilen malzemelere kıyasla % 35 daha hafif olması nedeniyle E cam türü elyaflara yakın basma dayanımı gösterirler [1].

Doğal kimyasallara dirençlidir ancak asit ve alkalilerden etkilenir. Ayrıca bazı tür aramid elyafı ultraviyole ışınlarla maruz kaldığında bozunma göstermesi nedeniyle karanlıkta saklanmaları gerekmektedir.

2.3.2. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Matris Elemanları

Plastik matris olarak kullanılan malzemeler reçine olarak adlandırılmaktadır. Termoset ve termoplastik olarak iki tip reçine bulunmaktadır. En çok kullanılan matris malzemesi polyester reçinesiyken gelişmiş kompozitlerin üretiminde ise genellikle epoksi reçine kullanılmaktadır [5].

- Termoset reçineler
- Termoplastik reçineler

Polimer matrisli kompozitlerde, matris malzemesi için en çok kullanılan malzeme termoset esaslı malzemelerdir [6]. Yaygın olarak kullanılan termoset reçineler polyester, vinilester ve epoksidir. Bu malzemeler oda sıcaklığında sıvı formdadırlar. İşleme esnasında ekzotermik reaksiyon meydana getirdiklerinden yüksek sıcaklıklara çıkmaktadırlar. Elyaf, termosetlerle kolay ıslatılabildiğinden, boşluk ve gözenek daha azdır.

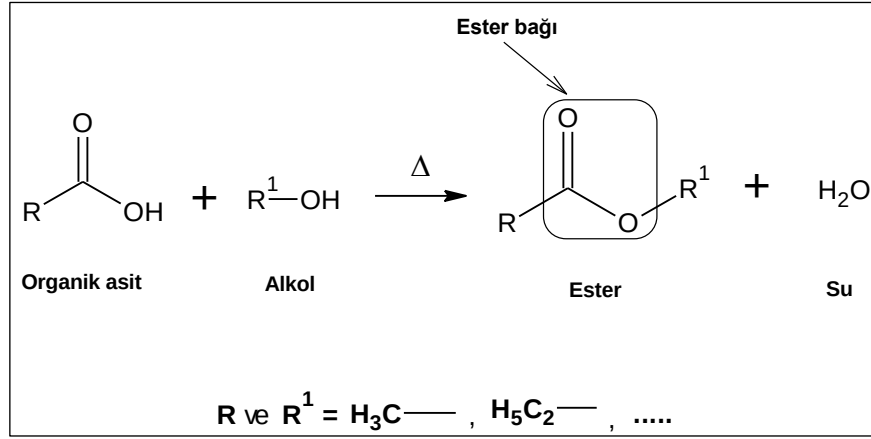
2.3.2.1. Polyester Reçine

Polyester reçineler en basit ve ekonomik reçine sistemidir. Polyesterler, dikarboksilik asitler ve polihidrik alkollerin (glikoller) kondensasyon polimerizasyonu sonucu oluşurlar. Ürün olarak alınan polimer ağ yapısını oluşturabilmek ve düşük viskozitede bir sıvı elde edebilmek amacıyla stiren gibi reaktif bir monomer içinde çözülür. Bu reçine sertleştiğinde, monomer polimer üzerindeki doymamış uçlar ile reaksiyona girer ve onu bir katı termoset yapıya çevirir.

Polyesterin ısı olmadan kürleşmesi katalizörle birlikte hızlandırıcının katkısı ile sağlanır. Standard laminasyon işleminde kullanılan iki tip polyester vardır. Ortoftalik polyester birçok üretici tarafından kullanılan standart ekonomik bir reçinedir. Isoftalik polyester ise mükemmel suya direnci sayesinde deniz endüstrisinde tercih edilmektedir [7].

Polyesterler, doymuş ve doymamış olmak üzere iki farklı gruba ayrılırlar. Bu ayrım polyesterin çift bağ içerip içermemesine bağlı olarak değişmektedir [5]. Eğer bünyesinde çift bağ barındırmayan bir polyester ise termoplastik, eğer çift bağ içeriyorsa termoset malzemelerdir.

Doymamış polyesterler, sahip oldukları tepkimeye girmeye eğimli olan çift karbon-karbon paylaşım bağlarıyla termoset malzemeler olarak çapraz bağlanabilirler. Cam elyafla birleştirilen doymamış polyesterler yüksek dayanımda karma malzeme olarak çapraz bağlanırlar. Doymamış polyesterin kimyası şöyle özetlenebilir, ester bağlayıcı aşağıda gösterildiği gibi alkolün bir organik asitle tepkimeye girmesiyle elde edilir [8].



Şekil 2.1: Alkolün bir organik asitle tepkimeye girmesiyle elde edilen ester bağlayıcı.

Peroksit olgunlaştırma maddeleri en yaygın olarak kullanılanlar olup, metil etil keton (MEK) peroksit çoğunlukla oda sıcaklığında olgunlaşan polyesterler için kullanılır. Tepkime genel olarak az miktarda kobalt naftanatla etkinleştirilir. Polyesterin sertleşme işleminde stiren içindeki çift bağlar polyester bünyesindeki çift bağlarla birleşerek üç boyutlu yapılar oluştururlar. Bu işlem bittiğinde reçine verilen şekli koruyan katı bir yapıya dönüşür.

Isıya ve kimyasallara dayanıklı, yüksek mekanik ve yanmazlık özelliğine sahip, esnek, parafin içermeyen doymamış polyester reçinelerin kullanım amaca ve üretim tekniğine göre farklı özelliklere sahip olabilir.

Doymuş polyester reçineler, termoplastik özellik gösteren, enjeksiyon kalıplamada ve elyaf üretiminde kullanılan malzemelerdir. Cam elyaf takviyeli plastik malzeme üretiminde en çok bu malzeme kullanılmaktadır. Bu malzeme; mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleri, kullanım amacına göre tasarım kolaylığı, boya ve benzeri katkı maddelerinin uygulanabilirliği gibi nedenlerle, olanakları geniş ve ekonomik bir malzeme özelliği taşımaktadır [8].

2.3.2.2. Vinilester Reçine

Vinilester reçineler epoksi reçinelerin avantajları ile doymamış polyester reçinelere özgü “kolay işleme” ve “hızlı sertleşme” gibi özellikleri birleştirmek üzere geliştirilmiştir [8]. Epoksi reçine ile akrilik ya da meta akrilik asidin reaksiyona girmesi sonucu elde edilmektedirler. Vinilesterler polyester reçinelerde kullanılan geleneksel organik peroksitlerle sertleştirilebilir. Vinilester, mekanik dayanım ve

mükemmel korozyon dayanımı sağlar. Polyestere göre bulunan daha az ester grubu sayesinde reçine hidrolizde daha az zarar görür. Bu özelliği sayesinde vinilester bazen polyester laminasyonunda bariyer kat olarak kullanılır [9].

2.3.2.3. Epoksi Reçine

Epoksi reçineler, geniş bir yelpazedeki kompozit parçaların üretiminde en yaygın kullanıma sahip reçinedir [10]. Epoksi reçineler, türüne ve son kullanım yerine göre sıvı veya katı olarak temin edilebilir.

Epoksi reçineler genellikle üstün performanslı fakat daha yüksek maliyetteki istemlerinin kullanımını öngören kritik uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak, epoksi reçinenin viskozitesinin çoğu polyester reçineden yüksek olması ve üstün mekanik özellikler elde etmek için post-kür gerektirmesi nedeniyle epoksilerin kullanımı zordur.

2.3.2.4. Fenolik Reçine

Termoset olarak sanayide kullanılan ilk plastik malzemedir [8]. Fenolik reçineler çoğunluklu fenölün formaldehit ile kondensasyon polimerleşmesi tepkimesi yapmasıyla elde edilir, yan ürün olarak su açığa çıkar. Fenolik reçineli kompozitler, yanmaya karşı yüksek direnç, uzun süreli kullanım dayanıklılığı, yüksek sıcaklıklarda mükemmel dayanım, hidrokarbon ve klorlu çözücülere karşı direnç özellikleri gösterirler [6]. Fenolikler, fren ve debriyaj balataları, cila ve izolasyon endüstrilerinde yüksek miktarlarda kullanılmaktadır [11].

2.3.3. Jelkotlar, Katkılar ve Dolgu Malzemeleri

2.3.3.1. Jelkotlar

Jelkot, kompozit malzemelerin özellikle cam elyaf takviyeli plastiklerin, en üst katmanında yer alan ve yüzey görünüm kalitesini artırmanın yanında, CTP ürünün dış ortam performansını sağlayan malzemedir. Genel olarak jelkotlar, epoksi veya doymamış polyester reçine esaslıdır. Kimyasal açıdan jelkot, modifiye edilmiş yüksek

performans polyester reçinelerinden elde edilmektedir. CTP ürün eldesi sırasında kalıp yüzeyine sıvı formda fırça veya püskürtme yönetimi ile uygulanır. Sıvı formdan katı forma, eklenen MEKP sayesinde kürlenerek dönüşür. Kürlenme (sertleşme), polimerler arasında oluşan çapraz bağlar ile meydana gelir [7].

Ürün kalıptan ayrıldığında gözüken yüzey jelkot katmanını temsil eder. Jelkot yüzeyi genellikle pigment pasta içerdiğinden dolayı farklı renklerde ürün elde edilebilmesini sağlar. Deniz aracı (yat, katamaran, vb.) hafifliği ve korozyon direncinden dolayı kompozit malzemeler ile üretilmektedir. Bu araçların dış katmanları (kabukları) genellikle 0.5-0.8 mm kalınlıklar arasında jelkottur. Yüksek performans jelkotlar tasarlanırken, kimyasal, UV ve hidroliz dayanımları göz önünde bulundurulmalıdır. Kompozit malzemelerin kalıplarında kullanılan jelkotlar ise, üretim sırasında oluşabilecek sıcaklık ve mekanik gerilimlere dayanabilecek yapıdadır.

Kimyasal yapıları (ISO, NPG, Akrilik, vb.) ve modifikasyon türleri farklılıklar göstermekle birlikte, genel olarak jelkot türleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Sonradan boyanabilen jelkotlar
- Performans ISO/NPG
- Yüksek performanslı jelkotlar
- Yüksek performanslı marin jelkotlar
- Alev geciktiricili jelkotlar
- Kalıp imalat jelkotları
- Kimyasal maddelere karşı dayanıklı jelkotlar
- Genel amaçlı jelkotlar [7].

2.3.3.2. Sertleştirici Katalizörler

Sertleştiriciler, reçine içindeki hızlandırıcılar ile reaksiyona girerek ya da ısı ile malzemenin sertleşmesini sağlamaktadırlar. Reçinenin sertleşmesi için gerekli çapraz bağ oluşum reaksiyonunu başlatırlar. Farklı reçine tipleri ve uygulamaları için çok çeşitli sertleştiriciler mevcuttur. Polyesteri sertleştirmek amacı ile kullanılan organik peroksitler katı, sıvı ve pasta halinde pazarda bulunmaktadır. Kullanılan peroksitler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Keton peroksit
- Metil etil keton peroksit
- Çinko heksanon peroksit
- Butanoks M-50
- Butanoks LPT
- Asetil aseton peroksit
- Metil izobütil keton peroksit
- Siklohezanin peroksit [11].

2.3.3.3. Hızlandırıcı Katalizörler

Peroksitlerin radikallere ayrılması, sıcaklık etkisiyle ya da hızlandırıcı olarak adlandırılan kobalt naftanat ve amin gibi kimyasal maddelerin etkisiyle olur. Hızlandırıcılar, peroksitlerin serbest radikalleri oluşturması için gerekli olan enerjiyi düşürür. Doymamış polysteri sertleştirmede kullanılan hızlandırıcılar kobalt ve vanadyum metallerinin organik asitler ile oluşturdukları bileşiklerdir. Kobalt genellikle kobalt oktanat ve kobalt naftanat şeklindedir.

Kobalt hızlandırıcıları toluen içinde %1, %6, %10 metal ihtiva edecek şekilde pazarda yer almaktadır. Keton peroksit ve kobalt naftanat hızlandırıcıları değişik oranlarda kullanılarak polyster reçinesinin kullanım süresini değiştirebilirler. Kalıptan çıkarma süresi genellikle aminli hızlandırıcılara nazaran daha uzundur. Kobalt yüzeylerde kuruma yaparak havadaki oksijenin inhibitör etkisini azaltır.

Vanadyumlu hızlandırıcılar da oktanat veya naftanat şeklinde pazarda yer almaktadır. Vanadyum daha etkili bir hızlandırıcıdır, fakat kararlılığı düşük olduğu için kullanımı yaygın değildir [11].

2.3.3.4. Dolgu Malzemeleri

Dolgu maddeleri, matrisin kompozisyona katı halde eklenen malzemelerdir. Genelde laminat malzemenin ağırlıkça matrisin %40-65'ini oluştururken, maliyet düşürücü olarak da kullanılmaktadır. Dolgu maddelerinin genel özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Kompozit malzemenin alev dayanımını artırır.
- Üretim maliyetini azaltır.
- Dolgu maddeleri, kompozit yapının mekanik özelliklerini iyileştirir.
- Üründe reçine ve matris arasında yük dağılımını sağlayarak kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel performansını artırır.
- Kompozit malzeme üzerindeki her noktanın aynı özellikleri taşıması ve dolgu maddelerinin de matris içinde düzenli dağılmasıyla daha etkili bir ürün elde edilebilir.
- Dolgu maddeleri ile reçinede boyutsal stabilite, su ve hava direnci, ısıl dayanım, yüzey düzgünlüğü ve sert artırılabilir.
- Farklı yapı ve tane boyutlarında dolgu maddelerinin kullanılması yapının daha homojen olmasını sağlar.
- Hafif dolgu maddeleri ağırlık artışına katkıda bulunmaz fakat performansı olumlu etkileyerek en düşük maliyeti sağlar.

Kullanılacak dolgu maddelerinin seçilmesi aşamasında dikkat edilmesi gereken birçok unsur vardır. Bunlardan birkaçı şöyledir.

- Uygun tane boyutu dağılımı
- Dolgu maddesi yüzeyinde meydana gelebilecek kimyasal reaksiyonlar
- Matris içinde dağılımı ve matrisle arasında zincir bağlanması
- Üretim sırasında oluşabilecek aşınma ve benzeri problemler
- Bileşimin özellikleri
- Üretim sırasında endüstriyel açıdan güvenlik
- Maliyet

Günümüzde karbonat dolgu maddeleri genel olarak maliyet düşürücü olarak kullanılmaktadır. Kalsiyum karbonat, polyester reçine sistemleriyle birlikte en çok kullanılan dolgu maddesidir. Doğada tebeşir, kireç taşı ve mermer şeklinde bulunur ve çok az miktarda başka mineralleri de içerebilir. Karbonat dolgu maddelerinin genel özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Yüksek saflığa sahiptir. Böylece plastiğin kataliz işlemlerinde yapıda metal iyonları bulunmaz.
- Topaklanma eğilimi yoktur.
- Kalsit, düşük yüzey enerjisine sahiptir ve kararlı yapıda olduğundan dolayı plastikleştiriciler ile diğer eklentiler üzerinde çok büyük etkisi görülmez.
- Çok yüksek derecede beyazdır, bu yüzden çok pahalı olan beyaz renk pigmentleri yerine kullanılabilir.
- Aşındırıcı etkisi yoktur, kolay işlenebilir.
- Geçirgenliği yüksektir fakat son ürünün mekanik ve elektriksel özelliklerini etkiler.
- Tokluk ve elastikte modülünde artış sağlar.
- Boyutsal çekmeyi azaltır, renklerde kalıcılık sağlar.
- Yüzey düzgünlüğüne katkısı vardır.
- Çökelme eğilimi düşüktür.
- Özellikle kaplama yapılan bölgelerinde ürünün darbe mukavemetini ve yaşlanma direncini arttırıcı etkisi vardır.
- Zararsız, tatsız, kokusuz bir dolgu maddesidir.

Kalsiyum karbonat tanelerinin yüzey alanı geniş olduğundan reçine emiliminin yüksek olduğu yerlerde kullanılır. Kalsit adı verilen yarı amorf halde bulunan kalsiyum karbonat taneleri ise daha yüksek reçine emebilme özelliğine sahiptir [8].

2.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Takviye malzemesi ile matris malzemesinin karışımından oluşan yeni malzeme sertleşene kadar kompozit yapıyı oluşturmaz. Katılaştırma işlemi boyunca bir katkı malzemesi ile karıştırılan matris, malzeme polimerize edilirken malzeme sıvı halden katı hale geçer. Matrisin sertleşmesi ile kompozit malzeme oluşumu gerçekleşir. Bu noktadan sonra malzeme özelliklerini değiştirmek mümkün değildir.

Polimer matrisli kompozitlerde, kullanılan matrise ek olarak uygulama geliştirmesinde, seçilen malzeme ve üretim yöntemi arasındaki ilişki, kompozitlerin sağladığı avantajları ve elde edilen son ürünün sınırlarını geleneksel malzemelerde

olduğundan daha fazla etkilemektedir. Proses seçimini etkileyen faktörler ise aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Kalıplanacak parçanın geometrik şekli ve boyutu
- Reçine türü ve özellikleri
- Formu ve malzemeden istenen mekanik ve fiziksel özellikleri
- Takviye malzemesinin (elyaf) türü ve özellikleri

Bir parçayı üretmek için genel olarak ham madde, kalıp, ısı ve basınç ihtiyacı vardır. Kompozit malzemelerin üretim işlemleri kalıplama yöntemleri ile olmaktadır.

Kompozitler kalıplama yöntemine göre açık kalıplama ve kapalı kalıplama yöntemi olarak ikiye ayrılır. Tablo 2.1’de yöntemler verilmiştir. Açık kalıplamada üretim süresince jelkot ve laminalar hava ile temas halinde iken kapalı kalıplama yönteminde çift taraflı kalıplar ya da vakum torbası ile olur.

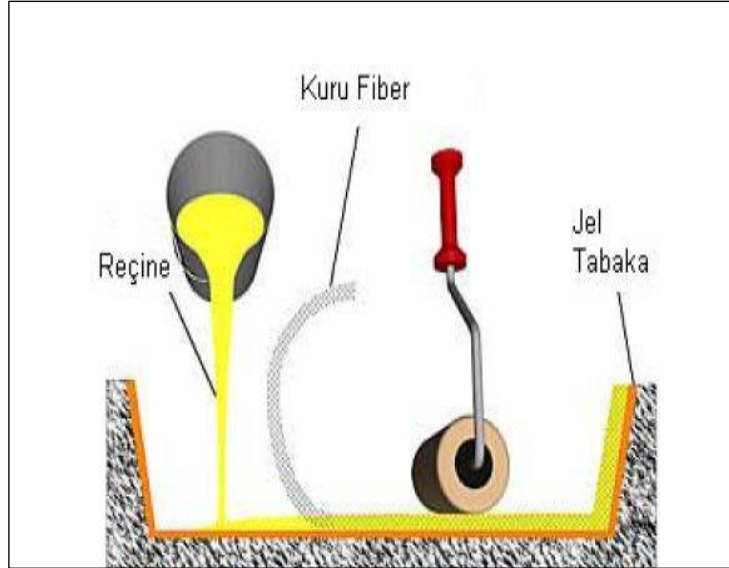
Tablo 2.1: Kompozit kalıplama yöntemleri.

Açık Kalıplama Yöntemleri	Kapalı Kalıplama Yöntemleri
El dökümü yöntemi	Reçine transfer yöntemi (RTM)
Püskürtme yöntemi	Pultrüzyon yöntemi
Elyaf sarma yöntemi	SMC ve BMC
Otoklav yöntemi	Enjeksiyonla kalıplama yöntemi
	Termoset kompozit

2.4.1. El Dökümü

El dökümü yöntemi düşük ve orta hacimli temas kalıplama olup, kayık teknesi, tanklar, bina panelleri ve bunun gibi büyük boyutlu yapısal parçalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalıp ayırıcı olarak, reçine uygulamasından önce polivinil alkol veya silikon kullanılır [12]. Yüzeyi hazırlanmış kalıba jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra elyaf katları yatırılır. İstenilen yön ve doğrultuda ve hacim oranlarında talep edilen kalınlığa ulaşıncaya kadar işleme devam edilir. Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir bu nedenle, hava kabarcıklarını gidermek için rulo kullanılır. El yatırma tekniğinde en çok kullanılan oda sıcaklığında sertleşen genel

amaçlı polyesterlerdir. Polyesterlerin haricinde epoksi, vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. El yatırma yoğun işçilik gerektirmemesinin yanında kullanılan araç, gereç ve teçhizat maliyeti düşük olduğundan dolayı en sık kullanılan yöntemdir. Ayrıca üretilen parçalarda tasarım değişiklikleri kolayca yapılabilir [13].

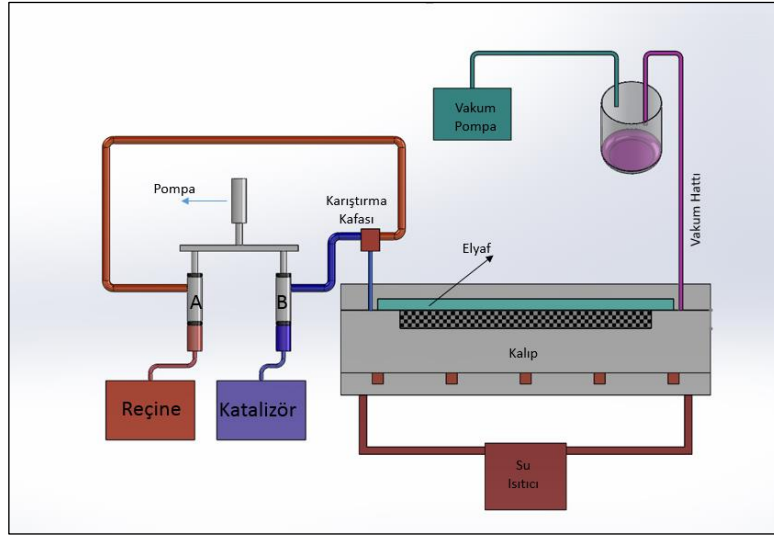


Şekil 2.2: El dökümü yöntemi ile üretim.

2.4.2. Reçine Transfer Kalıplama (RTM)

RTM, matris ve takviye elamanları erkek ve dişi kalıp arasına yerleştirildiği kompozit malzeme üretim yöntemidir. RTM üretim yöntemi, el yatırması tekniğine göre daha hızlı olup, kullanım ömrü uzundur. Kompozit malzemeyle kullanılarak imal edilmesi çelik kalıp maliyetine göre daha düşüktür [7].

Bu yöntemde genellikle sürekli lifler kullanılır. RTM prosesinin en belirgin özelliği her iki yüzeyi düzgün yapısal parçalar üretebilmesidir. Kalıp yüzeylerinden birine veya ikisine birden jelkot uygulanabilir. Korozyon dayanımı ve/veya dış yüzey görünümü daha iyi istenen durumlarda tül veya yüzey keçesi kullanılabilir [14].



Şekil 2.3: Reçine transfer kalıplama yöntemi ile üretim.

En yaygın kullanılan reçineler epoksiler ve doymamış polyesterlerdir. Yeni geliştirilen epoksi reçineler hızlı kür edilebilme özelliğiyle üretim kapasitesini de artırmaktadırlar. RTM yönteminde devamlı keçe ve kırılmış demetten ön şekillendirilmiş takviye malzemelerinin kullanımı yaygındır.

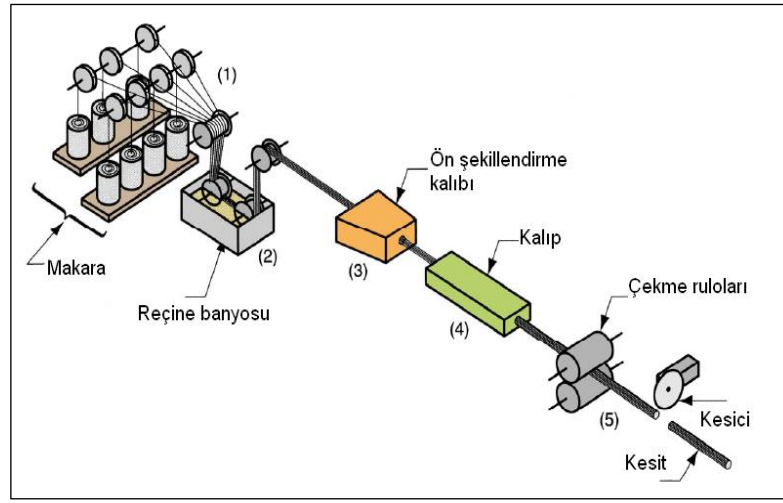
RTM yönteminde kalıba jelkot uygulanır ve sertleşmesi beklenir. Takviye malzemesi kalıp boşluğunu dolduracak şekilde kalıba yerleştirilir. Basınç altında tutulan reçine, katalizör, renk, dolgu karışımı tek veya çoklu girişten kalıp içine pompalanır. Enjeksiyon işlemi aşağıdan yukarıya doğru yapılır bunun sebebi hava kabarcıklarının minimuma düşürülmesidir.

RTM yöntemindeki en önemli problem oluşabilecek kuru bölgelerdir. Bu yüzden kalıp çevresine sızdırmazlık sağlaması açısından conta yerleştirilir. Yine contaya yakın kısımlardan hava çıkışını sağlamak ve reçine firesini azaltmak için hava vanaları bulunmaktadır. Düzgün reçine akışı ve kuru bölgeleri elemek için bu hava kanallarına vakum uygulanarak takviye malzemesindeki hava çıkarılır. Vakum aynı zamanda kalıbın hızlı dolmasını da sağlamaktadır [14].

Reçine enjeksiyon basıncı kalıptaki vakuma, reçine viskozitesine, kalıp boyutuna, boşluklu yapının geçirgenliğine, gerekli kalıp dolum süresi ve reçinenin kür kinetiklerine bağlıdır. Kalıp maliyetleri, orta ölçekli bir üretim yöntemi olması, enjeksiyon basıncının ayarlanabilmesi, kalıpların tasarlanması ve üretimi, kilit ve conta sistemi ele alındığında proses biraz daha karmaşık hal almaktadır.

2.4.3 Profil Çekme

Profil çekme prosesinde, reçine emdirilmiş liflerin, istenilen şekle dönüştürülmesi için çelik kalıplar kullanılır. Kalıpların kesitleri, uzunlukları boyunca sabittir. Kalıplar belirli bir sıcaklığa kadar reçinenin kısmen veya tamamen kür edilmesi için ısıtılırlar. Kuru liflerin aşındırıcı yapısı nedeniyle genellikle seramik rehberler kullanılır. Kalıp, hafif daralan bir girişe sahiptir. Reçine ısıtılmış kalıp içerisinden geçerken kür edilir. Kalıbın uzunluğu, reçinenin aktivitesine, parça kalınlığına ve üretim miktarı gereksinimlerine bağlıdır [14].

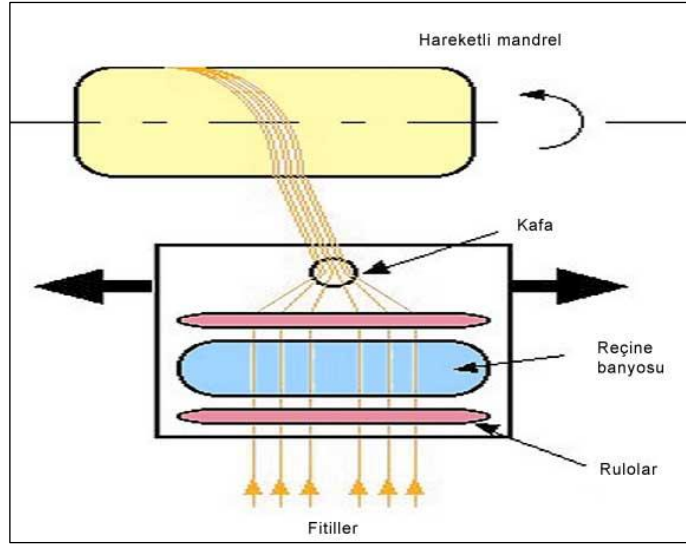


Şekil 2.4: Profil çekme yöntemi ile üretim.

Üretim karakteristiklerini, alev dayanımı gibi özellikleri geliştirmek alüminyum trihidrat, toplam maliyeti düşürmek için reçine içerisine kalsiyum karbonat, yalıtım için alüminyum silikat (kaolin kil) dolgu malzemeleri katılır [13].

2.4.4. Elyaf Sarma

Özellikle boru ve tank üretimi için kullanılan kalıplama metodudur. Sürekli cam elyafından fitillerin polyester banyosundan ıslatıldıktan sonra dönen bir kalıp üzerine belirli açılarda sarılması şeklindedir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün oda sıcaklığı veya daha yüksek sıcaklıklarda kür edilir, ardından döner kalıp ayrılır [14].



Şekil 2.5: Elyaf sarma yöntemi ile üretim.

2.4.5 Otoklav

Otoklav basıncın, ısının ve vakumun kontrol edilebildiği basınçlı bir kaptır. Bu yöntem vakum torbalama yöntemine benzemektedir. Farklı olarak dışarıdan daha fazla, düzenli ve kontrol edilebilir basınç uygulanmaktadır. Bunun için dışarıdan sıkıştırılmış gaz kompozit malzemenin bulunduğu kaba verilir. Fırın yerine otoklav kullanılır. Böylece kür şartları tam olarak kontrol edilebilmektedir [15].



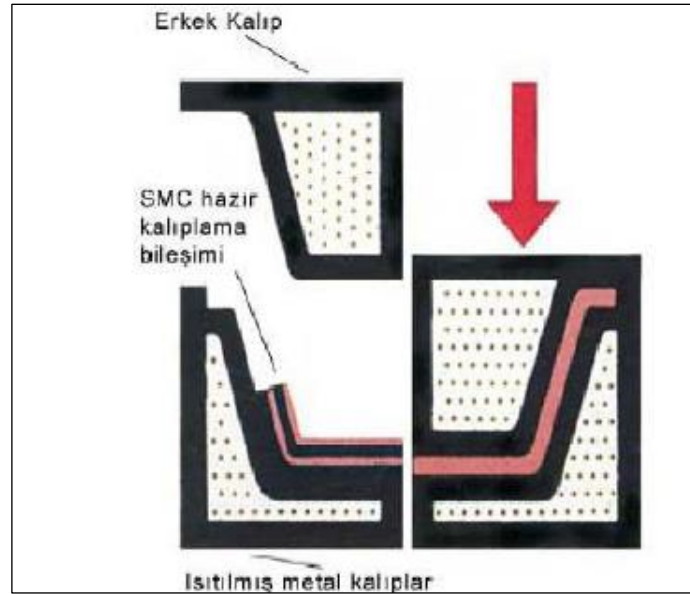
Şekil 2.6: Otoklav yöntemi ile üretim.

2.4.6. Levha Kalıplama Karışımı (SMC)

SMC yönetiminde kullanılan pestil malzemesi uygulama öncesinde kırılmış elyaf ile dolgu malzemesi içeren bir reçine ile birleştirilir. Sürekli lifler 25-50 mm uzunluğunda kırılır ve ağırlıkça %25-30 oranında kompozit malzemeye ilave edilir. Genellikle 1 m genişliğinde ve 3 mm kalınlığında üretilir.

Bu yöntemde dişili-erkekli kalıp kullanılır. Önceden hazırlanmış olan baskı kalıplama maddeleri ısıtılmış kalıp arasına yerleştirilir ve belirli bir basınçta kalıp kapatılarak dolgu malzemesine istenilen şekil verilmiş olur. Kalıp hareketiyle malzeme kalıp boşluğuna yayılır ve bu esnada malzemenin içine sıkışan havanın dışarı çıkmasını sağlar.

Kalıp malzemesi olarak çelik seçilir. Yüzey kalitesini artırmak için de kalıp yüzeyi krom ve nikelle kaplanır [7].

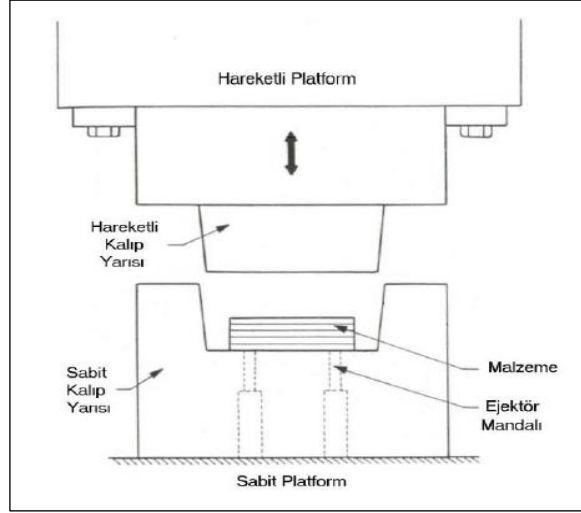


Şekil 2.7: SMC yöntemi ile üretim.

2.4.7. Yığın Kalıplama Karışımı (BMC)

BMC, kırılmış lif ve dolgu malzemesi ilave edilmiş bir reçinenin işlem öncesi birleştirilen hamur kıvamındaki malzemelerdir. Bu yapı; yüksek ısı dayanımı, mukavemet, elektriksel ve rijitlik özellikleri ile tanımlanabilir. Reçine seçiminde ayrıca korozyon, yanma ve darbe dayanımı dikkate alınmalıdır.

Yöntemin RTM'den farkı eritilmiş reçine/elyaf karışımının basınç altında kalıp içine transfer ediliyor olmasıdır. Bu yöntemde sadece viskozitesi düşük termoset reçineler kullanılabilirken diğer yöntemlere kıyasla seri üretime daha yatkındır.

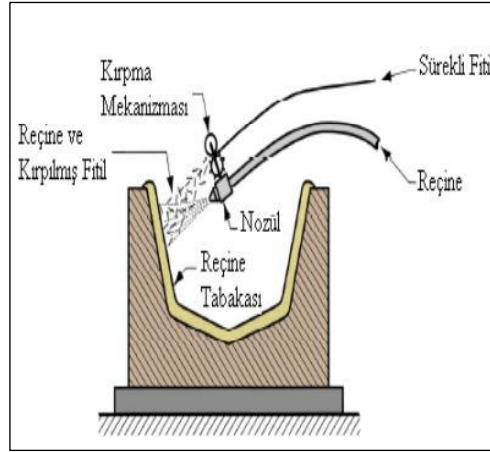


Şekil 2.8: BMC yöntemi ile üretim.

2.4.8. Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemi, elle yatırma yönteminin biraz daha geliştirilmiş halidir. El yatırması prosesi reçine ve takviye elemanları manuel olarak yapılırken bu proseste püskürtme tabancasının kullanılması emek yoğunluğunu azaltmaktadır.

Sprey tabancası, gelen elyaf şeritleri (bir veya daha çok şerit) belirlenen uzunluklarda (20-40 mm) kesilerek kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte püskürtülür. Malzeme kalıp üzerine püskürtüldükten sonra, fırça ve silindir kullanarak hem sıkışmış hava uzaklaştırılır, hem de liflerin iyi ıslatılması sağlanır. Reçine oda sıcaklığında kür edilir. Kür işleminden sonra, parça kalıptan çıkarılır. Püskürtme prosesi için kullanılan en yaygın reçine genel amaçlı polyesterdir. İsoftalik polyester ve vinil ester de bu proseste kullanılabilir. Reçine genellikle belirgin miktarda dolgu içerir. En yaygın dolgular, kalsiyum karbonat ve alüminyum trihidrat malzemelerdir. Yöntem Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Püskürtme yöntemi ile üretim.

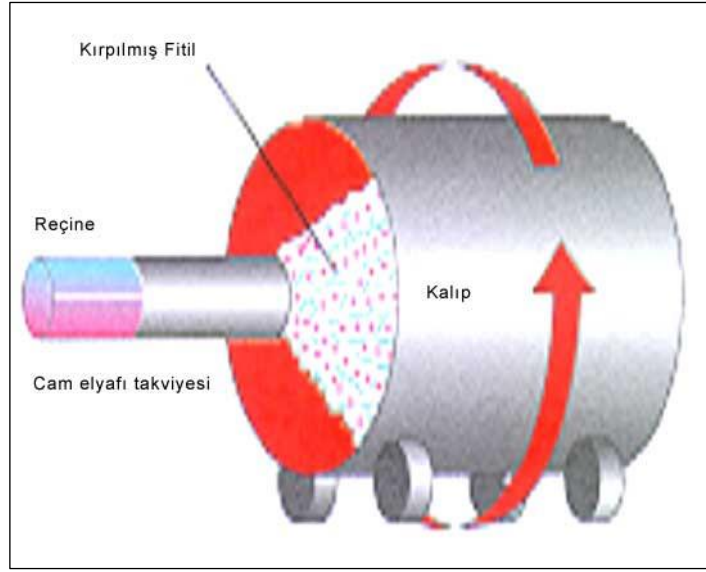
2.4.9. Enjeksiyon Kalıplama

Bu yöntemle üretimde daha çok termoplastiklerin kullanımı yaygındır ancak, termoset uygulamalarında da başarılıdır. Granül halinde termoplastik reçine ısıtılmış metal silindirin bir ucuna huni aracılığıyla beslenir. Silindir içerisinde geçirdiği sürede sıcaklığın etkisiyle reçine yarı akışkan hal alır. Silindirin ileri-geri hareketi, reçinenin şekillendirilmesine, reçine miktarının ölçümüne, enjeksiyon sırasında kapalı kalıbı basınç altında tutmaya ve soğutmadan sonra parçanın kalıptan çıkmasını sağlar.

Kalıp boşluğu üretilecek parçanın tam formunu sağlayacak şekildedir. Dişili-erkekli yani çift taraflı kalıp kullanılır. Bu sayede iki yüzü düzgün parçalar elde edilir.

2.4.10. Santrifüj Kalıplama

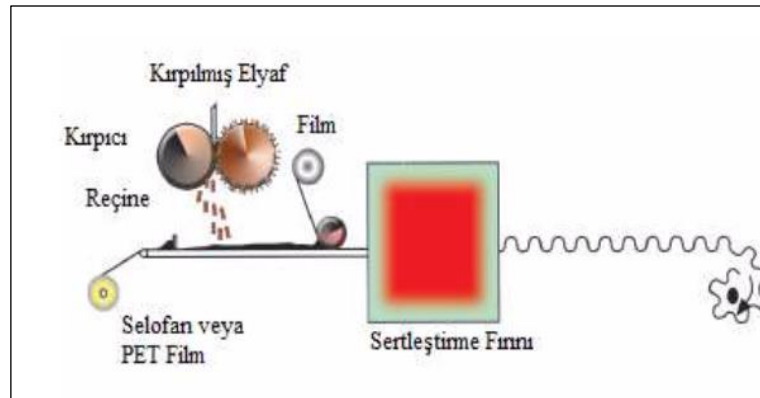
Bu kalıplama yöntemi, boru, direk, depo, tank gibi silindirik yapıların üretiminde kullanılır. İçi boş mandrel (kalıp) içerisine kırılmış matlar reçineyle birlikte püskürtülür. Yüksek bir çevresel hızla dönen kalıbın oluşturduğu merkezkaç kuvveti, reçine ile temas eden takviye malzemelerin ıslanmasını ve laminatın kalıp yüzeyine yapışmasını sağlamaktadır. Döndürmeli kalıplama yönteminde kalıp içerisindeki parça talep edilen biçimi aldığı anda, su veya soğutma sıvısı püskürtülerek ya da basınçlı hava ile kalıp soğutulur. Bazen de kalıp yarımları içerisine açılan soğutma kanallarından gönderilen sıvı ile kalıp soğutulur.



Şekil 2.10: Santrifüj kalıplama metodu ile üretim.

2.4.11. Sürekli Levha Üretim Metodu

Bu yöntemde cam elyaflı takviye malzemeleri ve polyester, taşıyıcı plastik bir film üzerine dökülür daha sonra üstte yer alan ikinci bir film tabakasıyla, karışım iki plastik tabaka arasında sıkıştırılarak çekilerek fırınlanır. İki yüzü düzgün oluklu, şeffaf veya opak levha üretimi sağlanır. Yöntemin diğer adı da sürekli çekmedir.



Şekil 2.11: Sürekli levha metodu ile üretim.

Yöntemin avantajları, düz ve oluklu panellerde seri üretim, düşük işçilik ve dolgu reçine kullanımına olanak vermesidir. En ve kalınlıkta boyut sınırlaması ise bir dezavantajdır.

3. DENEYSEL KISIM

3.1. Deney Tasarımı

Deney tasarımı, bir prosesteki girdi değişkenleri üzerinde istenilen değişikliklerin yapılmasıyla cevap değişkeni üzerindeki değişkenliğin gözlenmesi, elde edilmesi ve yorumlanması olarak da tanımlanabilir. Bağımlı faktördeki değişikliğin nedeni olarak ele alınan bağımsız faktörün etkilerinin ölçülmesi işlemini yürütmek için kullanılan tekniktir. Deney tasarımı aşağıdaki belirtilen her iki alanda da etkin olarak kullanılabilir [15].

- Ürün veya proses tasarımındaki kritik kalite problemlerin çözülmesi
- Üründeki kritik kalite problemlerinin çözülmesi

Bir ürün için kritik kalite problemi, kabul edilebilir hata oranının üzerinde ve klasik tekniklerle çözülmesi yüksek maliyetli ve zaman alan problemler olarak tanımlanabilir. Diğer bir deyişle deney tasarımı, üretim ve tasarım parametrelerinin optimizasyonudur. Uygulamada getirdikleri avantajlar aşağıdaki gibidir.

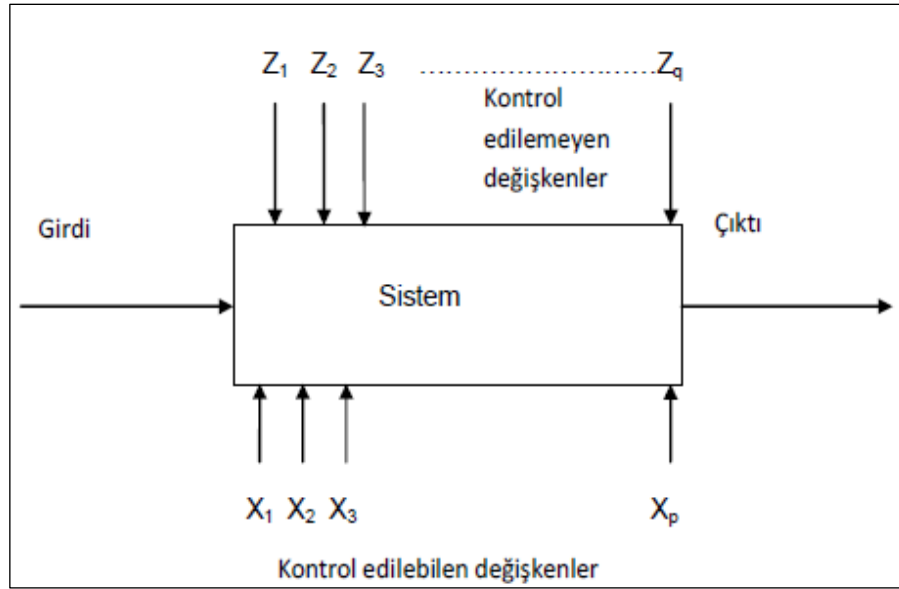
- Performans ve kalitenin artırılması
- Maliyetlerin düşürülmesi
- Araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin hızlandırılması
- Ürünün ve/veya prosesin kalite özelliklerini belirleyen değerlerin daha robust olması (kontrol edilemeyen veya edilmesi zor ve maliyetli faktörlere karşı duyarlılığının az olması)

Deney tasarımı ile değişik koşullar altında elde edilen sonuçlar aşağıdaki başlıklara ulaşabilmek amacı ile değerlendirilir.

- Ürün performansı üzerine en fazla etkisi olan faktörlerin belirlenmesi
- Ürün performansının istenilen hedef değere yakın olmasını sağlamak için etkili faktörlerin değerlerinin belirlenmesi
- Ürün performansındaki varyasyonu en az etkili faktör değerlerinin belirlenmesi

- Kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini ve en az etkili faktör değerlerinin belirlenmesi

Proses optimizasyonunda, proses değişkenlerinin tanımlanmasında ve prodesteki değişkenliğin azaltılmasında kullanılan önemli bir yöntemdir. Bir sistemin veya sürecin genel modeli Şekil 3.1’de gösterilmiştir [17]. Proses değişkenlerinden $X_1, X_2, \dots, X_p$ kontrol edilebilir değişkenler ve $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$ kontrol edilemeyen değişkenler olarak adlandırılır.



Şekil 3.1: Bir sistemin veya sürecin genel gösterimi.

Tekniğin uygulanmasındaki amaç, sağlam bir proses geliştirmektir. Asıl istenen değişkenliğin kaynağı olan, kontrol edilemeyen değişkenlerin etkisinin en az olduğu prosesi geliştirmektir.

Kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen değişkenlerin değerleri tasarımcı tarafından belirlenir. Herhangi bir parçanın boyutları, malzemesi veya bir evrenin çıkış voltajının seçimi gibi basit önlemlerle kontrol edilebilir değişkenlerdir. Ürünün kullanım ortamındaki sıcaklık, nemlilik, rüzgar, gürültü, toz, titreşim, ürün aşınması, özelliğini kaybetmesi, hammadde ve bileşenlerinin toleransındaki değişiklik vb. gibi kontrol edilmesi zor olan veya olanaklı olmayan değişkenlerdir. Bu değişkenler performans değerleri üzerinde olumsuz etkiye sahiptirler.

Bağımlı değişkenler, değerleri diğer değişkenlere bağlı olan değişkenlerdir. İlk olarak bağımlı değişkenler, sistem seviyesi ve daha alttaki birimsel seviye olmak üzere farklı alt kategorilere ayrılmalıdır. Sistem seviyesinde, sorular deneyin uygulanması ile ilgilidir. Bu seviyede deneyin gerçekleştiği durum göz önüne alınmalıdır. Sistem seviyesi değişkenleri elde edilen sonucun güvenilirliğini etkileyen veya destekleyen değişkenlerdir. Bu yaklaşımla, örneğin, deney çalışmasının belli bir bölümünün kaç kez tekrar edileceği belirlenir. Birimsel seviye daha çok ölçüm sonuçları ile ilgilidir. Birimsel seviye bağımlı değişkenleri indirgenebilir ve analiz edilebilir ölçümlere ihtiyaç duyar. Deney, aynı işlemler ve değerler sonucunda aynı sonuçları alacak şekilde tekrarlanabilir olmalıdır. Bu ise, ancak deney koşullarını ve tekrarlanabilirliğini bozacak risklerin tamamen ortadan kalkması sonrasında mümkündür. Deney sonuçları tekrarlanabilir deneysel çalışmanın verilerinden oluşmalıdır. Bağımlı değişkenler deney sonucunda yapılan ölçümlerden elde edilir. Bir deneyin sonucunda çok sayıda bağımlı değişken elde edilebilir.

Bağımsız değişkenler, deneyde manipüle edilebilen değişkenlerdir. Bağımsız değişken, çıkış değişkenini etkileyen değişkendir.

Deney tasarımı, süreci etkileyen her türlü etken “faktör” olarak adlandırılır. Bunlar çıktı üzerinde etkisi olabilecek ve deneyde incelenen girdilerdir. Faktörlerin kesitli kategorileri, dereceleri ve yoğunlukları ise “seviye” olarak adlandırılır. Bir deney tasarımı sırasında birden fazla faktör ve seviye grupları bulunabilir.

3.1.1. İstatistiksel Metotlar

İstatistiksel metotlar verilerin sonuç ve yorumlarını objektif biçimde analiz etmek için kullanılır. Elde edilen sonuçların analizinde, varyans analizi (Anova), sinyal/gürültü oranı (S/N), hesap tablosu, gözlem metodu, sıralama metodu, sütun etkileri metodu ve faktör etkilerinin grafiksel gösterimi gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Denemelerin etkili bir şekilde uygulanabilmesi için, denemenin planlamasında bilimsel bir yaklaşım tarzı kullanılmalıdır. Denemelerin istatistiksel tasarımı, deneme planlama işlemini gerçekleştirmek içindir. Böylece istatistiksel yöntemlerle analiz edilebilecek uygun veri toplanıp, geçerli ve nesnel sonuçlar sağlanır. Verilerden anlamlı sonuçlar çıkarmak için, deneysel tasarımlarda istatistiksel yaklaşım gereklidir.

Problem deneysel hatalara eğilimli veri içerdiği zaman, istatistiksel yöntemler, analiz için tek nesnel yaklaşımdır. Bu nedenle herhangi bir deneysel problem için, denemenin tasarımı ve verinin istatistiksel analizi oldukça ilgilidir. Çünkü analiz yöntemi doğrudan kullanılan tasarıma bağlıdır. Deneysel tasarımın dayandığı temel prensipler, İngiliz bilim adamı Ronald A. Fisher tarafından geliştirilmiştir. Bu prensipler “rassallık”, “tekrarlama” ve “bloklama”dır.

3.1.2. Deney Tasarımının Uygulama Aşamaları

Deney tasarımı uygulamaları yedi adımdan oluşmaktadır ve bu adımlar aşağıda açıklanmaktadır [17].

3.1.2.1. Problemin Belirlenmesi

Problemin tanımlanması kolay bir nokta gibi görünse de tasarımın en önemli adımlarından birisidir. Problemin tanımlanması için, öncelikle, deney sırasında çıktı olarak incelenecek ve ürünün kalite özelliklerini temsil eden kalite değişkeni veya değişkenlerini tanımlamak gerekir. Kalite değişkenlerinin ölçülebilir (sayısal ya da nicel) olması gerekir. Deneyin amacı ile ilgili tüm fikirler problemin belirlenmesi aşamasında ortaya konulmalıdır.

3.1.2.2. Faktör ve Seviyelerinin Belirlenmesi

Deney tasarımcısı, problemi belirledikten sonra ilk olarak oluşturacağı tasarımın sonucunu belirleyen süreci etkileyen faktörleri ve bu faktörlerin seviyelerini (derece) belirlemelidir. Seviyeler sonuç üzerindeki etkisine göre ve uygun aralıklarla seçilmelidir.

Cevap (bağımlı) değişkeninin seçimi sırasında deney tasarımcısı cevap değişkeni olarak seçtiği değişkeni, deneyin amacı hakkında kesin bilgiler verdiğine emin olması gerekir. Cevap değişkeninin nasıl ölçüleceği ve bu ölçümlerin kesinlik derecelerinin güvenilirliği konusunda dikkatli olunmalıdır. Cevap değişkeni olarak genellikle ölçülen karakteristiğin ortalaması veya standart sapması seçilir.

3.1.2.3. Çıktı Değişkeninin Seçilmesi

Çıktı değişkeninin seçilmesinde dikkat edilecek nokta, üzerinde çalışılan proses hakkında gerekli bilgiyi sağlamasıdır. Birden fazla çıktı değişkeni seçilmesi de mümkündür. 1. , 2. ve 3. adımlar deney öncesi planlama adı altında toplanırlar.

3.1.2.4. Deney Tasarımının Seçimi

İlk üç aşamayı doğru olarak yapan deney tasarımcısı ihtiyaç duyduğu bilginin çeşidine ve uygulamayı yapacağı koşullara göre deney tasarımı tekniğini seçer. Bu aşamada ilk olarak dikkat edilecek konu örnek büyüklüğü, deneylerin yapılış sırası ve tekrarlamaya sayısına bağlı olarak deneylerin maliyetini de hesaba katmaktır.

3.1.2.5. Deneylerin Yapılması

Asıl verilerin toplanacağı asamadır. Rastsallık, tekrarlamaya ve bloklama gibi deney tasarımı ilkelerine dikkat edilmelidir. Bu aşamada yapılacak deney hataları deney geçerliliğinin bozulmasına sebep olur.

3.1.2.6. Verilerin Analizi

Yapılan deneylerden elde edilen veriler çeşitli istatistiksel metotlarla bu aşamada analiz edilir. En çok kullanılan analiz yöntemleri grafiksel yöntem ve varyans analizi yöntemleridir.

3.1.2.7. Sonuç

Yapılan veri analizinden çıkan sonuçlar bu aşamada değerlendirilir. Bulunan istatistiksel sonuçlar fiziksel olarak da yorumlanabilir olmalıdır. Sonuçların güvenilirliği için bulunan sonuçlarla bir deneme testi yapılmalıdır.

Bütün bu aşamalardan sonra tasarlanan deneyin sonuçları proses veya sistem hakkında bize önemli bilgiler sunar.

3.1.3. Deneysel Tasarım Türleri

Deney tasarımının, uygulama alanına ve ihtiyaçlara göre farklı uygulanması gerektiği bilinmektedir. Bu çerçevede deney tasarımı çeşitlerini sınıflandırmak gerektiğinde bunları aşağıda gösteren belli başlı iki başlık altında toplamak mümkündür.

- Klasik deney tasarımı yaklaşımı
- İstatistiksel deney tasarımı yaklaşımı

3.2. Metod

Yapılan tez çalışmasında deneysel tasarım metodu uygulanarak RTM ile üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyen faktörler ve etki seviyelerinin belirlenmiştir.

3.2.1. Deneysel Tasarım Uygulama Aşamaları

RTM yöntemi kullanılarak üretilen CTP malzemenin mekanik özellikleri (çekme, darbe ve eğilme dayanımı) üzerinde prosesi etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve etki değerleri incelenmesidir.

Mekanik özellikleri etkileyen faktörler, kullanılan kimyasallar, üretim ortamı ve proses metodlarıdır. Üretim ortamında prosesi etkileyen en önemli iki faktör ise sıcaklık ve nemdir. Sıcaklığın yüksek reaksiyon süresini etkileyip hızlı kürleşmelere veya tersi durumda geç kürleşmelere sebep olacağı için elde edilecek son ürünün kalitesini etkilemektedir. Üretilen parça istenen niteliklere sahip olmayabilir. RTM üretim metodunda sık rastlanan bir problem olan parçada kuru (polyester nüfuz etmemesi) bölgeler oluşabilir. Bu problemin oluşmasında sıcaklık etken olduğu gibi nem de sebebiyet verebilir. Nem, elyaf ile matris bağıını bozan bir etkidir. Reçine ve elyaf arasında nem varlığıyla polimerin mekanik özelliklerinde çok yüksek oranda düşüş gözlenir. Ürün kalitesini arttırmak ve deneysel hatayı azaltmak için üretim ortamındaki sıcaklık ve nem parametrelerinin uygun şartları tespit edilmiştir. Üretim ortamının sıcaklık ve nemi için belirlenen çalışma aralığı aşağıdaki gibidir.

- Ortam sıcaklığı: Maksimum= 30 °C Minimum= 15 °C
- Ortam Nemi: Maksimum= %70 Minimum= %35

Üretilcek CTP malzemenin mekanik özellikleri üzerinde etkin olabileceği düşünülen reçine, aktivatör, dolgu malzemesi ve sertleştirici miktarları kantitatif değişkenler, cam elyafın tipi ise kategorik değişken olarak belirlenmiştir.

Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme, darbe ve eğilme dayanımı süreç çıktı değişkeni olarak seçilmiştir.

Çekme dayanımı ölçmenin amacı, üretilen numunenin maksimum çekme mukavemetinin hesaplanmasıdır. ISO 527-1’de belirtildiği gibi standartlara uygun olarak her bir test plakası için 10 adet numune hazırlanmıştır. Çekme deneylerinin yapılması için Şekil 3.2’de gösterilen DEVOTRANS G 4 model çekme cihazı kullanılmıştır. Test öncesi numunelerin kalınlık ve genişlikleri ölçülerek çekme cihazının çenelerine paralel olacak şekilde takılmış ve test hızı ayarlanmıştır. Kopma gerçekleşmeden önce görülen nokta maksimum çekme dayanımını gösteren noktadır. Cihazdan kuvvet, Newton değeri okunur ve çekme dayanımının birimi MPa olarak ifade edilir. Çekme dayanımıyla ilgili hesaplama formül 3.1’de gösterilmiştir. Formülde σ çekme dayanımını MPa cinsinden, F Newton biriminden kuvveti, mm cinsinden b numunenin dar kısmının kalınlığı ve h ise mm cinsinden numunenin genişliğini mm ifade etmektedir.

$$\sigma = \frac{F}{b \times h} \quad (3.1)$$



Şekil 3.2: Çekme dayanımı test cihazı.

Üretilen numunenin eğilme anındaki dayanımını tespit edebilmek için eğilme testi yapılmıştır. ISO 178 standartlarına göre hazırlanmış olan test çubuklarının kalınlık ve genişlik değerleri ölçülerek iki sabit mesnet arasındaki mesafe ve probun hızı ayarlanmıştır. Eğilme testi için Şekil 3.3’de gösterildiği gibi numune iki mesnetin üzerine yerleştirilirmiş ve numunenin tam ortasına yük uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı sırada numune kırılmadan önce, numunenin dayandığı maksimum eğilme gerilmesi eğilme dayanımını vermekte olup birimi MPa olarak ifade edilir. İlgili hesaplama formül 3.2’de verilmiştir. Formülde σ_f eğilme dayanımını MPa cinsinden, F Newton biriminden kuvveti, mm cinsinden b numunenin kalınlığı, L mm cinsinden mesnetler arasındaki mesafe ve h ise mm cinsinden numunenin genişliğini ifade etmektedir.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3.2)$$

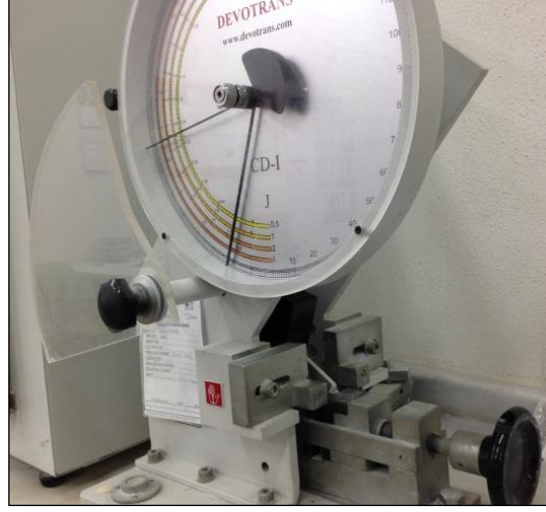


Şekil 3.3: Eğilme dayanımı test cihazı.

Numunenin darbe şartları altındaki davranışını, kırılma enerjisi veya dayanıklılığını belirlemek için darbe dayanımı testi yapılmıştır. Bu testte Şekil 3.4’de gösterildiği gibi numune cihaza dik bir şekilde yerleştirilir, yukarıdan serbest bırakılan çekiç numuneye çarpar ve numunenin kırılmasına neden olur. Bu kırılma sırasında cihaz tarafından belirlenen enerji değeri, malzemenin sönümleyebileceği maksimum enerjiyi göstermektedir. Deneylerde Izod darbe testleri yapılmıştır. ISO 180’e göre test numuneleri hazırlanan test numuneleri kalınlık ve genişlik ölçümlerinden sonra 4

Jolue Izod çekiç ile test edilmiştir. Birimi kJ/m^2 ifade edilen darbe dayanımının hesaplanmasına ilişkin formül 3.3’de verilmiştir. Formülde a_{IU} eğilme dayanımını kJ/m^2 cinsinden, E_C Joule biriminden absorblanan enerji, mm cinsinden h numunenin kalınlığı ve b mm cinsinden numunenin genişliğini ifade etmektedir.

$$a_{IU} = \frac{E_C}{hxb} \times 10^3 \quad (3.3)$$



Şekil 3.4: Darbe dayanımı test cihazı.

RTM yöntemi ile hazırlanan test plakalarından çekme, eğilme ve darbe dayanımı test edilmiştir. Test sonuçlarına göre hesaplanan değerler ile çıktı değişkeni elde edilmiştir.

3.2.2. Deney Tasarımı Seçimi

Plan oluşturma safhasında, deney planına dâhil edilecek aday noktaların tipleri (uç noktalar, orta noktalar, iç noktalar vb.) seçilmiştir. Deneysel veri seti ile model parametrenin minimum varyans ile tahminini sağlamak için değişkenler üzerindeki bütün kısıtlamalarında dikkate alındığı optimizasyon işlemi yapılarak D-optimal planı oluşturulmaktadır. Bu çalışmada kompozit malzemenin yanıt değerini etkileyen faktör veya faktörlerin tespiti için 2. mertebe D-optimal istatistiksel deney planı kullanılmıştır. Deney planı, Desing expert versiyon 7.0.0 kullanılarak oluşturulmuştur.

Planda bulunun kantitatif ve kategorik değişkenler sisteme tanıtılmış, her bir değişken için alt ve üst limit değerleri tanımlanmıştır. Deney tasarımı Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

Tablo 3.1: Deney tasarım özet bilgileri.

Deney Tasarımı Özeti	
Program Versiyonu	7.0.0.
Metot	Yanıt Yüzeyi
Deney Sayısı	35
Deney Tipi	D-Optimal
Blok	Yok
Model mertebesi	İkinci Derece

Deney planı oluşturmada önce RTM yöntemi ile üretilebilecek maksimum ve minimum kalınlık için elyaf tipi belirlenmiştir. Ayrıca çalışabilecek MEKP ve aktivatör miktarı deneme çalışmalarının sonucunda tespit edilmiştir. Deneyde kullanılabilecek maksimum ve minimum değerler Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Deney kodlanma bilgileri.

Faktör	Adı	Birim	Tipi	Alt Tür	Minimum	Maksimum
A	Aktivatör	cc	Sayısal	Sürekli	1	5,00
B	MEKP	% cc	Sayısal	Sürekli	1	4,00
C	Kalsit	g	Sayısal	Sürekli	90	376,00
D	Elyaf Tipi	-	Kategorik	Nominal	300 RTM	300 RTM +600RTM

3.2.3. Deneylerin Yapılması

Deney tasarım planına göre gerekli laminasyon şartlarında RTM yöntemi ile plakalar üretilmiştir. Deney planı Tablo 3.3’de verilmiştir.

RTM test kalıbının temizliği yapılır ve yüzey vakslanır. Jelkot miktarı 200 ± 20 g olacak şekilde ayarlanmış ve 1 cc MEKP katalizör olarak ilave edilmiştir. İçerisinde hava kabarcığı olmaması için yavaşça karıştırılarak Şekil 3.5’te gösterildiği gibi test kalıbının tek yüzeyine uygulanmıştır.



Şekil 3.5: a) Kalıbın hazırlanması, b) Jelkot uygulanması.

Kürlenme süresinin bitiminden sonra test planına göre kalıba göre kesilen elyaf Şekil 3.6'daki gibi kalıba yerleştirilmiştir.



Şekil 3.6: a) Kürlenmiş jelkotlu yüzey görünümü, b) Jelkotlu yüzeye elyaf serilmesi.

Kalsit, reçine ve %6'lık kobalt karışımı test planına göre hazırlanmıştır. RTM test kalıbına elyaf serildikten sonra kalıp kapatılarak vakum hortumları takılmış, emniyet tankı bağlanmış ve enjeksiyona hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan polyester karışımı kalıp içine enjekte edilmiş kürlenme süresi ve kalıpta kalma zamanının bitiminden sonra parça test kalıbından çıkarılmıştır. 90 °C'deki fırında 2 saat fırınlanmıştır. Bu işlem deney planındaki tüm laminasyon şartları için tekrarlanmıştır.



Şekil 3.7: a) Kürlenme sonrası parça görünümü, b) Parçanın kalıptan parçanın çıkarılması.

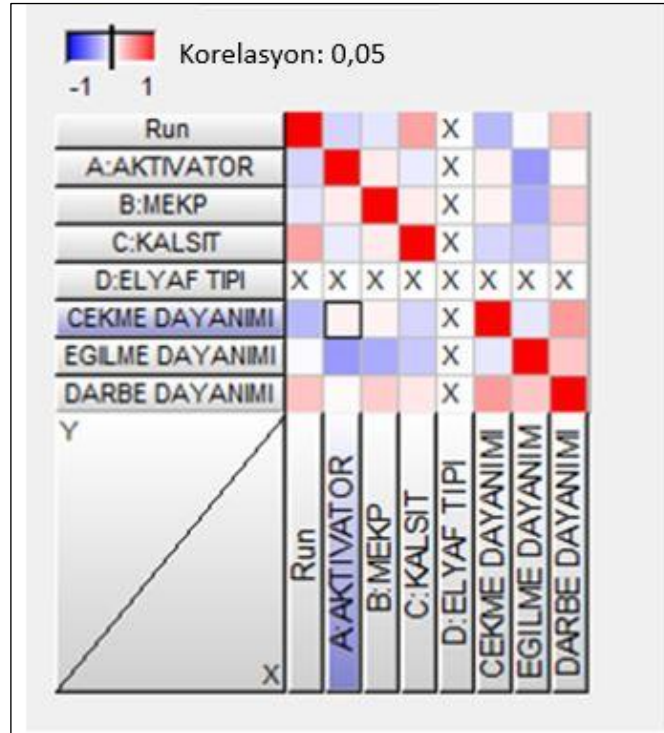
Tablo 3.3: Deney planı.

Deney Numarası	Aktivatör cc	MEKP cc	Kalsit g	Elyaf Tipi
1	5	1	90	600 RTM +300 RTM
2	1	1	233	300 RTM +450 RTM
3	5	4	233	300 RTM +450 RTM
4	5	1	90	600 RTM +300 RTM
5	5	4	376	300 RTM
6	1	4	90	300 RTM +450 RTM
7	3	1	90	450 RTM
8	5	2,5	90	300 RTM +450 RTM
9	5	2,5	233	600 RTM
10	1	2,5	90	600 RTM
11	5	4	376	600 RTM +300 RTM
12	1	4	376	300 RTM +450 RTM
13	3	1	90	450 RTM
14	1	4	233	450 RTM
15	5	4	90	450 RTM
16	1	1	90	300 RTM
17	1	4	90	300 RTM
18	5	1	90	600 RTM
19	5	4	376	600 RTM
20	1	4	376	600 RTM +300 RTM
21	1	1	376	600 RTM
22	3	2,5	233	300 RTM
23	1	1	376	450 RTM
24	1	1	376	600 RTM +300 RTM
25	3	4	90	600 RTM
26	1	1	233	300 RTM +450 RTM
27	5	1	376	300 RTM +450 RTM
28	1	1	376	600 RTM
29	1	1	376	300 RTM
30	1	4	90	300 RTM +450 RTM
31	1	2,5	233	600 RTM +300 RTM
32	5	4	376	600 RTM +300 RTM
33	3	4	376	450 RTM
34	5	1	376	450 RTM
35	5	1	90	300 RTM

3.2.4. Verilerin Analizi

İkinci derece yanıt yüzeyi yöntemi kullanılarak Desing expert 7.0.0 paket programı ile 35 adet denemeyi içeren deney planı hazırlanmıştır. Deney planı, RTM prosesini etkileyen faktörlerin maksimum ve minimum belirlenen değerleri esas alınarak oluşturulmuştur. Kalıp ölçülerine göre elyaf tipine ait maksimum değer belirlenmiştir. En fazla 5 mm CTP levha üretilebilen test kalıbında kalsit miktarı, enjeksiyon makinesin kullanım kapasitesine göre ayarlanmıştır. MEKP için sınır değerler belirlenirken çalışma sıcaklıkları esas alınmıştır. Sıcaklık artışı kürlenme süresini kısalttığı için üst sıcaklık değerinde en yüksek MEKP denemesine göre belirlenmiştir. MEKP belirlenirken eş zamanlı olarak kullanılan aktivatörün de maksimum ve minimum değerleri tespit edilmiştir.

Deney planında 3 adet sayısal ve 1 adet kategorik değişken incelenmiştir. Yanıt değişkeni olarak çekme, darbe ve eğilme mukavemet değerleri test edilmiştir.



Şekil 3.8: Bağımlı bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimler.

Deney planında kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimler Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Pozitif korelasyon kırmızı ve negatif

korelasyon -1 olarak gösterilmiştir. Deney çalışmasında gösterilen faktörler Şekil 3.8’deki gibi birbirleriyle ilişkili olmadığı görülmüştür.

Deney planına göre üretilen plakalarda çekme, darbe ve eğilme dayanım testleri yapılmıştır. Test sonuçları deneysel tasarımın cevapları yani ‘response’ tasarım bölümüne eklenmiştir. Desing Expert programında değerlendirme sekmesinde değişkenlerin birbirleriyle etkileşimleri incelenmiştir. Tablo 3.4’de bağımsız değişkenlerin tasarım özet bilgilerini içermektedir.

Tablo 3.4: Tasarım özet tablosu.

Faktör	İsim	Birim	Tip	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
A	Aktivatör	cc	Sayısal	1	5	2,885	1,848
B	MEKP	%	Sayısal	1	4	2,414	1,386
C	Kalsit	g	Sayısal	90	376	233	127,90
D	Elyaf Tipi	1	Kategorik	1	5	Seviye	5

Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler Desing Expert 7.0.0 istatistiksel paket programı kullanılarak yüzey yanıt modeli ile analiz edilmiştir.

Hiç bir dönüşüm olmadan ($y'=y$), karekök, logaritma, ters, karekökü vb. dönüşümler uygulanarak her bir cevap için uygun model tespit edilmiştir. Modele uygun fonksiyon için anova analizi yapılmıştır. İstatistiksel olarak anlamlı parametreler ve model seçimi yapılmıştır. Model seçiminde R^2 ve düzeltilmiş R^2 değerleri kıyaslanmıştır. Artık analizi yapılarak nihai model seçimi yapılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Çekme Dayanımı

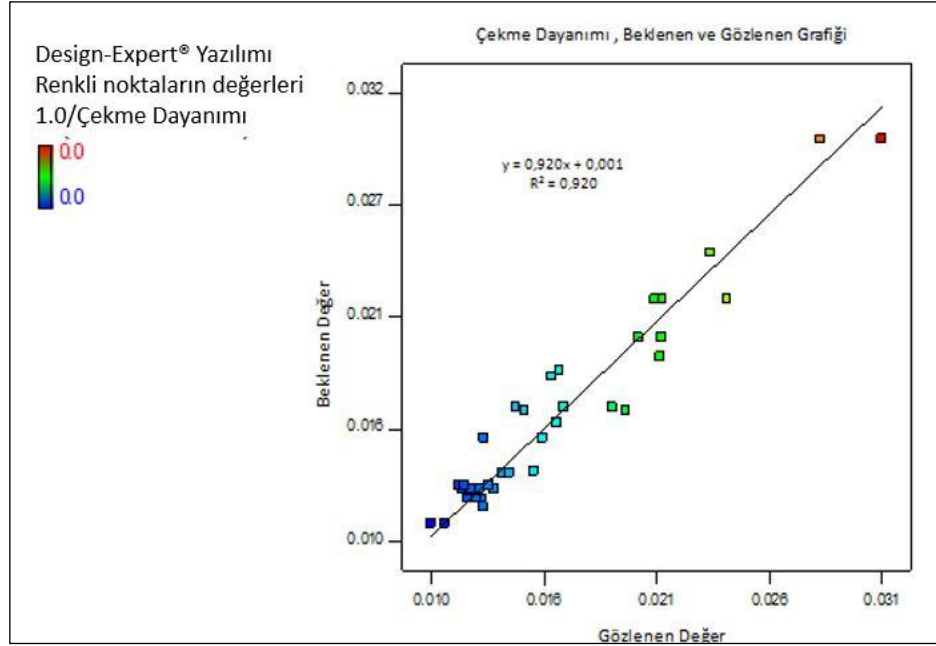
Çekme dayanımına ait regresyon model listesi Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Çekme dayanımı regresyon model listesi.

Model	Dönüşüm	R ²	Düzeltilmiş R ²	Model	Etkili Parametre	Tahmin Edilen R ²
1	Ters	0,930	0,896	İkinci Derece	A p: 0,957 C p: 0,0002 D p: <0,0001 CD p:0,0215 A ² p: 0,0928 C p:0,0001 D p<0,0001 CD p:0,0323	0,814
2	Ters	0,920	0,891	2FI	C-D	0,838
3	Karekök	0,907	0,891	Lineer	C-D	0,864
4	Yok	0,906	0,889	Lineer	C-D	0,863
5	Doğal logaritma	0,904	0,887	Lineer	C-D	0,858

Verilere uygun modelin seçilmesi için R² değerleri hesaplanmıştır. R² değeri 0,90-0,94 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Çekme dayanımı için oluşturulan modelin, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasında modelin yüksek bir doğrulukta ifade ve deneysel çalışmanın kendi aralarında tutarlı olduğunu göstermektedir. Çekme dayanımı üzerindeki değişimin birinci modelde %93, ikinci modelde ise %92’si bağımsız değişken ile birlikte açıklanabilir. Şans eseri açıklanan değişimin neden olduğu bir hatanın çıkarıldığı durum düzeltilmiş R² değeridir.

Modelde düzeltilmiş R^2 değerleri birlikte incelendiğinde ise üçüncü model daha uygundur.



Şekil 4.1: Çekme dayanımı birinci model beklenen ve gözlenen değerler.

Çekme dayanımı için ilk üç modele ait beklenen ve gözlenen değer grafikleri ile R^2 değerleri incelenmiştir. Her üç model türünde beklenen ve gözlenen değer grafikleri üzerinde hesaplanan en büyük R^2 değerinin en yüksek çıktığı Şekil 4.1’de da gösterilen, birinci model eğiliminde olduğu görülmüştür. Çekme dayanımı için en uygun model ters dönüşüm ikinci derecedir.

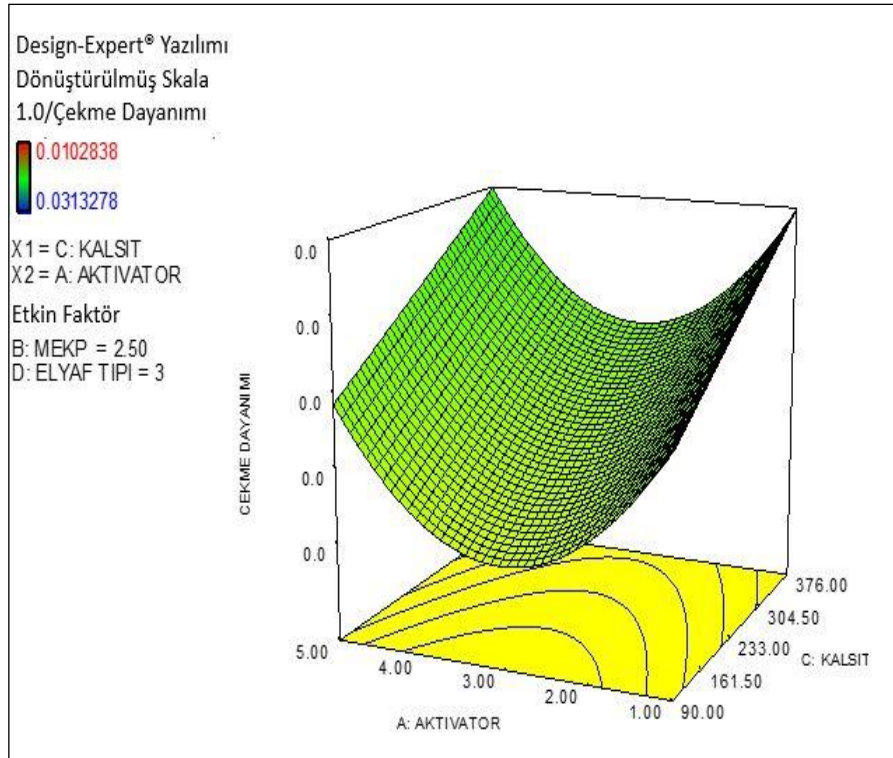
Tablo 4.2: Çekme dayanımı p değeri istatistiksel tablosu.

Model	p-değeri
A-Aktivatör	0,9579
C-Kalsit	0,0002
D-Elyaf Tipi	<0,0001
CD	0,0215
A ²	0,0928

Anlamlılık seviyesi %5 alındığı durumda etkili parametreler incelenmiştir. anova hesaplamalarında kullanılan p değeri (p value) her bir bağımsız değişkenin

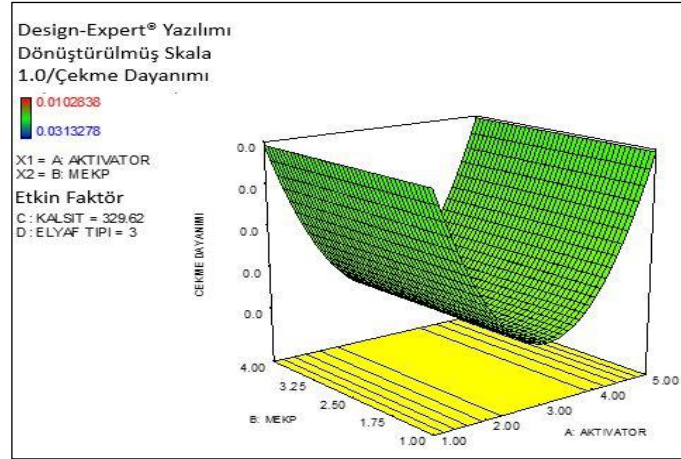
model için önemini belirtmektedir. $p>0,05$ ise bağımsız değişkenin model üzerinde büyük bir etkiye sahip olmadığını ve $p<0,05$ olduğu durumda ise bağımsız değişkenin model üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Birinci model için C: kalsit miktarı ve D: elyaf, CD: kalsit ve elyaf tipi arasındaki etkileşim tipi model üzerinde etkilidir.

%10 anlam seviyesinde incelediğinde ise A² aktivatör ikinci dereceden değişimi de etkili parametre olmaktadır.

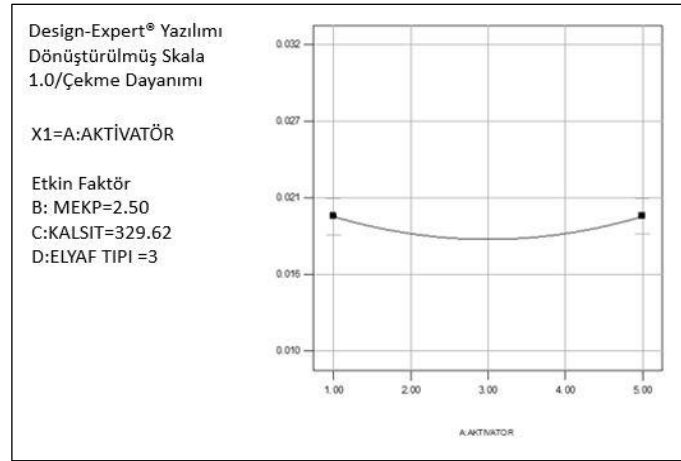


Şekil 4.2: Çekme dayanımı, kalsit-aktivatör faktörleri arası etkileşim.

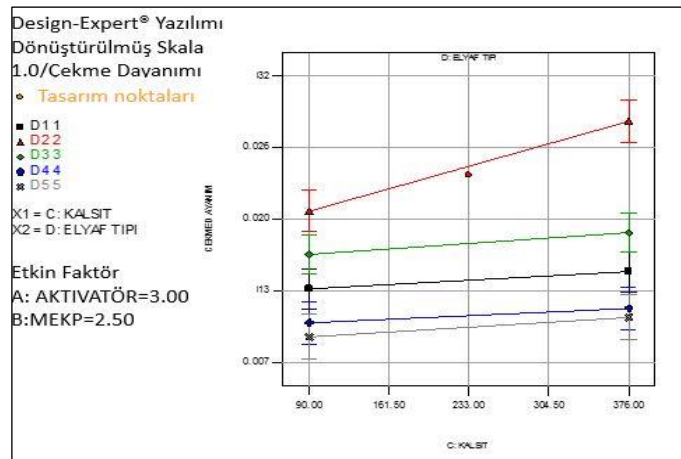
Şekil 4.2 ve Şekil 4.5 arasında etkili parametrelerin etkileşimlerine ait grafikler verilmiştir. Grafik incelendiğinde kalsit miktarı artışı ile çekme dayanımı azalmıştır. Kalsit miktarı 233 g olduğu durumda çekme dayanımında en iyi sonuç elde edildiği gözlemlenmiştir. Aktivatör miktarının 1 cc' den 3 cc' ye kadar kullanılması durumunda artma gözlenirken, 3 cc' den 5 cc' ye kullanılması durumunda ise azalma gözlenmiştir. Farklı kalsit kullanımlarında en düşük çekme dayanımı 450 RTM elyaf kullanıldığı durumda elde edilirken elyaf miktarının artması ile çekme dayanımı artma eğilimindedir. En yüksek dayanım 300 RTM+600 RTM kullanıldığında elde edilir. MEKP kullanımı çekme dayanımı üzerinde etkili parametre olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.3: Çekme dayanımı, aktivatör-MEKP faktörleri arası etkileşim.



Şekil 4.4: Çekme dayanımı aktivatör faktörü etkisi.



Şekil 4.5: Çekme dayanımı, kalsit elyaf tipi faktörleri arası etkileşim.

300 RTM (tip 1) elyaf için eşitlik (4.1)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$1/\zeta D = 16,6.10^{-3} - (2,5.10^{-3}x A) + (0,1.10^{-4}xC) + (0,4.10^{-3}x A^2) \quad (4.1)$$

450 RTM (tip 2) elyaf için eşitlik (4.2)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$1/\zeta D = 21,4.10^{-3} - (2,5.10^{-3}x A) + (0,3.10^{-4}xC) + (0,4.10^{-3}x A^2) \quad (4.2)$$

600 RTM (tip 3) elyaf için eşitlik (4.3)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$1/\zeta D = 19,5.10^{-3} - (2,5.10^{-3}x A) + (0,1.10^{-4}xC) + (0,4.10^{-3}x A^2) \quad (4.3)$$

300 RTM+450 RTM (tip 4) elyaf için eşitlik (4.4)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$1/\zeta D = 137,4.10^{-4} - (24,5.10^{-4}x A) + (0,4.10^{-5}xC) + (0,4.10^{-3}x A^2) \quad (4.4)$$

300 RTM+600 RTM (tip 5) elyaf için eşitlik (4.5)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$1/\zeta D = 12,4.10^{-3} - (2,5.10^{-3}x A) + (0,1.10^{-4}xC) + (0,4.10^{-3}x A^2) \quad (4.5)$$

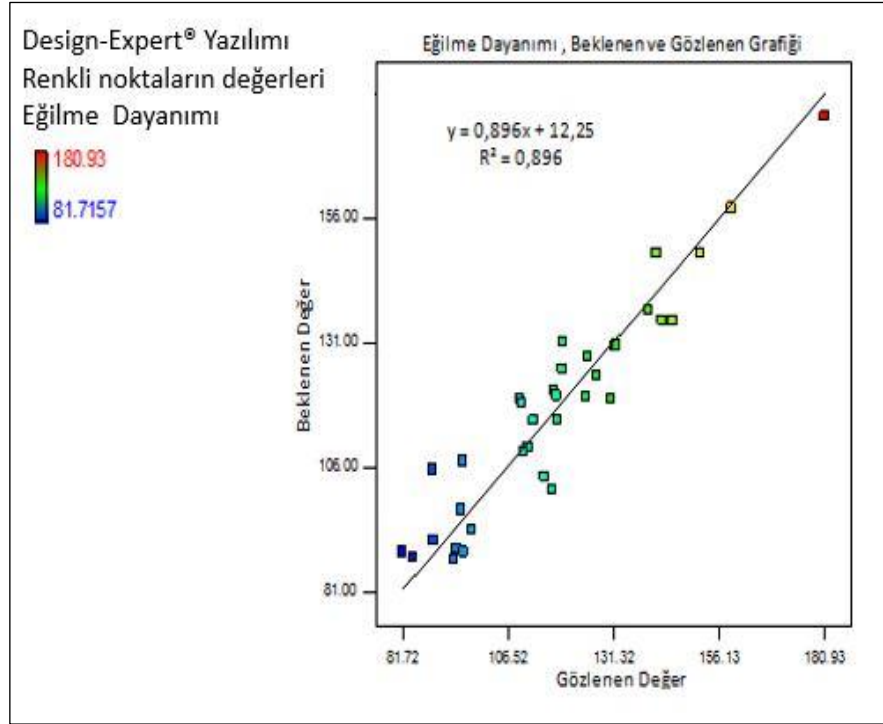
4.2. Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı için model analizi yapılmıştır. Tablo 4.3'de verilen model analizi incelendiğinde regresyon analizi sonuçlarına göre R^2 0,88-0,90 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı için oluşturulan modelin, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasında modelin yüksek bir doğrulukta ifade ve deneysel çalışmanın kendi aralarında tutarlı olduğunu göstermektedir. Eğilme dayanımı üzerindeki değişimin birinci modelin %89,6, ikinci modelin ise %89,1'i bağımlı değişken ile birlikte açıklanabilir. Eğilme dayanımı için önerilen en yüksek R^2 önerilen 4 modelde model fonksiyonu ikinci dereceden önerdiği görülmüştür. Modelde düzeltilmiş R^2 değerleri birlikte incelendiğinde ise birinci model daha uygundur.

Tablo 4.3: Eğilme dayanımı regresyon model listesi.

Model	Dönüşüm	R ²	Düzeltilmiş R ²	Model	Etkili Parametre	Tahmin Edilen R ²
1	Yok	0,896	0,832	Karesel	A p:<0,0001 B p:0,0012 C p:0,0073 D p:<0,0001 C ² p:0,0003 AD p: 0,0033	0,715
2	Karekök	0,891	0,824	Karesel	A p:<0,0001 B p:0,0011 C p:0,0057 D p:<0,0001 AD p: 0,0061 C ² p:0,0004	0,704
3	Doğal logaritma	0,885	0,814	Karesel	A p:0,0002 B p:0,0048 C p:0,0002 D p:<0,0001 AB p:0,0287 C ² p:0,0025	0,687
4	Temel 10 logaritma	0,885	0,814	Karesel	A p:<0,0001 B p:0,0012 C p:0,0047	0,687

Eğilme dayanımı için ilk iki modele ait beklenen ve gözlenen değer grafikleri ile R² değerleri incelenmiştir. İki model için beklenen ve gözlenen değer grafikleri üzerinde hesaplanan en büyük R² değerinin en yüksek çıktığı Şekil 4.6'da gösterilen, birinci model eğiliminde olduğu görülmüştür. Eğilme dayanımı için en uygun model dönüşüm olmadığı ikinci derecedir.

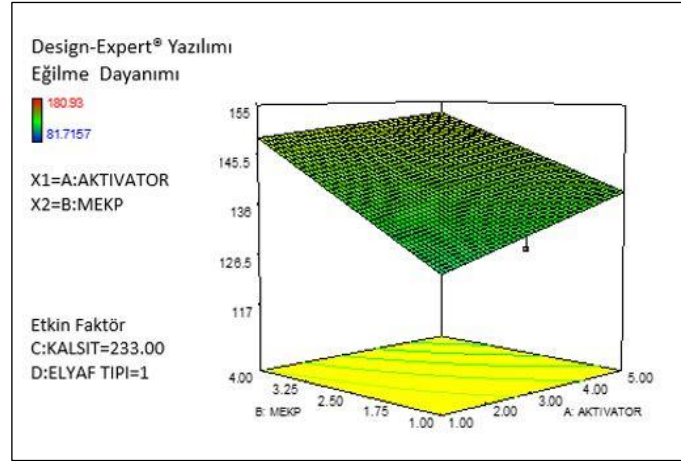


Şekil 4.6: Eğilme dayanımı birinci model beklenen ve gözlenen değerler.

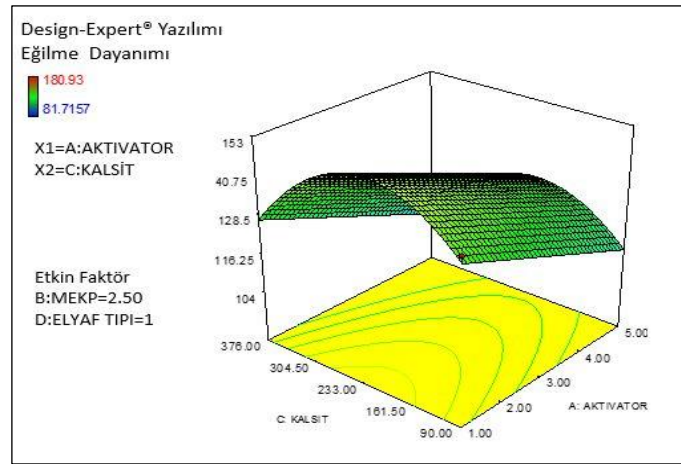
Birinci model için istatistiksel Tablo 4.4 incelendiğinde %5 anlamlılık seviyesinde A: aktivatör, B: MEKP, C: kalsit miktarı, D: elyaf tipi, AD: aktivatör ve elyaf tipi arasındaki etkileşim ve kalsitin ikinci dereceden değişimi model üzerinde etkili parametrelerdir. Deneysel tasarım aşamasında seçilen tüm bağımsız değişkenler eğilme dayanımı etkilediği görülmüştür.

Tablo 4.4: Eğilme dayanımı p değeri istatistiksel tablosu.

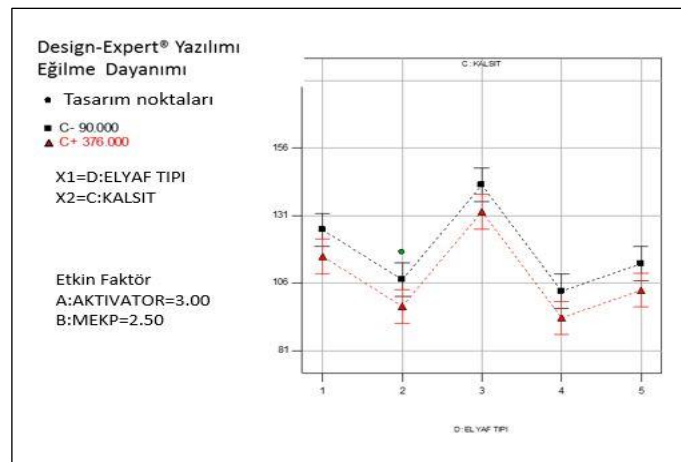
Model	p-değeri
Aktivatör	<0,0001
B-MEKP	0,0012
C-Kalsit	0,0073
D-Elyaf Tipi	<0,0001
AD	0,0033
C ²	0,0003



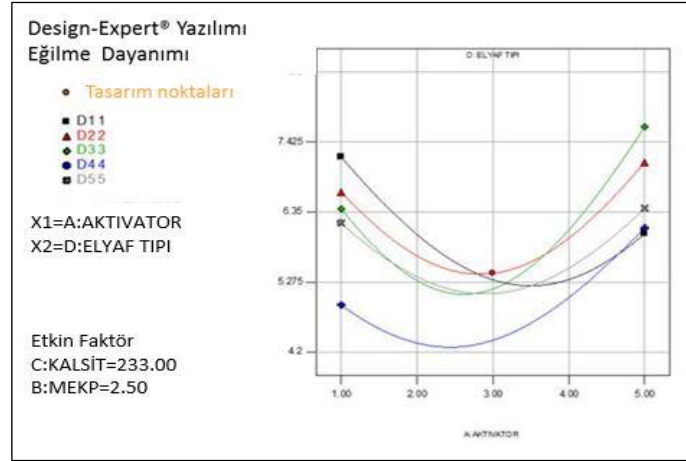
Şekil 4.7: Eğilme dayanımı, aktivatör-MEKP faktörleri arası etkileşim.



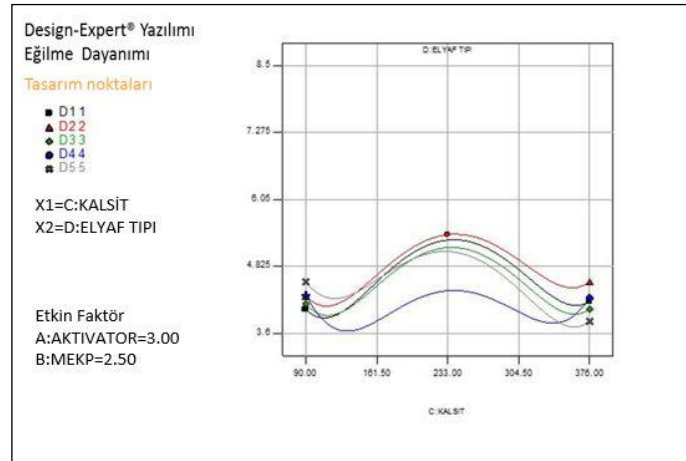
Şekil 4.8: Eğilme dayanımı, aktivatör-kalsit faktörleri arası etkileşim.



Şekil 4.9: Eğilme dayanımı, elyaf tipi-kalsit faktörleri arası etkileşim.



Şekil 4.10: Eğilme dayanımı, elyaf tipi-aktivatör faktörleri arası etkileşim.



Şekil 4.11: Eğilme dayanımı, elyaf tipi-kalsit faktörleri arası etkileşim.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.11 arasında etkili parametrelerin etkileşimlerine ait grafikler incelendiğinde aktivatör ve MEKP miktarlarının artışı ile azalma eğilimindedirler. % 23 kalsit kullanıldığı durumda maksimum eğilme dayanımı gözlenmiştir. Tüm elyaf tipleri için minimum ve maksimum kalsit kullanıldığı durum incelendiğinde tüm elyaf tiplerinde yüksek kalsit kullanımı ile eğilme dayanımı azalma eğilimindedir. En iyi eğilme dayanımı 600 RTM elyaf kullanıldığında elde edilmiştir. Elyaf tipleri aktivatör miktarı ile etkileşimli olduğu için eğilme dayanımı değerleri farklılık göstermektedir.

Eğilme dayanımı için en uygun model seçilen dönüşümün olmadığı ve ikinci derece fonksiyona ait her bir elyaf tipi için denklemler oluşturulmuştur.

300 RTM (tip 1) elyaf için eşitlik (4.6)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$ED = 116,384 - (2,753xA) - (0,679xB) + (0,406xC) - (1,255xAB) - (0,9.10^{-3}xC^2) \quad (4.6)$$

450 RTM (tip 2) elyaf için eşitlik (4.7)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$ED = 76,03 - (4,534xA) - (0,679xB) + (0,404xC) - (1,255xAB) - (0,9.10^{-3}xC^2) \quad (4.7)$$

600 RTM (tip 3) elyaf için eşitlik (4.8)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$ED = 149,26 - (8,174xA) - (0,679xB) + (0,404xC) - (1,255xAB) - (0,9.10^{-3}xC^2) \quad (4.8)$$

300 RTM+450 RTM (tip 4) elyaf için eşitlik (4.4)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$ED = 99,04 - (4,555xA) - (0,679xB) + (0,404xC) - (1,255xAB) - (0,9.10^{-3}xC^2) \quad (4.9)$$

300 RTM+600 RTM (tip 5) elyaf için eşitlik (4.8)'deki denklem oluşturulmuştur.

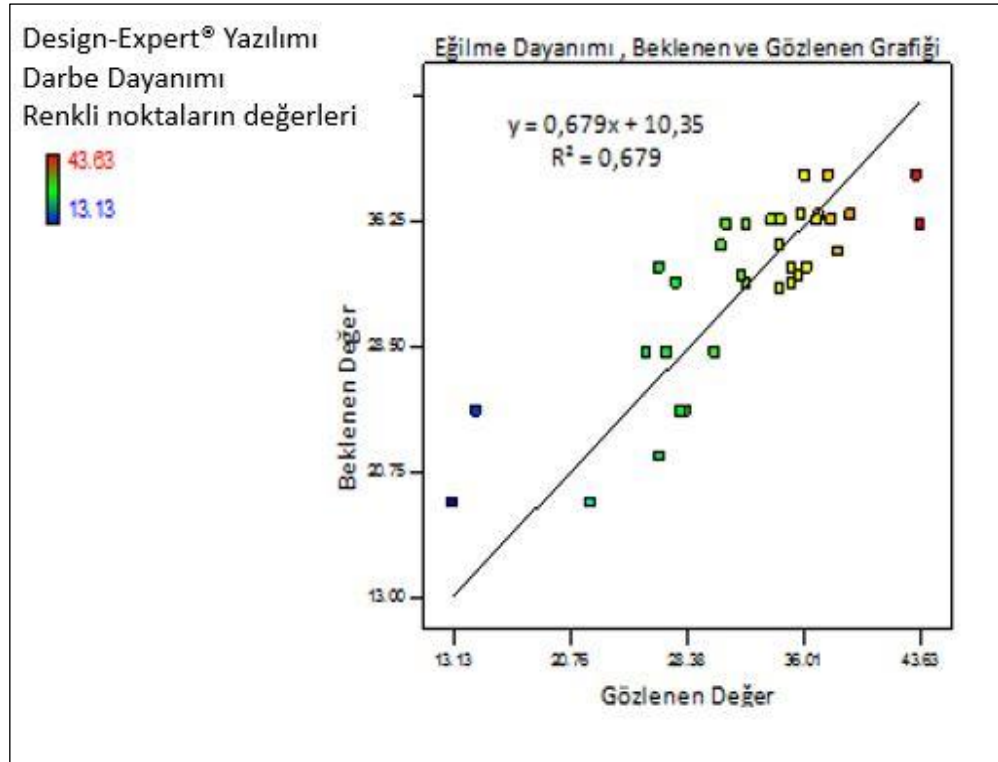
$$ED = 191,90 - (1,223xA) - (0,679xB) + (0,404xC) - (1,255xAB) - (0,9.10^{-3}xC^2) \quad (4.10)$$

4.3. Darbe Dayanımı

Darbe dayanımı için yapılan model analizi ise Tablo 4.5'de verilmiştir. Regresyon model listesine göre R^2 değeri 0,68-0,90 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Darbe dayanımı için oluşturulan modelin, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasında modelin yüksek bir doğrulukta ifade ve deneysel çalışmanın kendi aralarında tutarlı olduğunu göstermektedir. Darbe dayanımı üzerindeki değişimin birinci modelin %68, ikinci modelin %67 ve dördüncü modelde %88'si bağımsız değişken ile birlikte açıklanabilir. Modelde düzeltilmiş R^2 değerleri birlikte incelendiğinde ise dördüncü model daha uygundur.

Tablo 4.5: Darbe dayanımı regresyon model listesi.

Model	Dönüşüm	R ²	Düzeltilmiş R ²	Model	Etkili Parametre	Tahmin Edilen R ²
1	Yok	0,679	0,564	2FI	D p:<0,0001 B p:0,1688 B p:0,2637	0,330
2	Karekök	0,674	0,556	2FI	D p:<0,0001 BD p:0,0921	0,299
3	Doğal Logaritma	0,540	0,478	Lineer	D p:<0,0001	0,355
4	10 Tabanlı Logaritma	0,885	0,814	Karesel	D p:<0,0001	0,358



Şekil 4.12: Darbe dayanımı birinci m6odele ait beklenen ve gözlenen değerler.

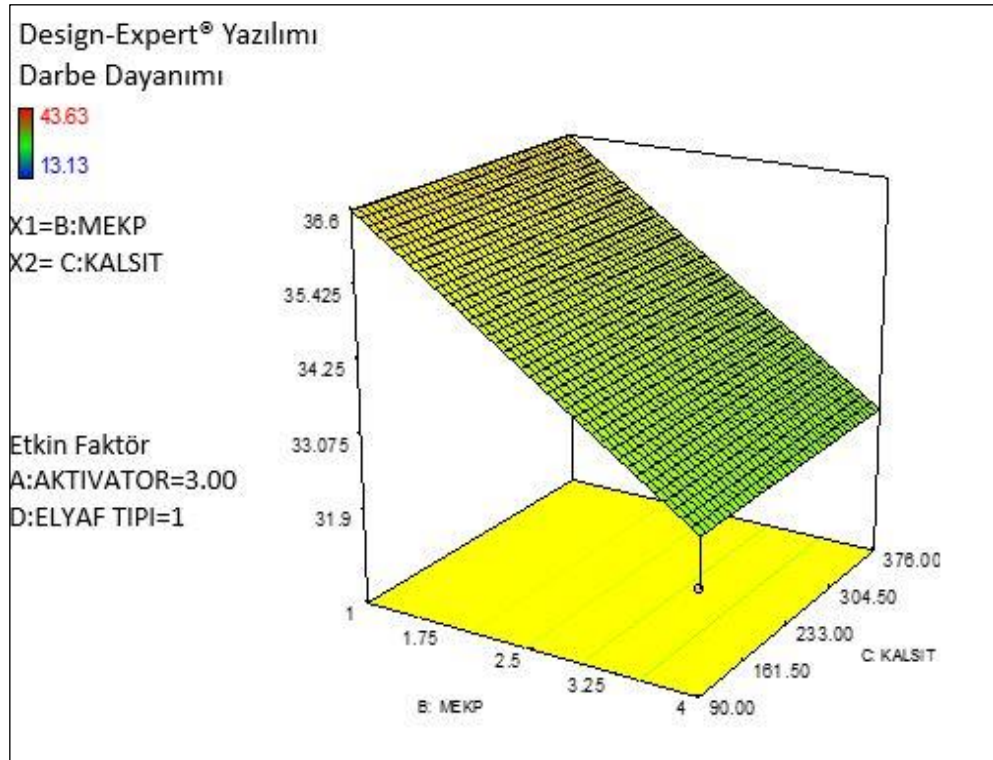
Darbe dayanımı için ilk iki ve dördüncü modele ait beklenen ve gözlenen değer grafikleri ile R^2 değerleri incelenmiştir. Beklenen ve gözlenen değer grafikleri üzerinde hesaplanan en büyük R^2 değerinin en yüksek çıktığı Şekil 4.12’de gösterilen, birinci model eğiliminde olduğu görülmüştür. Darbe dayanımı için en uygun model dönüşüm olamadığı iki faktörlü etkileşimdir.

Tablo 4.6: Darbe dayanımı p değeri istatistiksel tablosu.

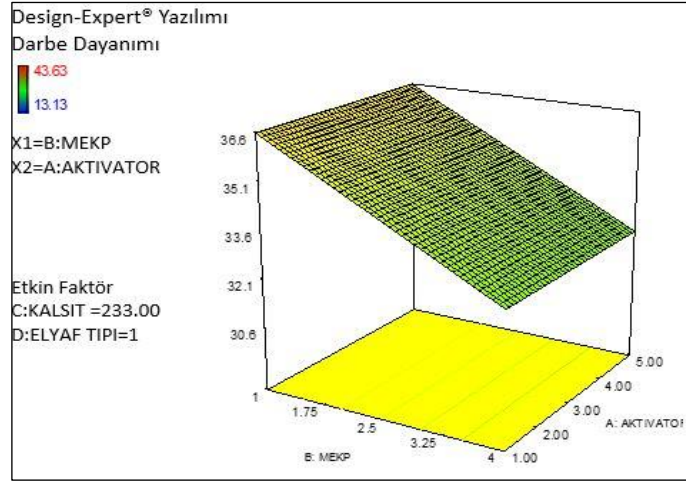
Model	p-Değeri
B-MEKP	0,1688
D-Elyaf Tipi	<0,0001
BD	0,0692

%5 anlamlılık seviyesinde (%95 güven altında) etkili parametreler incelenmiştir. D: elyaf tipi model üzerinde etkili parametredir. %90 güven aralığında ise BD: MEKP ile elyaf tipinin etkileşimi etkili parametre olmaktadır.

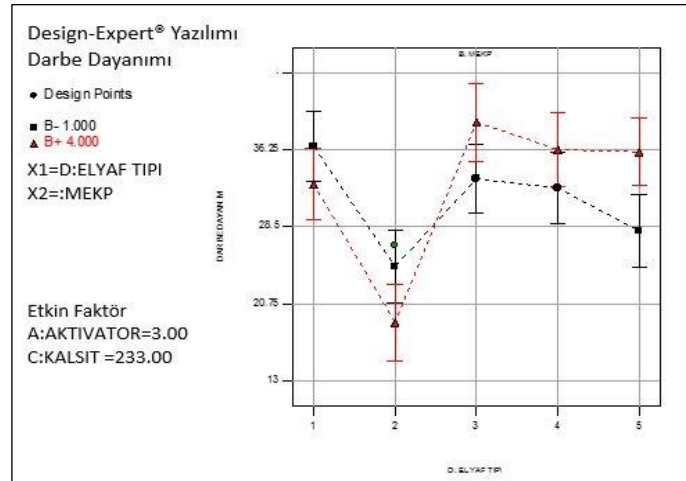
Şekil 4.13 ve Şekil 4.15 arasında etkili parametrelerin etkileşimlerine ait grafikler verilmiştir. Kalsit-aktivatör miktarı darbe dayanımı üzerinde etkili olmadığı görülmüştür. MEKP miktarı azaldıkça darbe dayanımı artmıştır En yüksek darbe dayanımı 600 RTM elyaf kullanıldığı durumda elde edilmiştir. Elyaf miktarı 600 RTM' den fazlası kullanıldığı durumda darbe dayanımı azalmaktadır.



Şekil 4.13: Darbe dayanımı, kalsit-MEKP faktörleri arası etkileşim.



Şekil 4.14: Darbe dayanımı, aktivatör-MEKP faktörleri arası etkileşim.



Şekil 4.15: Darbe dayanımı, elyaf tipi-MEKP faktörleri arası etkileşim.

Darbe dayanımı için en uygun model seçilen dönüşümün olmadığı ve iki faktör etkileşimin fonksiyona ait her bir elyaf tipi için denklemler oluşturulmuştur.

300 RTM (tip 1) elyaf için eşitlik (4.11)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$DD = 37,862 - (1,267xB) \quad (4.11)$$

450 RTM (tip 2) elyaf için eşitlik (4.12)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$DD = 26,360 - (1,877xB) \quad (4.12)$$

600 RTM (tip 3) elyaf için eşitlik (4.13)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$DD = 26,360 - (1,877xB) \quad (4.13)$$

300 RTM+450 RTM (tip 4) elyaf için eşitlik (4.14)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$DD = 31,092 - (1,294xB) \quad (4.14)$$

300 RTM+600 RTM (tip 5) elyaf için eşitlik (4.15)'deki denklem oluşturulmuştur.

$$DD = 25,441 - (2,646xB) \quad (4.15)$$

4.4. Optimizasyon Çalışması Sonuçları

Seçilen üç adet sayısal ve bir adet kategorik değişken için yapılan istatistiksel çalışma sonucunda uygun modeller seçilmiştir. Model analizi verilen Tablo 4.7 incelendiğinde çekme ve darbe dayanımı için model ikinci dereceli fonksiyon olduğu gözlenirken eğilme dayanımı için de iki faktöriyel etkileşimli fonksiyon olduğu görülmüştür.

Optimizasyon çalışmasında yanıt değerlerin maksimum olduğu şartlar incelenmiştir. Bağlı değişkenler ise deney tasarımında belirlenen alt ve üst limit değerlerinde tutulmuştur.

Tablo 4.7: Model analiz tablosu.

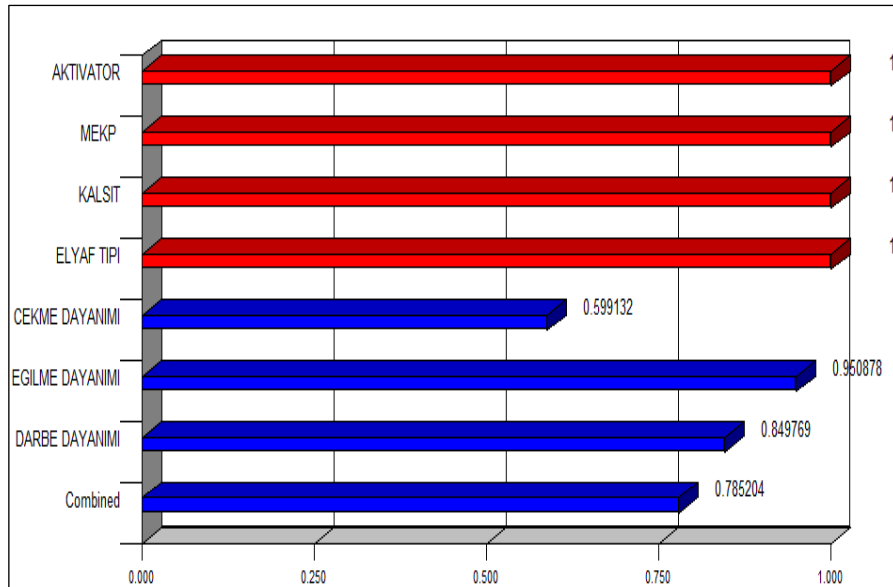
Yanıt Türü	Çekme Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Darbe Dayanımı
Birim	MPa	MPa	kJ/m^2
Deney Sayısı	35	35	35
Minimum	31,9	81,72	13,13
Maksimum	97,2	180,93	43,63
Ortalama	66,15	117,95	32,25
Standart Sapma	16,95	22,58	6,67
Oran	3,05	2,21	3,32
Fonksiyon	Tersi	Yok	Yok
Model	2. Derece	2. Derece	2FI

Tablo 4.8’de optimizasyon kriterlerine göre analiz yapılmıştır. Eğilme, darbe ve çekme dayanımım için maksimum değerin sağlandığı durumlar istenmektedir.

Tablo 4.8: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon kriterleri.

Parametre	Amaç	Düşük Limit	Yüksek Limit	Düşük Ağırlık	Yüksek Ağırlık	Önem
Aktivatör	Aralık içinde	1	5	1	1	3
MEKP	Aralık içinde	1	4	1	1	3
Kalsit	Aralık içinde	90	376	1	1	3
Elyaf Tipi	Aralık içinde	1	5	1	1	3
Çekme Dayanımı	Maksimum değer	31,92	97,24	1	1	5
Eğilme Dayanımı	Maksimum değer	80	180,93	1	1	5
Darbe Dayanımı	Maksimum değer	13	43,63	1	1	5

Bu koşullar altında yapılan optimizasyon çalışması Şekil 4.16 incelendiğinde çekme dayanımı için 0,599 eğilme dayanımı için 0,950 ve darbe dayanımı için de 0,849 istenirlik olduğu görülmüştür. Modelin istenirlik ise 0,785’dir.



Şekil 4.16: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon çalışması sonrasında istenirlik değerleri.

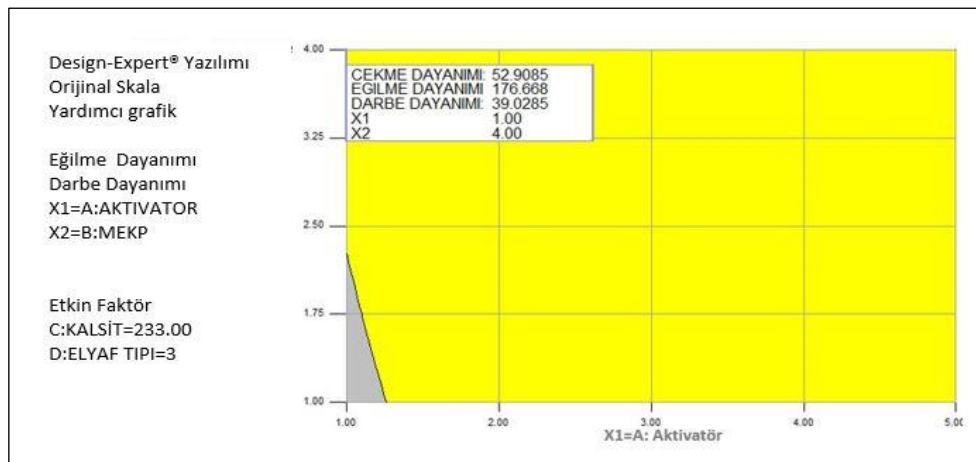
Toplamda 47 adet sonuç önerilmiştir. İstenilebilirliği en yüksek olan 5 adet çözümleme Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon istenirlik en yüksek olan ilk 5 kombinasyon.

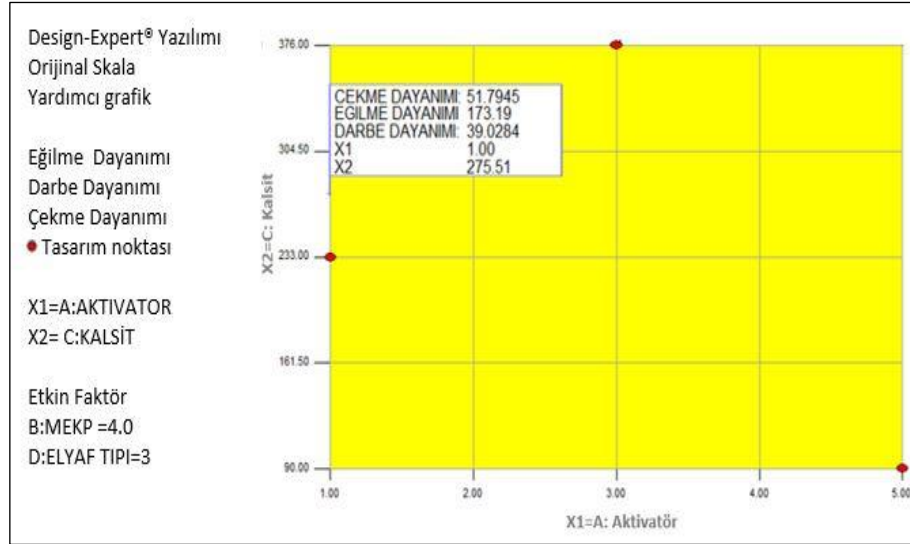
No	Aktivatör	MEKP	Kalsit	Elyaf Tipi	Çekme Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Darbe Dayanımı	İstenirlik
1	1	4	187,52	3	53,420	175,972	39,028	0,785
2	1	4	186,2	3	53,445	175,902	39,028	0,785
3	1	4	189,39	3	53,387	176,056	39,028	0,785
4	1,03	4	184,29	3	53,615	175,419	39,028	0,785
5	1,04	4	189,54	3	53,570	175,532	39,028	0,785

Optimizasyonun grafik gösterimini Şekil 4.17 ve 4.19’da görmek mümkündür. Sarı bölge belirlenen sınırlar arasında kalan bölgeyi göstermektedir.

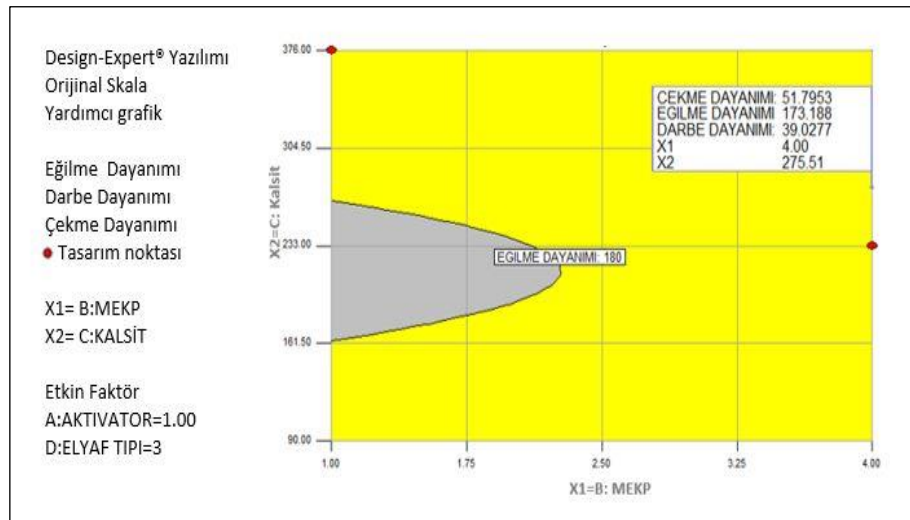
Her üç yanıt değerinin maksimum olduğu şartların tespit edilmesi için yapılan optimizasyon çalışmasındaki ilk 5 veri incelendiğinde maksimum yanıt değeri elde edilebilmesi için 3 numara ile kodlanmış 600 RTM elyaf tipi kullanılması gerekmektedir. Aktivatör miktarı minimum değerde 1 cc ilave edilmesi gerekirken MEKP miktarı maksimum seviye olan 4 cc ilave edilmelidir. Kalsit miktarı ise hazırlanan reçine karışımında %19 oranında ilave edildiğinde maksimum yanıt değerleri elde edilmektedir. Artan kalsit miktarı ile eğilme dayanımının azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.17: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-MEKP grafik gösterimi.



Şekil 4.18: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-kalsit grafik gösterimi.



Şekil 4.19: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki optimizasyon MEKP-kalsit grafik gösterimi.

Şekil 4.17 ile Şekil 4.19'daki grafikler çekme, darbe ve eğilme dayanımlarının maksimum olduğu şartlardaki sınır aralıkları gösterilmiştir.

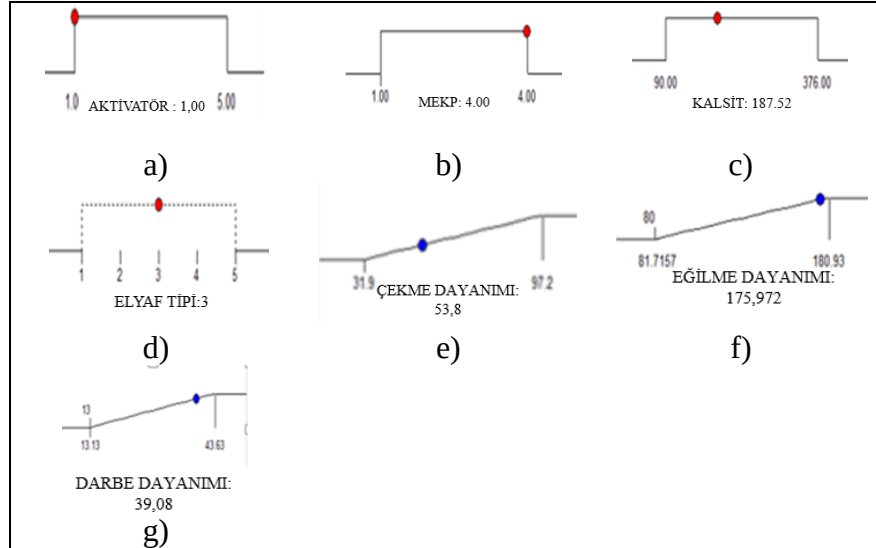
Optimizasyon bölümünde nokta tahmini için Tablo 4.10'daki parametreler belirlenmiştir. Belirlenen parametreler kullanılarak yapılan nokta tahminleri Tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.10: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki istenen değerler için nokta tahmini parametreleri.

Faktör	Tanım	Seviye	Düşük Seviye	Yüksek Seviye	Standart Sapma	Kodlama
A	Aktivatör	3	1	5	0	Gerçek
B	MEKP	2,5	1	4	0	Gerçek
C	Kalsit	233	90	376	0	Gerçek
D	Elyaf tipi	1	1	5	Yok	Gerçek

Tablo 4.11: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki istenen değerler için nokta tahmini.

Cevap	Tahmin	Standart Hata Ortalama	95% Güven Aralığı Düşük	95% Güven Aralığı Yüksek	Standart Hata Tahmin	95% Tahmin Aralığı Düşük	95% Tahmin Aralığı Yüksek
Çekme Dayanımı	70,52		61,45	82,72		55,07	98,00
Eğilme Dayanımı	140,01	5,31	128,97	151,06	10,68	117,81	162,22
Darbe Dayanımı	34,69	1,69	31,21	38,17	4,72	24,97	44,41

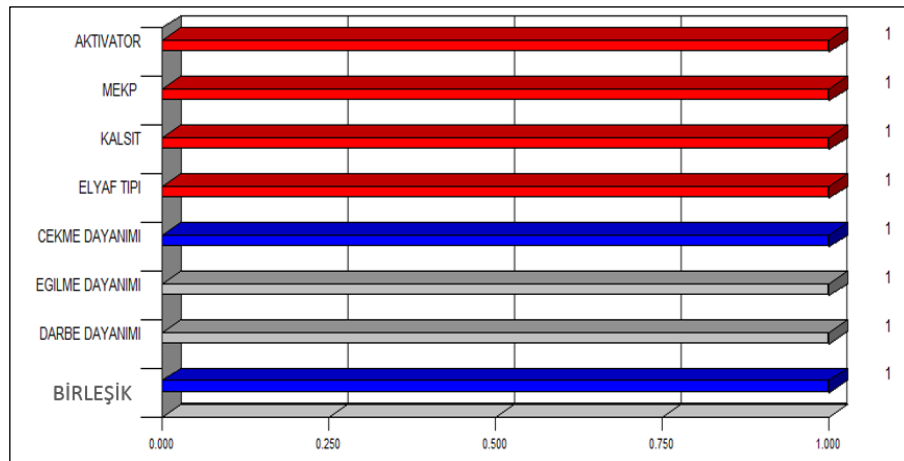


Şekil 4.20: Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumdaki, a) Aktivatör rampa gösterimi, b) MEKP rampa gösterimi, c) Kalsit rampa gösterimi, d) Elyaf tipi rampa gösterimi, e) Çekme dayanımı rampa gösterimi, f) Eğilme dayanımı rampa gösterimi, g) Darbe dayanımı rampa gösterimi.

Üç yanıt değerinin maksimum olduğu durumda her bir bağımsız değişkenin optimum noktalarının rampa gösterimi Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Optimizasyon çalışmasında yanıt değerlerin maksimum olduğu şartlar incelenmiştir. Ayrıca her bir yanıt değişkeninin maksimum olduğu durumlarda ayrı ayrı incelenmiştir. Örneğin yanıt değeri çekme dayanımının maksimum olduğu durumda eğilme ve darbe dayanımı aralık içinde tutularak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Tablo 4.12’de çekme dayanımına ait optimizasyon kriterleri verilmiştir.

Tablo 4.12: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon kriterleri.

Parametre	Amaç	Düşük Limit	Yüksek Limit	Düşük Ağırlık	Yüksek Ağırlık	Önem
Aktivatör	Aralık içinde	1	5	1	1	3
MEKP	Aralık içinde	1	4	1	1	3
Kalsit	Aralık içinde	90	376	1	1	3
Elyaf Tipi	Aralık içinde	1	5	1	1	3
Çekme Dayanımı	Maksimum değer	31,92	97,24	1	1	5
Eğilme Dayanımı	Aralık içinde	80	180,93	1	1	5
Darbe Dayanımı	Aralık içinde	13	43,63	1	1	5



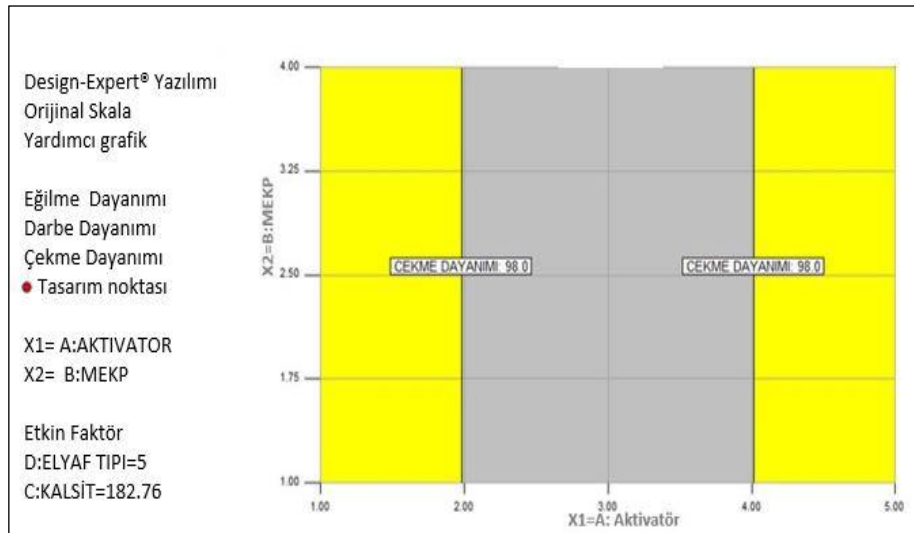
Şekil 4.21: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyondaki istenirlik değerleri.

Bu koşullar altında yapılan optimizasyon çalışması sonucunda modelin, çekme dayanımı için, eğilme ve darbe dayanımlarının istenirlik 1 olduğu görülmüştür. Optimizasyon aşamasında toplamda 100 adet sonuç önerilmiştir. İstenilebilirliği en yüksek olan 10 adet çözümleme Tablo 4.13’de verilmiştir.

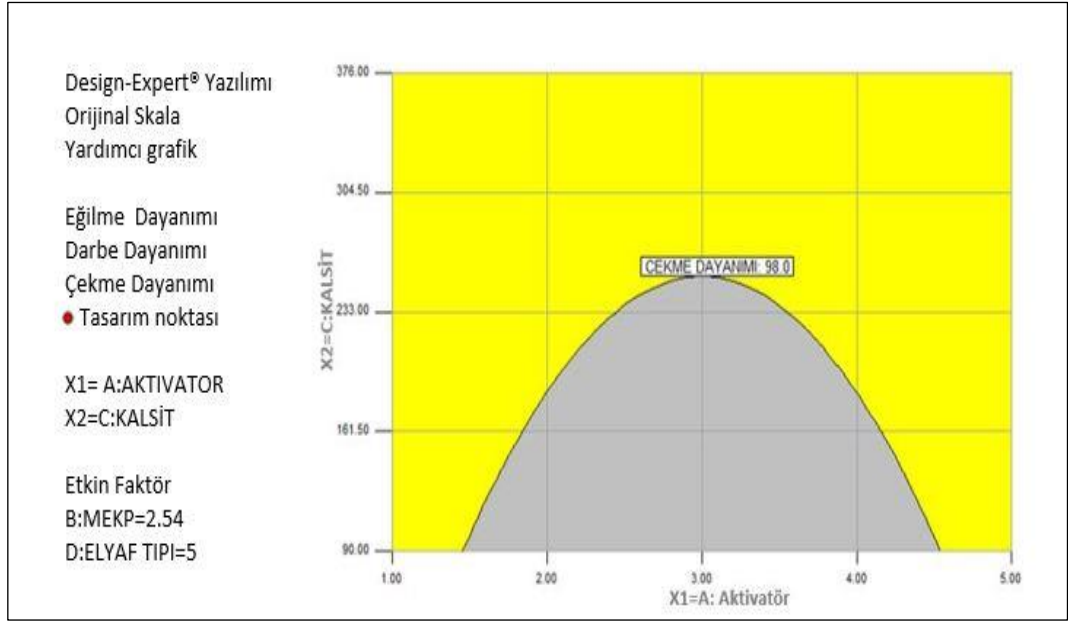
Tablo 4.13: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki istenirlik en yüksek olan ilk 10 kombinasyon.

No	Aktivatör	MEKP	Kalsit	Elyaf Tipi	Çekme Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Darbe Dayanımı	İstenirlik
1	4,29	2,54	110,77	5	99,634	114,941	32,163	1
2	2,22	1,55	181,92	5	99,758	131,570	29,540	1
3	4,36	2,5	113,03	5	98,774	115,484	32,060	1
4	2,43	1,4	166,56	5	101,897	130,816	29,137	1
5	2,27	3,16	174,95	5	100,488	125,365	33,814	1
6	3,2	3	118,54	5	106,204	116,393	33,371	1
7	3,85	2,1	167,37	5	100,145	126,277	30,997	1
8	2,87	3,96	172,22	5	102,839	120,086	35,922	1
9	2,89	2,56	258,51	5	97,713	125,923	32,227	1
10	3,87	1,4	192,85	5	98,518	131,758	29,154	1

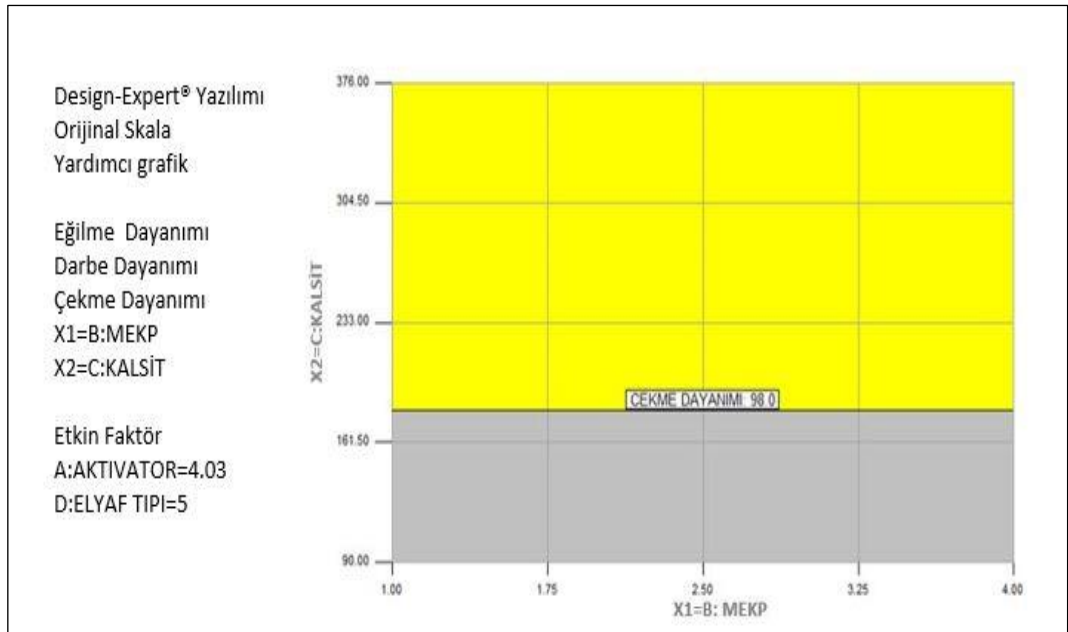
Optimizasyonun grafik gösterimini Şekil 4.22 ve 4.24’de görmek mümkündür. Sarı bölge belirlenen sınırlar arasında kalan bölgeyi göstermektedir.



Şekil 4.22: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-MEKP grafik gösterimi.



Şekil 4.23: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-kalsit grafik gösterimi.



Şekil 4.24: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon MEKP-kalsit grafik gösterimi.

Çekme dayanımının maksimum olduğu ve eğilme ve darbe dayanımını aralık içinde tutulduğu durumdaki optimizasyon şartı için yapılan nokta tahminleri Tablo 4.14’de verilmiştir.

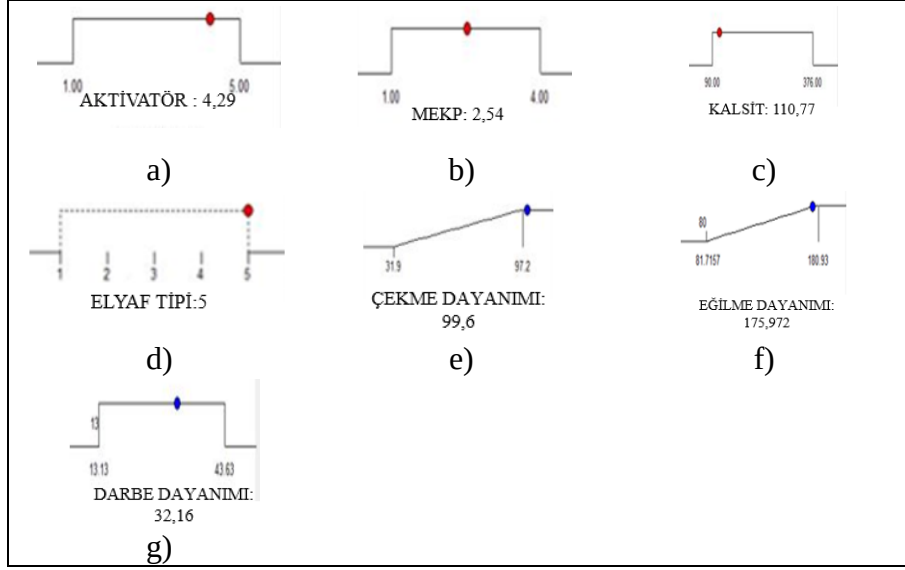
Tablo 4.14: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini parametreleri.

Faktör	Tanım	Seviye	Düşük Seviye	Yüksek Seviye	Standart Sapma	Kodlama
A	Aktivatör	3	1	5	0	Gerçek
B	MEKP	2,5	1	4	0	Gerçek
C	Kalsit	233	90	376	0	Gerçek
D	Elyaf tipi	1	1	5	Yok	Gerçek

Tablo 4.15: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini.

Cevap	Tahmin	Standart Hata Ortalama	95% Güven Aralığı Düşük	95% Güven Aralığı Yüksek	Standart Hata Tahmin	95% Tahmin Aralığı Düşük	95% Tahmin Aralığı Yüksek
Çekme Dayanımı	70,52		61,45	82,72		55,07	98,00
Eğilme Dayanımı	140,01	5,31	128,97	151,06	10,68	117,81	162,22
Darbe Dayanımı	34,69	1,69	31,21	38,17	4,72	24,97	44,41

Tablo 4.15’de ise bu parametreler ile yapılan nokta tahinleri bulunmaktadır. Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumda her bir bağımsız değişkenin optimum noktalarının rampa gösterimi Şekil 4.25’de gösterilmiştir.



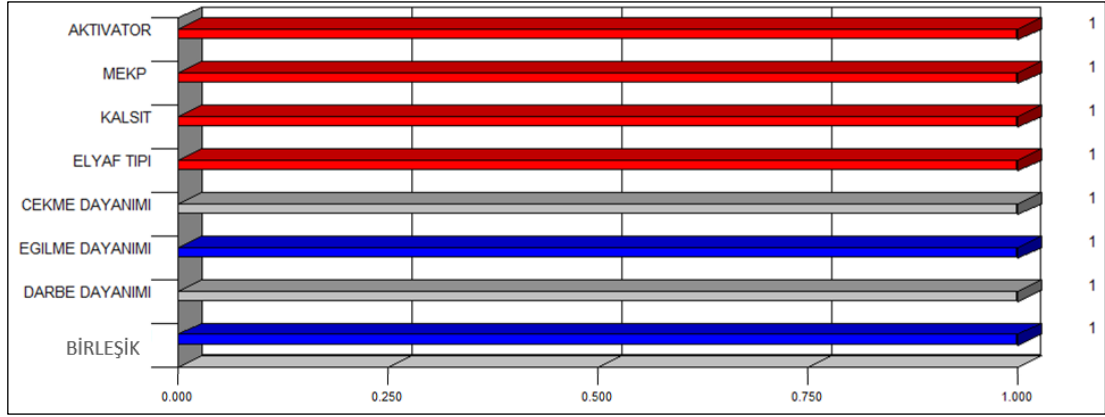
Şekil 4.25: Çekme dayanımının maksimum, eğilme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki, a) Aktivatör rampa gösterimi, b) MEKP rampa gösterimi, c) Kalsit rampa gösterimi, d) Elyaf tipi rampa gösterimi, e) Çekme dayanımı rampa gösterimi, f) Eğilme dayanımı rampa gösterimi, g) Darbe dayanımı rampa gösterimi.

Eğilme dayanımının maksimum olduğu durumda çekme ve darbe dayanımı aralık içinde tutularak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Tablo 4.16’de eğilme dayanımına ait optimizasyon kriterleri verilmiştir.

Tablo 4.16: Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon kriterleri.

Parametre	Amaç	Düşük Limit	Yüksek Limit	Düşük Ağırlık	Yüksek Ağırlık	Önem
Aktivatör	Aralık içinde	1	5	1	1	3
MEKP	Aralık içinde	1	4	1	1	3
Kalsit	Aralık içinde	90	376	1	1	3
Elyaf Tipi	Aralık içinde	1	5	1	1	3
Çekme Dayanımı	Aralık içinde	31,92	97,24	1	1	3
Eğilme Dayanımı	Maksimum değer	80	180,93	1	1	5
Darbe Dayanımı	Aralık içinde	13	43,63	1	1	3

Bu koşullar altında yapılan optimizasyon çalışması sonucunda modelin, çekme dayanımı için, eğilme ve darbe dayanımlarının istenilebilirliği 1 olduğu görülmüştür.



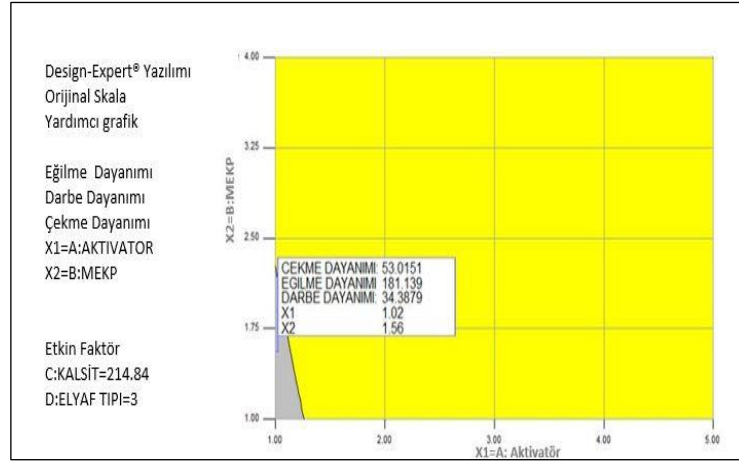
Şekil 4.26: Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyondaki istenirlik değerleri.

Optimizasyon aşamasında Tablo 4.16'daki örnek çözümlemeye göre önerilen sonuçlar mevcuttur. Toplamda 96 adet sonuç önerilmiştir. İstenilebilirliği en yüksek olan 10 adet çözümleme Tablo 4.17'de verilmiştir.

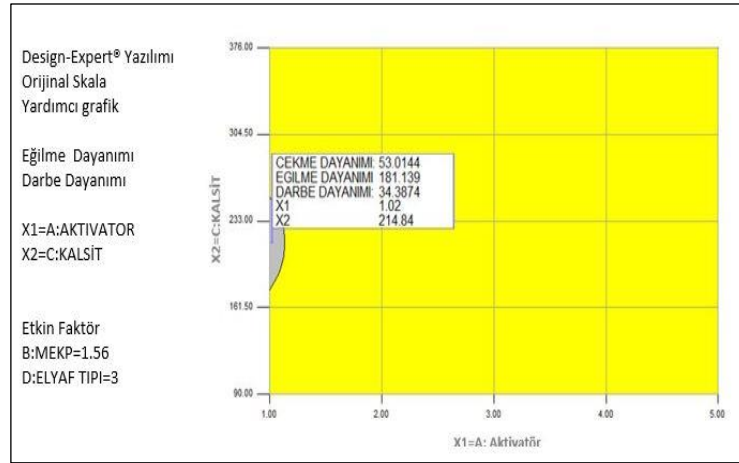
Tablo 4.17: Çekme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki istenirlik en yüksek olan ilk 10 kombinasyon.

No	Aktivatör	MEKP	Kalsit	Elyaf Tipi	Çekme Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Darbe Dayanımı	İstenirlik
1	1,02	1,56	214,840	3	53,017	181,136	34,387	1
2	1,03	1,41	202,470	3	53,270	181,245	34,103	1
3	1,03	1,18	208,040	3	53,187	181,746	33,669	1
4	1,01	1,21	245,750	3	52,369	181,073	33,726	1
5	1,04	1,52	216,210	3	53,080	181,015	34,310	1
6	1,06	1,01	203,460	3	53,413	181,730	33,331	1
7	1,01	1,17	246,750	3	52,371	181,056	33,643	1
8	1,13	1,04	228,160	3	53,249	180,960	33,393	1
9	1,05	1,31	236,340	3	52,718	180,955	33,918	1
10	1,12	1,07	202,8	3	53,671	181,066	33,451	1

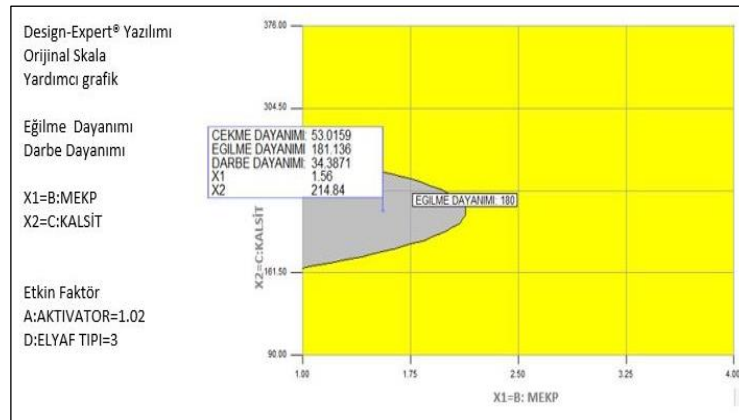
Optimizasyonun grafik gösterimini Şekil 4.27 ve 4.29'de görmek mümkündür. Sarı bölge belirlenen sınırlar arasında kalan bölgeyi göstermektedir.



Şekil 4.27: Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-MEKP grafik gösterimi.



Şekil 4.28: Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-kalsit grafik gösterimi.



Şekil 4.29: Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon MEKP-kalsit grafik gösterimi.

Optimizasyon bölümünde nokta tahmini için parametreler belirlenen parametreler Tablo 18’da verilmiştir. Parametreler kullanılarak nokta yapılan nokta tahminleri ise Tablo 19’da gösterildiği gibidir. Standart hataların ortalaması, %95 güven aralığında değerleri her üç yanıt değeri için verilmiştir.

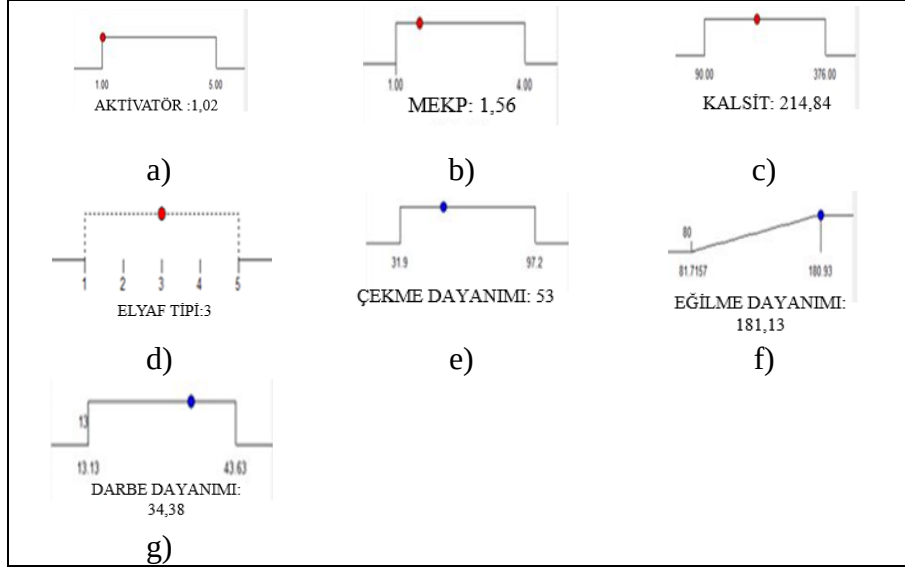
Tablo 4.18: Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini parametreleri.

Faktör	Tanım	Seviye	Düşük Seviye	Yüksek Seviye	Standart Sapma	Kodlama
A	Aktivatör	1,025	1	5	0	Gerçek
B	MEKP	1,561	1	4	0	Gerçek
C	Kalsit	214,841	90	376	0	Gerçek
D	Elyaf tipi	3	1	5	Yok	Gerçek

Tablo 4.19: Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini.

Cevap	Tahmin	Standart Hata Ortalama	95% Güven Aralığı Düşük	95% Güven Aralığı Yüksek	Standart Hata Tahmin	95% Tahmin Aralığı Düşük	95% Tahmin Aralığı Yüksek
Çekme Dayanımı	53,02	-	48,71	58,16	-	44,18	66,26
Eğilme Dayanımı	181,14	6,44	167,74	194,53	11,28	157,68	204,60
Darbe Dayanımı	34,39	1,85	30,57	38,20	4,78	24,54	44,23

Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumda her bir bağımsız değişkenin optimum noktalarının rampa gösterimi Şekil 4.30’da gösterilmiştir.

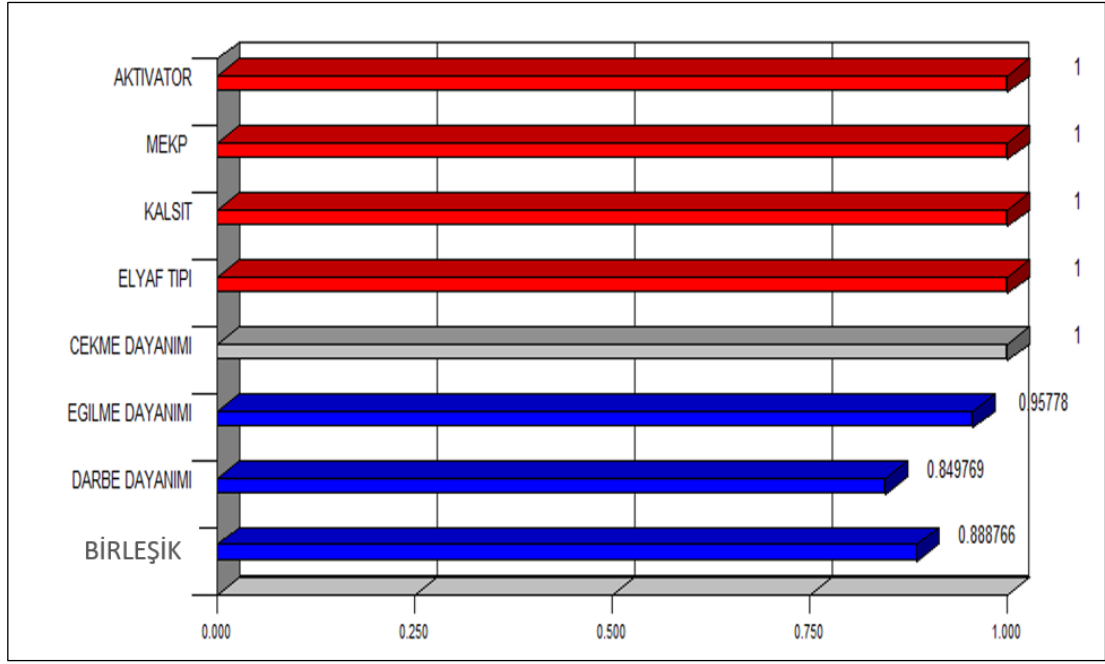


Şekil 4.30: Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki, a) Aktivatör rampa gösterimi, b) MEKP rampa gösterimi, c) Kalsit rampa gösterimi, d) Elyaf tipi rampa gösterimi, e) Çekme dayanımı rampa gösterimi, f) Eğilme dayanımı rampa gösterimi, g) Darbe dayanımı rampa gösterimi.

Tablo 4.20: Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon kriterleri.

Parametre	Amaç	Düşük Limit	Yüksek Limit	Düşük Ağırlık	Yüksek Ağırlık	Önem
Aktivatör	Aralık içinde	1	5	1	1	3
MEKP	Aralık içinde	1	4	1	1	3
Kalsit	Aralık içinde	90	376	1	1	3
Elyaf Tipi	Aralık içinde	1	5	1	1	3
Çekme Dayanımı	Aralık içinde	31,92	97,24	1	1	3
Eğilme Dayanımı	Aralık içinde	80	180,93	1	1	3
Darbe Dayanımı	Maksimum değer	13	43,63	1	1	5

Darbe dayanımının maksimum olduğu durumda çekme ve eğilme dayanımı aralık içinde tutularak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Tablo 4.20’de darbe dayanımına ait optimizasyon kriterleri verilmiştir.



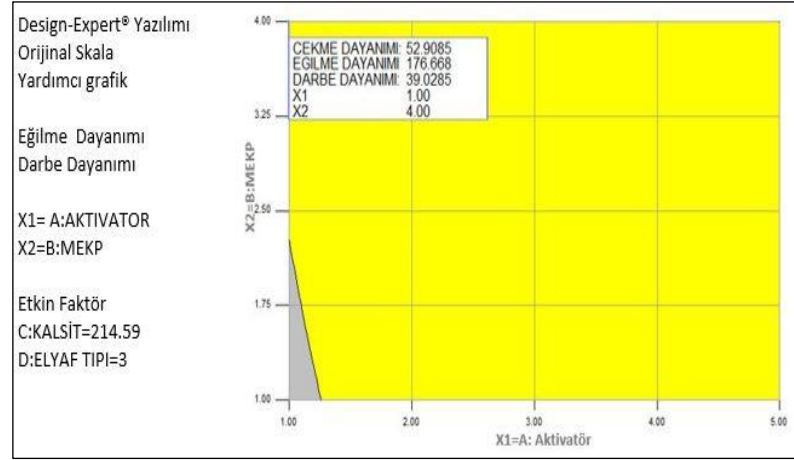
Şekil 4.31: Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon daki istenirlik değerleri.

Bu koşullar altında yapılan optimizasyon çalışmasının çekme dayanımı için 1, eğilme dayanımı için 0,958 ve darbe dayanımı için de 0,850 olduğu görülmüştür. Modelin istenirlik ise 0,889'dur. Optimizasyon aşamasında Tablo 4.20'deki örnek çözümlemeye göre önerilen sonuçlar mevcuttur. Toplamda 66 adet sonuç önerilmiştir. İstenilebilirliği en yüksek olan 10 adet çözümleme Tablo 4.21'de verilmiştir.

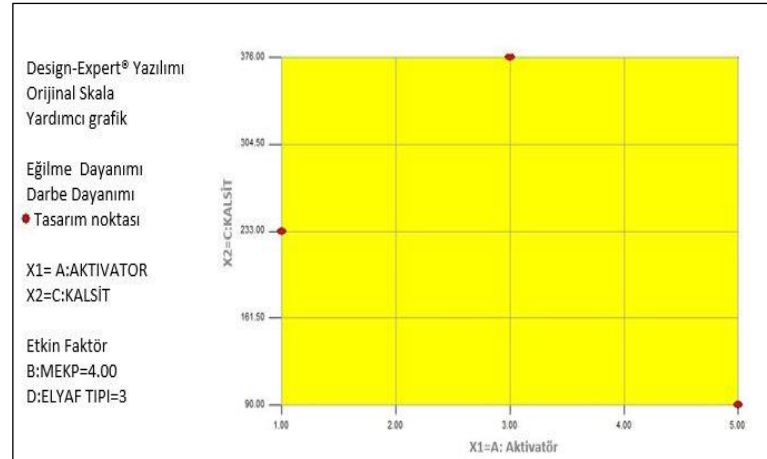
Tablo 4.21: Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki istenirlik en yüksek olan ilk 10 kombinasyon.

No	Aktivatör	MEKP	Kalsit	Elyaf Tipi	Çekme Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Darbe Dayanımı	İstenirlik
1	1	4	214,59	3	52,908	176,668	39,028	0,889
2	1	4	215,77	3	52,887	176,667	39,028	0,889
3	1	4	213,17	3	52,935	176,666	39,028	0,889
4	1	4	212,15	3	52,954	176,662	39,028	0,889
5	1	4	209,9	3	52,996	176,647	39,028	0,889
6	1	4	208,72	3	53,018	176,635	39,028	0,889
7	1	4	224	3	52,733	176,587	39,028	0,888
8	1	3,99	220,66	3	52,800	176,639	39,011	0,888
9	1	3,96	210,76	3	52,980	176,722	38,961	0,888
10	1,05	4	219,6	3	53,035	176,005	39,028	0,886

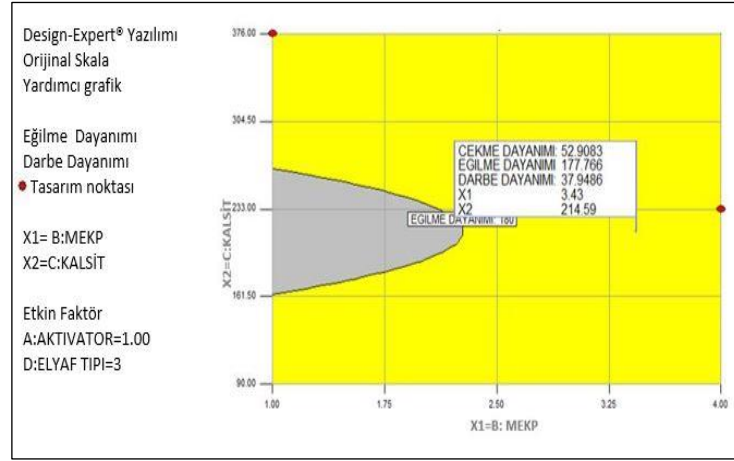
Optimizasyonun grafik gösterimini Şekil 4.32 ve 4.34’de görmek mümkündür. Sarı bölge belirlenen sınırlar arasında kalan bölgeyi göstermektedir.



Şekil 4.32: Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-MEKP grafik gösterimi.



Şekil 4.33: Eğilme dayanımının maksimum, çekme ve darbe dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon aktivatör-kalsit grafik gösterimi.



Şekil 4.34: Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon MEKP-kalsit grafik gösterimi.

Tablo 4.22: Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini parametreleri.

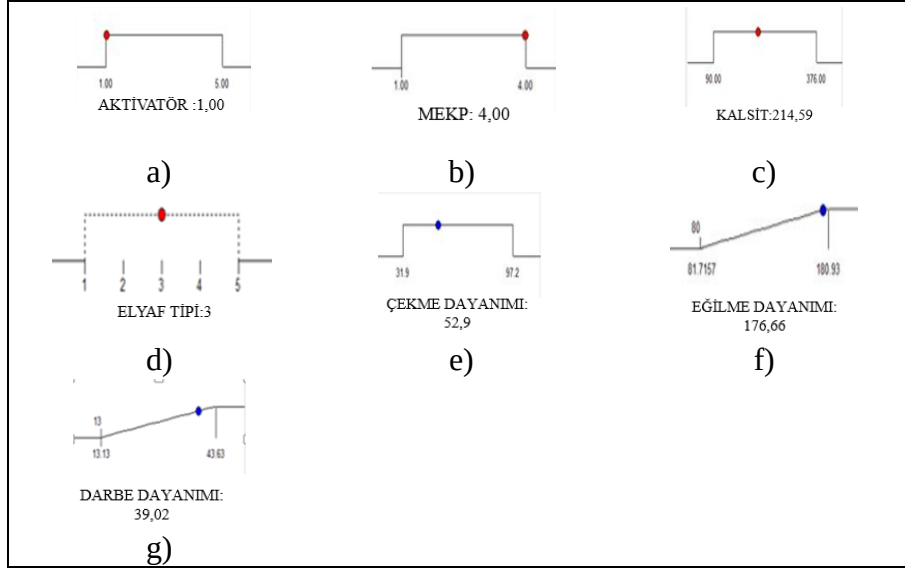
Faktör	Tanım	Seviye	Düşük Seviye	Yüksek Seviye	Standart Sapma	Kodlama
A	Aktivatör	3	1	5	0	3
B	MEKP	2,5	1	4	0	2,5
C	Kalsit	233	90	376	0	233
D	Elyaf tipi	1	1	5	Yok	1

Tablo 4.23: Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki optimizasyon istenen değerler için nokta tahmini.

Yanıt	Tahmin	Standart Hata Ortalama	95% Güven Aralığı Düşük	95% Güven Aralığı Yüksek	Standart Hata Tahmin	95% Tahmin Aralığı Düşük	95% Tahmin Aralığı Yüksek
Çekme Dayanımı	70,516	-	61,452	82,718	-	55,073	97,996
Eğilme Dayanımı	140,015	5,311	128,971	151,059	10,677	117,810	162,220
Darbe Dayanımı	34,691	1,690	31,210	38,171	4,719	24,971	44,410

Optimizasyon bölümünde nokta tahmini için parametreler belirlenmiştir. Parametreler kullanılarak nokta yapılan nokta tahminleri Tablo 4.23’de verilmiştir. Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu

durumda her bir bağımsız değişkenin optimum noktalarının rampa gösterimi Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4.35: Darbe dayanımının maksimum, çekme ve eğilme dayanımının aralık içinde olduğu durumdaki, a) Aktivatör rampa gösterimi, b) MEKP rampa gösterimi, c) Kalsit rampa gösterimi, d) Elyaf tipi rampa gösterimi, e) Çekme dayanımı rampa gösterimi, f) Eğilme dayanımı rampa gösterimi, g) Darbe dayanımı rampa gösterimi.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu tez çalışmasındaki genel amaç, deneysel tasarım metotlarını kullanılarak cam elyaf takviyeli polimer malzemelerin çekme, darbe ve eğilme dayanım özelliklerinin optimizasyonunun yapılmasıdır. Desing expert 7.0.0 paket programı kullanılarak 3 adet sayısal ve 1 adet 5 farklı kategorik değişken kullanılarak; yanıt değişkenleri olan çekme, darbe ve eğilme dayanımı üzerinde etkisini incelemek için deneysel tasarım yapılmıştır. Tezin amacı kapsamında, 35 adet denemeyi içeren deneysel tasarım listesi hazırlanmıştır. Deney planına göre, CTP plakalar RTM ile üretimi gerçekleştirildikten sonra mekanik testler yapılmıştır.

Mekanik test sonuçları Desing expert 7.0.0 paket programında işlenerek, istatistiksel olarak %90 ve %95 anlam seviyesinde değerlendirilmiştir.

Modeller için istatistiksel çalışma yapılarak en uygun 4 adet model tespit edilmiştir. Uygun modellerde anova analizi ile R^2 , düzenlenmiş R^2 ve p değeri incelenmiştir. Anova analizi yapıldıktan sonra en uygun model ve fonksiyonu belirlemek için artık analizi beklenen ve gözlenen değer sonuçları incelenmiştir. Tüm analiz sonuçları değerlendirildikten sonra her bir yanıt değişkeni için en uygun model ve fonksiyon tespit edilmiştir. İstatistiksel çalışmalar her bir yanıt için aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Çekme dayanımı için; model istatistiksel olarak incelendiğinde yanıtın ters, karekök ve logaritmik dönüşümlü modellerin uygun olduğu görülmüştür. R^2 değerleri incelendiğinde ters modelin, ikinci dereceden ve 2FI fonksiyonu uygun olduğu gözükmemektedir. Düzeltilmiş R^2 ve tahmin edilen R^2 değerleri birlikte incelendiğinde ise en uygun modelin ters ikinci dereceden fonksiyon olduğu görülmüştür. Bağımsız değişkenlerin model üzerindeki etkileri incelendiğinde ise %90 anlam düzeyinde aktivatör, MEKP değişkenlerinin p değerleri 0,1'den büyük olduğundan dolayı çekme dayanımı üzerinde etkili parametre değildir. Kalsit miktarının p değeri 0,0002 ve %95 anlam düzeyinde çekme dayanımı için etkili parametre olduğu görülmektedir. Deneme çalışmalarında dört farklı elyaf tipi kullanılmıştır. Elyaf tipinin p değeri $<0,0001$ olduğu için %95 anlam düzeyinde etkili parametredir ve elyaf tipindeki değişim ile çekme dayanımı sonucu değişmektedir. Kalsit miktarı ve elyaf tipi ikili değişimi ve aktivatörün ikinci dereceden etkileşimi %95 anlam seviyesinde çekme dayanımı üzerinde etkili parametrelerdir.

Eğilme dayanımı için; yanıtların karekök, logaritma dönüşümlü modelleri ve dönüşümün olmadığı modeller istatistiksel olarak uygundur. En uygun model seçimi gerçekleştirilirken çekme dayanımında olduğu gibi Anova ve kalıntı analizi yapılmıştır. Dönüşüm olmadığı ikinci derece model en uygun olduğu görülmüştür. Model üzerinde değişkenlerin etkisi %95 güven aralığı içinde aktivatör, MEKP, kalsit ve elyaf tipi etki olduğu görülmüştür. Ayrıca aktivatör ile elyaf tipinin ikili etkileşimler ve kalsit miktarının ikinci derecede darbe dayanımı için etkili parametrelerdendir.

Darbe dayanımı için; dönüşüm olmadığı (2FI), 10 tabanında logaritma (karesel) ve doğal logaritma (lineer) modeller istatistiksel olarak uygundur. En uygun model seçiminde çekme ve eğilme dayanımında olduğu gibi Anova ve artık analizi yapılmıştır. En uygun modelin dönüşümün olmadığı 2FI fonksiyonuna ait olduğu görülmüştür. Model üzerinde değişkenlerin etkisi %90 güven aralığı içinde elyaf tipinin etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca MEKP ile elyaf tipinin ikili etkileşimler etkili parametrelerdendir.

Yanıt değerleri için yapılan model seçiminde Tablo 5.1 incelediğinde eğilme dayanımı %95 güvende olmasına rağmen çekme ve darbe dayanımı için sırasıyla aktivatörün ikili etkileşimi ve aktivatör kalsit etkileşimlerini etkili parametre olarak değerlendirildiğinde modeller %90 güvende olduğu görülmüştür. Tüm yanıt değişkenler üzerinde D: elyaf tipinin etkili olduğu görülmüştür. Çekme ve eğilme dayanımı üzerinde kalsit miktarı etkili olduğu görülürken darbe dayanımı için etkili parametre değildir. Aktivatör ve MEKP çekme ve darbe dayanımı üzerinde etkili parametre değilken eğilme dayanımı için etkili parametre olduğu görülmüştür.

Tablo 5.1: %90-%95 güvende yanıt değeri üzerinde etkili parametreler.

Yanıt Değeri	Güven Aralığı	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	A ²	B ²	C ²
Çekme Dayanımı	95%			X	X						X			
	90%			*	*						*	*		
Eğilme Dayanımı	95%	X	X	X	X			X						X
	90%	*	*	*	*			*						*
Darbe Dayanımı	95%													
	90%				*					*				

CTP malzemenin mekanik özelliklerin en yüksek olduğu durum araştırıldığında, optimizasyon çekme ve eğilme ikinci dereceden polinom modeller kullanılarakken eğilme dayanımı için iki faktör etkileşim (2FI) modeli kullanılarak belirlenmiştir. Anova istatistiksel hesaplamaları grafiksel yöntemler ile desteklenmiştir.

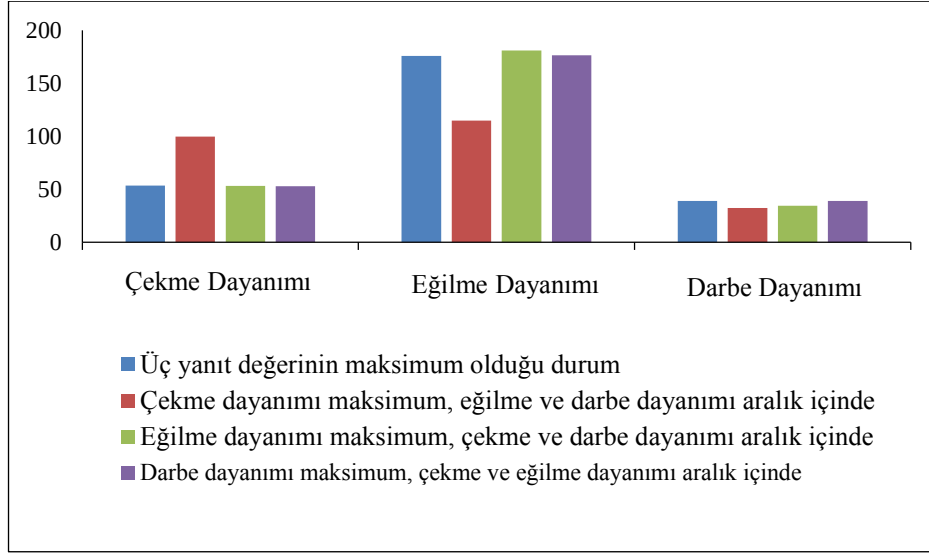
Mekanik özelliklerin optimizasyonu ile proses performansını ve ürünün kalite kriterlerini etkileyen kalsit miktarı, aktivatör ve MEKP miktarı gibi sayısal değişken ile kategorik değişken olan elyaf tipi ile 3 adet yanıtla eş zamanlı olarak çalışılmıştır. Hedef değer olan çekme, darbe ve eğilme dayanımlarının maksimum seviyesini alması istenilmiştir. Bu yüzden, Desing expert 7.0.0 paket programı kullanılarak hazırlanan optimizasyon çalışmasında sistemi karakterize eden tüm yanıtlar hep birlikte ele alınmıştır.

Uygun model seçiminden sonra optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyonda 1 yanıt değeri maksimum olduğu durumda diğer 2 değişken aralık içerisinde tutulduğunda yapılmıştır. Ayrıca her 3 yanıt değerinin maksimum olduğu koşullar içinde optimizasyon yapılmıştır.

Tablo 5.2: Farklı optimizasyon koşullarında istenirlik değerleri.

Yanıt Değeri	Çekme Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Darbe Dayanımı	Model
İstenirlik	0,599	0,95	0,849	0,785
İstenirlik	1	1,000	1,000	1,000
İstenirlik	1,000	1,000	1,000	1,000
İstenirlik	1	0,958	0,849	0,889
		Maksimum değer		
		Aralık İçinde		

Optimizasyon çalışmaları sonrasında Tablo 5.2’de verilen istenirlik değerleri incelendiğinde çekme ve eğilme dayanımları maksimum olduğu durumda tezin konusu olan maksimum mukavemet değerini sağladığını göstermektedir. Darbe dayanımının maksimum olduğu durumda değeri 1’in altında fakat yüksektir. Her 3 yanıt değerindeki istenirlik diğer optimizasyon alternatiflerine göre en düşükleri olarak gözlenirken istenirlik seviyesi yüksektir.



Şekil 5.1: Farklı optimizasyon çalışmalarında dayanım değerleri.

Farklı optimizasyon koşullarındaki dayanım değerleri Şekil 5.1’de incelendiğinde çekme dayanımının maksimum istendiği optimizasyonda, eğilme dayanımının maksimum olduğunda maksimum değeri görülürken darbe dayanımı için maksimum değer çekme dayanımının maksimum olduğu durumdadır. Her 3 yanıt değerinin maksimum değeri istendiği optimizasyon şartlarında eğilme ve darbe dayanımı maksimum değere yakın olduğu görülürken çekme dayanımında azalma gözlenmiştir.

Tablo 5.3: Farklı optimizasyon şartlarında bağımlı-bağımsız değişken değerleri.

Optimizasyon Şartları		Aktivatör	MEKP	Kalsit	Elyaf Tipi	Çekme Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Darbe Dayanımı
Maksimum	Aralık içinde	cc	cc	g	-	MPa	MPa	kJ/m²
Çekme, Eğilme ve Darbe Dayanımı	-	1	4	187,52	3	53,42	175,972	39,028
Çekme Dayanımı	Eğilme ve Darbe Dayanımı	4,29	2,54	110,77	5	99,63387	114,941	32,163
Eğilme Dayanımı	Çekme ve Darbe Dayanımı	1,02	1,56	214,840	3	53,017	181,136	34,387
Darbe Dayanımı	Çekme ve Eğilme Dayanımı	1	4	214,59	3	52,908	176,668	39,028

Elyaf miktarı 600 RTM+300 RTM kullanıldığı durumda en yüksek değer elde edilirken diğer dört optimizasyon koşulunda 600 RTM kullanıldığında istenen optimizasyon koşulunu sağlamıştır. Her üç yanıt değerinin maksimum olduğu ve sadece darbe maksimum çekme ve eğilme aralık içinde olduğu durumda kullanılması gereken kalsit hariç diğer değişken miktar ve tipleri aynıdır. Artan kalsit kullanımı ile de çekme dayanımının azalmıştır. Maksimum yanıt değerlerini sağlanması için ortalama %18 kalsit kullanımı gerekirken, eğilme dayanımın maksimum olduğu durumda kullanılması gereken miktar %21,48 dir. Sadece çekme dayanımı maksimum olması istendiği durumda kullanılan aktivatör miktarı artırılabilir.

Mekanik özelliklerin üçünü de kompozit yapıdaki takviye faz olan, deney tasarım listesinde kartografik değişken olarak işlenen elyaf tipi etkilemektedir. Çekme dayanımı için elyaf tipi miktarı arttıkça mekanik özellikler artış gözlenirken eğilme dayanımında ise aktivatör miktarındaki değişme bağlı olarak değişkenlik gözlenmektedir. Darbe dayanımında ise MEKP'nin azaldıkça ile artma gözlenmiştir.

Çekme dayanımı mukavemeti %90 güvende incelendiğinde elyaf tipi, kalsit miktarı ve aktivatör miktarına bağlı olarak değişmektedir. Artan kalsit miktarı ile çekme dayanımı azalmıştır. Aktivatör miktarı 1'den 3 cc ye kadar kullanımda artış gözlenirken, 3 cc' den 5 cc' e kadar azalmaktadır. Maksimum çekme dayanımı 3cc kullanıldığında durumda sağlanmaktadır. En yüksek elyaf tipinde (600+300 RTM elyaf) yüksek çekme mukavemeti sağlamıştır. En düşük çekme dayanımını ise 450 RTM elyaf kullanıldığında elde edilmiştir.

Eğilme dayanımının elyaf tipi, aktivatör, MEKP ve kalsit miktarı ile değişmekte olduğu görülmüştür. Kalsit miktarındaki %9'dan %23'e kadar artışında eğilme dayanımı artışı söz konusu iken %23'den %38 seviyesine gidildikçe azalma eğilimindedir. Ayrıca aktivatör ve MEKP miktarlarının artışı ile azalma eğilimindedirler. Genel sonuçlar incelendiğinde ise 600 RTM elyaf kullanımı ile en iyi sonuçlar elde edilir.

Darbe dayanımı ise sadece elyaf tipi ve MEKP miktarı ile etkilenmektedir. Kalsit miktarı ve aktivatörün etkili parametre olmadığı görülmüştür. MEKP miktarı azaldıkça darbe dayanımı artmaktadır.

Sonuçların genel değerlendirilmesine örnek olarak; 5mm kalınlığında CTP üretimi için en yüksek yanıt değerleri, 1cc aktivatör, 4 cc MEKP, 187 g kalsit ve 600 RTM tip elyaf kullanıldığı durumda elde edilmesi beklenmektedir. Her üç model için

600 RTM elyaf tipi kullanılması durumunda model denklemleri eşitlik (5.1) ile (5.3) arasında verilmiştir.

$$1/\zeta D = 19,5 \cdot 10^{-3} - (2,5 \cdot 10^{-3} x A) + (0,1 \cdot 10^{-4} x C) + (0,4 \cdot 10^{-3} x A^2) \quad (5.1)$$

$$ED = 149,26 - (8,174 x A) - (0,679 x B) + (0,404 x C) - (1,255 x AB) - (0,9 \cdot 10^{-3} x C^2) \quad (5.2)$$

$$DD = 26,360 - (1,877 x B) \quad (5.3)$$

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, CTP malzemelerde aktivatör, MEKP, kalsit olmak üzere 3 adet sayısal ve 5 farklı elyaf tipinde 1 adet kategorik bağımsız değişkenin çekme, darbe ve eğilme dayanımı yanıt değerleri üzerindeki etkileri deneysel tasarım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Desing expert programı 7.0.0 ile yanıt değer üzerinde etkili değişkenler kullanılarak 35 adet denemeyi içeren deneysel plan elde edilmiştir. Deney planına göre üretilen CTP malzemelerde mekanik testler yapılmış, test sonuçları kullanılarak her bir mekanik özellik için model denklem çıkarılmıştır. Optimizasyon çalışmasında, farklı optimizasyon koşulları için optimum bağımsız değişken değerleri tespit edilmiştir.

Bu çalışma sonucunda, 5 mm levha CTP üretiminde için her üç yanıt değerinin maksimum olduğu durum tespit edilmiştir. Böylece, yüksek ürün kalitesine ulaşabilmek için ham madde kullanımında tasarruf sağlanılacaktır. Genelde tecrübe ve deneme/yanılma ile tespit edilen uygun değer üretim şartları, bu deneysel çalışma verileri kullanarak hızlı, maliyet, işçilik ve ham madde kaybı olmadan tespit edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Enşici A., (2008), “Endüstriyel Tasarımda Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler”, Gemi ve Deniz Teknolojisi, 178, 6-15.
- [2] Kurşun A., (2009), “Düşük Hızlı Darbe Etkisi Altındaki Kompozit Plakalarda Öngerilme Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.
- [3] Demircioğlu G., (2006), “Kısa Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerde Elyaf Boyunun Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- [4] Canan F., (2007), “Açılı Yüzey Çatlaklı Cam Epoksi Kompozit Malzemelerin Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi.
- [5] Asi D., (2008), “Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Aşınma Performansının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- [6] Mağdala M. Ö., (2009), “Isı Kalkanları İçin Kalıplanabilir Karbon Fenolik Kompozit Üretimi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [7] Türkmen İ., (2012), “Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi.
- [8] Web 1, (2016), <http://www.kompozit.org.tr/documents/bildirimler/tez.pdf>, (Erişim Tarihi: 25/10/2016).
- [9] İşman N. Y., (2010), “Polyester Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozit Malzemelerin Darbe ve Eğilme Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi.
- [10] Genç Ç., (2006), “Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Üretim Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi.
- [11] Web 2, (2016), <http://plasto.com.tr/files/upload/files/CTPcamelyaf.pdf>, (Erişim Tarihi: 25/10/2016).
- [12] Yöney H., (2007), “El Yatırma Yöntemi İle Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Üretilmesi ve Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi.

- [13] Hüner  ., (2008), ‘‘Plastik Esaslı Kompozit Malzemelerin Sıcak Birleştirme İşlemlerinin İncelenmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi.
- [14] Işık A., (2008), ‘‘Kompozit Malzemeden İmal Edilmiş, Bir Takviye Elemanın Eēilme ve Burulma Yükü Altında Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [15] Web 3, (2016), http://mf.omu.edu.tr/malzeme/wp-content/uploads/sites_ /11 /2012/02/Kompozit-Deneyleri.pdf, (ErişimTarihi: 25/10/2016).
- [16]  ift i Aytekin A. G., (2010), ‘‘Kalite Geliştirme Sürecinde Eniyileme Problemlerine Deney Tasarımı Yönteminin Uygulanması’’, Doktora Tezi, Dokuz Eylül  niversitesi.
- [17]  ift i Aytekin A. G., (2010), ‘‘Kalite Geliştirme Sürecinde Eniyileme Problemlerine Deney Tasarımı Yönteminin Uygulanması’’, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.

ÖZGEÇMİŞ

Esra KAYMAK AKSU 1986 yılında Trabzon’da doğdu. 2005 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi (KOÜ) Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümünü 2010 yılında başarıyla tamamlayarak, yüksek lisans eğitimine GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında 2012 yılında başladı. Sazcılar Otomotiv A.Ş.’de laboratuvar sorumlusu olarak 2013-2014 yılları arasında çalıştı. 2015 yılında itibaren Asaş Alüminyum A.Ş.’de AR-GE merkezinde araştırmacı olarak çalışmaktadır.