KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

VOLKANİK KÜLLERİN HAVACILIK POLİMER KOMPOZİTLERİ İÇİN ALTERNATİF TAKVİYE MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ

TALHA KIVANÇ

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

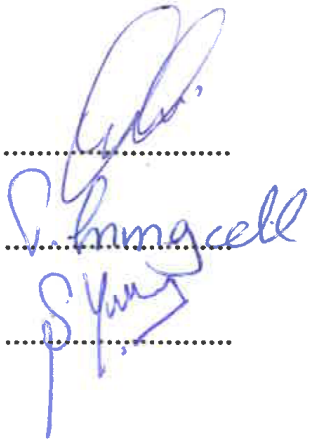
VOLKANİK KÜLLERİN HAVACILIK POLİMER KOMPOZİTLERİ İÇİN ALTERNATİF TAKVİYE MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ

TALHA KIVANÇ

Yrd.Doç.Dr. Onur ÇOBAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof.Dr. Şenol YILMAZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi .....



Tezin Savunulduğu Tarih: 23.06.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Kompozit malzemeler, uçaklarda gelişen teknoloji ile birlikte geleneksel malzemelerin yerini almaya devam etmektedir. Termoplastik malzemelerde çeşitli inorganik takviye malzemeleri ile kompozit malzeme oluşturarak uçaklardaki kullanım oranını arttırmaktadır. Hava araçlarının üretiminde ve kullanımında maliyeti azaltmak için en önemli parametrelerden biri ağırlık olarak tanımlanmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada, polifenilen sülfit (PPS) termoplastik matris malzemesine inorganik volkanik kül takviyesi yapılıp kompozit malzeme üretimi sağlanmıştır. Üretilen malzemelere çekme testi, eğilme testi, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), dinamik mekanik termal analiz (DMTA), katı partikül erozyonu aşınma testleri uygulanmıştır. Testlerin ardından yapılan hasar analizleri ile üretilen malzemelerin hava araçlarında kullanılabilirliği tartışılmıştır.

Bu tez çalışması "Tübitak Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı 1001" kapsamındaki 213M563 nolu projemizin bir çıktısıdır. Bu sebeple Tübitak tarafından desteklenen projemizde danışman olarak görev alan Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e, araştırmacı olarak görev alan Yrd. Doç. Dr. Mustafa Özgür BORA'ya, bursiyer olarak görev alan Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Gövde Motor Bölümü öğrencileri Abdülkadir KARAOSMANOĞLU ve Volkan AYMERGEN'e tüm desteklerinden ötürü teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca projenin ilgili iş paketlerinin tamamlanmasında çok önemli katkıları olan öğretim üyeleri Yrd. Doç. Dr. Sinan FİDAN ve Yrd. Doç. Dr. Burcu ÖZCAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sahip olduğu bilgi birikimi ve alanındaki uzmanlığıyla desteğini esirgemeyen, değerli vaktini bana ayıran hocam Yrd. Doç. Dr. Onur ÇOBAN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca hayatım boyunca benim yanımda olan ve beni destekleyen ailem, annem Emine KIVANÇ'a ve sevgili eşim Buket KIVANÇ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2017 Talha KIVANÇ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER.. ii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ x
ÖZET xi
ABSTRACT xii
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Kompozit Malzeme Tanımı 3
1.2. Kompozit Malzemelerin Özellikleri 3
1.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları ve Teknolojik Gelişimleri 5
1.3.1. Kullanım alanları 5
1.3.2. Teknolojik gelişimi 6
1.4. Kompozitlerin Sınıflandırılması 7
1.5. Termoplastik Esaslı Kompozitler 7
1.5.1. PPS (Polifenilen sülfit) 10
1.6. Uçak Yapılarında Termoplastik Esaslı Kompozit Malzemelerin Kullanımı 12
1.7. Literatür Taraması 15
1.7.1. Polifenilen sülfit (PPS) kompozitlerin havacılıkta kullanım alanları 19
1.8. Volkanik Küller 26
2. MALZEME VE YÖNTEM 29
2.1. Malzemeler 29
2.2. Ekstrüder ve Enjeksiyon ile VK/PPS Kompozitlerinin Üretimi 30
2.3. Taguchi Deney Tasarımı Metodu 32
2.4. Üretilen PPS ve VK/PPS Kompozit Malzemelerinin Özelliklerinin İncelenmesi İçin Kullanılan Test ve Analiz Metotları 34
2.4.1. Çekme testi 34
2.4.2. Eğilme testi 35
2.4.3. Diferansiyel taramalı kalorimetre (differential scanning calorimetry-DSC) 35
2.4.4. Dinamik mekanik termal analiz (DMTA) 36
2.4.5. Katı partikül erozyonu aşınma testi 38
2.4.6. Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscopy-SEM) ile analiz 39
2.4.7. Bilgisayarlı mikro-tomografi ile analiz 39
2.4.8. Lazer 3D optik profilometre ile analiz 41
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 43

3.1. PPS Polimerinin Taguchi Deney Tasarımı Metodu ile Optimizasyonu; Ekstrüder ve Enjeksiyon ile Üretilecek Olan Saf PPS Polimerinin Optimum Mekanik, Termal ve Tribolojik Özelliklerinin Sağlanması 43
3.1.1. Saf PPS'nin termal açıdan erime ve kristallenme özellikleri için proses optimizasyonu 43
3.1.2. Saf PPS'nin dinamik mekanik termal özellikleri için proses optimizasyonu 46
3.1.3. Saf PPS'nin mekanik açıdan eğilme özellikleri için proses optimizasyonu 48
3.1.4. Saf PPS'nin mekanik açıdan çekme özellikleri için proses optimizasyonu 51
3.1.5. Saf PPS'nin tribolojik açıdan eroziv aşınma özellikleri için proses optimizasyonu 54
3.2. Optimize Edilmiş PPS Polimerine Kula ve Nevşehir Bölgelerinden Temin Edilen VK Takviyesinin Yapılarak Kompozit Üretiminin Gerçekleştirilmesi 59
3.2.1. Saf PPS'ye göre mekanik özellikler açısından optimum VK takviyesinin belirlenmesi 59
3.2.2. VK/PPS kompozitlerin mekanik testler (çekme ve eğme) sonrası TEM ile hasar analizleri 63
3.2.3. Saf PPS'ye göre tribolojik özellikler açısından optimum VK takviye oranının belirlenmesi 73
3.2.4. VK/PPS kompozitlerin eroziv aşınma testleri sonrası yüzeylerinin lazer 3D profilometre ile analizi 75
3.2.5. Saf PPS'ye göre termal özellikler açısından optimum VK takviye oranının belirlenmesi 82
3.2.6. VK/PPS kompozit yapı içerisinde VK partiküllerinin dağılımının bilgisayarlı mikro tomografi yöntemi (mikro-CT) ile analizi 87
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 90
4.1. Saf PPS Malzemesinin Proses Optimizasyonu 90
4.1.1. Saf PPS'nin termal açıdan erime ve kristallenme özellikleri için proses optimizasyonu 90
4.1.2. Saf PPS'nin dinamik mekanik termal özellikleri için proses optimizasyonu 90
4.1.3. Saf PPS'nin mekanik açıdan eğilme özellikleri için proses optimizasyonu 90
4.1.4. Saf PPS'nin mekanik açıdan çekme özellikleri için proses optimizasyonu 91
4.1.5. Saf PPS'nin tribolojik açıdan eroziv aşınma özellikleri için proses optimizasyonu 91
4.2. Optimize Edilmiş PPS Polimerine Kula ve Nevşehir Bölgelerinden Temin Edilen VK Takviyesinin Yapılarak Kompozit Üretiminin Gerçekleştirilmesi 92
4.2.1. Saf PPS'ye göre mekanik özellikler açısından optimum VK takviyesinin belirlenmesi 92
4.2.2. Saf PPS'ye göre tribolojik özellikler açısından optimum VK takviye oranının belirlenmesi 94

4.2.3. Saf PPS'ye göre termal özellikler açısından optimum VK takviye oranının belirlenmesi 94
4.2.4. VK/PPS kompozitlerin mekanik testler (çekme ve eğme) sonrası TEM ile hasar analizleri 95
4.2.5. VK/PPS kompozitlerin eroziv aşınma testleri sonrası yüzeylerinin lazer 3D profilometre ile analizi 96
KAYNAKLAR. 98
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 102
ÖZGEÇMİŞ 103

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Malzemelerin yoğunluk elastik modül ilişkileri 4
Şekil 1.2. Moleküler düzen a) amorf yapı ve b) yarı kristalin yapı 8
Şekil 1.3. Poli(fenilen sülfit)'in kimyasal yapısı..... 10
Şekil 1.4. Termoplastikler..... 11
Şekil 1.5. PPS kompozit koltuk destek parçaları 13
Şekil 1.6. A380 kanat hücum kenarı 13
Şekil 1.7. Airbus 380 tipi uçağın termoplastik esaslı malzemeleri 14
Şekil 1.8. Dijital elektronik birimi kasası..... 20
Şekil 1.9. Tecatron GF40 malzemesi kullanılarak üretilen elektrik kontağı..... 23
Şekil 1.10. Uçak kabin içi bagaj bölümü parçası 26
Şekil 1.11. Volkanik malzeme potansiyeli açısından önemli alanlar..... 27
Şekil 2.1. Kula ve Nevşehir bölgelerinden temin edilen volkanik küllerin TEM, elementel analiz ve yoğunluk sonuçları 30
Şekil 2.2. DSM XPLORE marka ekstrüzyon cihazı (Micro-Compounder)..... 31
Şekil 2.3. DSM XPLORE marka enjeksiyon cihazı ve iletim ünitesi..... 31
Şekil 2.4. Minitab programında yapılan Taguchi tasarımı..... 33
Şekil 2.5. Shimadzu AG-X marka universal test cihazı..... 35
Şekil 2.6. TA Instruments DSC Q200 cihazı 36
Şekil 2.7. Depolama modülü E', kayıp modül E" ve kayıp faktör Tanδ arasında dinamik-mekanik ilişki..... 37
Şekil 2.8. Uygulanan frekans (f) değerinde sinüzoidal değişime sahip gerilme genliği (ε) ile gerilme (σ) arasındaki faz açısı (δ) farkı..... 37
Şekil 2.9. TA Instruments DMTA Q800 cihazı ve kullanılan üç nokta eğme testi aparatı 38
Şekil 2.10. Katı partikül erozyonu aşınma test düzeneği şematik resmi..... 38
Şekil 2.11. Bilgisayarlı mikro-tomografi cihazı çalışma prensibi..... 39
Şekil 2.12. SkyScan 1172 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihazı 40
Şekil 2.13. Tomografi taramalarının malzeme üzerinde yapıldığı bölgeler..... 41
Şekil 2.14. Nanovea PS50 marka lazer 3D optik profilometre cihazı 42
Şekil 3.1. Sünek / gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri 54
Şekil 3.2. Tüm açılarda yapılan eroziv aşınma test sonuçları (27 set) ile sadece 15°, 30° ve 90°'de yapılan Taguchi analizi eroziv aşınma doğrulama test sonuçları..... 58
Şekil 3.3. Tüm açılarda 27 farklı üretim parametresiyle yapılan eroziv aşınma test sonuçları ile sadece 15°, 30° ve 90°'de yapılan Taguchi analizi eroziv aşınma doğrulama test sonuçları..... 59
Şekil 3.4. VK/PPS kompozitlerinin elastisite modülleri (E) ve çekme dayanımları (σ_{maks})..... 60
Şekil 3.5. VK/PPS kompozitlerinin eğilme modülleri ve eğilme dayanımları 62

Şekil 3.6. Saf PPS polimeri ve farklı kütle oranlarına sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin çekme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (250x büyütme)..... 64
Şekil 3.7. Saf PPS polimeri ve farklı kütle oranlarına sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin çekme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (1000x büyütme)..... 65
Şekil 3.8. Saf PPS polimeri ve farklı kütle oranlarına sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin çekme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (250x büyütme)..... 66
Şekil 3.9. Saf PPS polimeri ve farklı kütle oranlarına sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin çekme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (1000x büyütme)..... 68
Şekil 3.10. Farklı kütle oranlarına sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (250x büyütme)..... 69
Şekil 3.11. Farklı kütle oranlarına sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (1000x büyütme)..... 70
Şekil 3.12. Farklı kütle oranlarına sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (250x büyütme)..... 71
Şekil 3.13. Farklı kütle oranlarına sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (1000x büyütme)..... 72
Şekil 3.14. Beş farklı oranda Kula VK içeren PPS kompozitlerde ortaya çıkan kütle kaybının çarpma derecesine bağlı değişim eğrileri..... 74
Şekil 3.15. Beş farklı oranda Nevşehir VK içeren PPS kompozitlerde ortaya çıkan kütle kaybının çarpma derecesine bağlı değişim eğrileri..... 75
Şekil 3.16. Erozyon aşınması testleri sonrası erozyon kraterinde ortalama yüzey pürüzlülük ölçümünün yapıldığı profil çizgisinin şematik gösterimi..... 76
Şekil 3.17. Erozyon krateri ve ortalama pürüzlülük ölçümünün yapıldığı profil çizgisinin yeri..... 76
Şekil 3.18. Kula VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi..... 77
Şekil 3.19. Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi..... 78
Şekil 3.20. 15° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi..... 79
Şekil 3.21. 30° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi..... 80
Şekil 3.22. 45° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi..... 80
Şekil 3.23. 60° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi..... 81

Şekil 3.24. 75° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozit erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi 81
Şekil 3.25. 90° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi 82
Şekil 3.26. VK/PPS kompozitlerinin dinamik mekanik termal özellikleri 83
Şekil 3.27. VK/PPS kompozitlerinin erime ve kristallenme özellikleri..... 86
Şekil 3.28. Kula VK partiküllerinin 3 boyutlu mikro-CT görüntüleri 87
Şekil 3.29. Nevşehir VK partiküllerinin 3 boyutlu mikro-CT görüntüleri 88
Şekil 3.30. %25 Kula VK/PPS kompozitinin 3 boyutlu mikro-CT görüntüleri 89
Şekil 3.31. %25 Nevşehir VK/PPS kompozitinin 3 boyutlu mikro-CT görüntüleri 89

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Farklı malzemelerin parametre değerleri 5
Tablo 1.2. Bazı termoplastiklerin sıcaklık parametreleri 9
Tablo 1.3. 0214C1 kodlu malzeme fiziksel veri özellikleri 21
Tablo 1.4. 0214C1 kodlu malzemenin mekanik, elektriksel ve termal özellikleri 21
Tablo 1.5. 1140L0 kodlu malzemenin mekanik özellikleri 22
Tablo 1.6. 1140L0 kodlu malzemenin termal özellikleri 22
Tablo 1.7. 1140L4 kodlu malzemenin mekanik ve termal özellikleri 22
Tablo 1.8. Tecatron GF40 kodlu malzemenin mekanik ve termal özellikleri 23
Tablo 1.9. HGR20 kodlu malzemenin mekanik ve termal özellikleri 24
Tablo 1.10. HGR40DL kodlu malzemenin mekanik ve termal özellikleri 25
Tablo 1.11. SF2-40CF/000 kodlu malzemenin mekanik ve termal özellikleri 25
Tablo 1.12. Luvocom 1301-0824 kodlu malzemenin mekanik özellikleri 26
Tablo 2.1. PPS polimerin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri 29
Tablo 2.2. Üretim parametreleri ile en düşük ve en yüksek değerleri 32
Tablo 2.3. Deney tasarımı için belirlenen seviye ve faktörler 32
Tablo 2.4. L27 (3^7) Taguchi tasarımı 34
Tablo 2.5. Katı partikül erozyonu aşınma testi parametreleri 39
Tablo 2.6. SkyScan 1172 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihaz özellikleri 41
Tablo 3.1. Saf PPS'nin erime sıcaklığı için proses optimizasyonu sonuçları 44
Tablo 3.2. Saf PPS'nin erime entalpisi için proses optimizasyonu sonuçları 44
Tablo 3.3. Optimize edilmiş prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin termal özelliklerinin doğrulama test sonuçları 45
Tablo 3.4. Saf PPS'nin tanδ için proses optimizasyonu sonuçları 47
Tablo 3.5. Saf PPS'nin T_g için proses optimizasyonu sonuçları 47
Tablo 3.6. Optimize edilmiş prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin dinamik mekanik termal özelliklerinin doğrulama test sonuçları 48
Tablo 3.7. Saf PPS'nin eğilme dayanımı için proses optimizasyonu sonuçları 49
Tablo 3.8. Saf PPS'nin eğilme modülü için proses optimizasyonu sonuçları 49
Tablo 3.9. Optimize edilmiş eğilme dayanımı prosesine göre üretilen saf PPS numunelerinin doğrulama test sonuçları 50
Tablo 3.10. Optimize edilmiş eğilme modülü prosesine göre üretilen saf PPS numunelerinin doğrulama test sonuçları 50
Tablo 3.11. Optimize edilmiş ortak (hem eğilme dayanımı hem de modülü) prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin doğrulama test sonuçları 51
Tablo 3.12. Saf PPS'nin çekme dayanımı için proses optimizasyonu sonuçları 52
Tablo 3.13. Proses parametrelerinin artık gerilme dayanımı, büzülme ve çarpılmaya etkileri 52
Tablo 3.14. Saf PPS'nin çekme modülü için proses optimizasyonu sonuçları 53

Tablo 3.15. Optimize edilmiş prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin doğrulama test sonuçları 53
Tablo 3.16. Saf PPS'nin 15°'deki eroziv aşınma oranı için proses optimizasyonu sonuçları 55
Tablo 3.17. Saf PPS'nin 30°'deki eroziv aşınma oranı için proses optimizasyonu sonuçları 56
Tablo 3.18. Saf PPS'nin 90°'deki eroziv aşınma oranı için proses optimizasyonu sonuçları 57
Tablo 3.19. Optimize edilmiş proseslere göre üretilen saf PPS numunelerinin 15°, 30° ve 90° için eroziv aşınma doğrulama test sonuçları 57
Tablo 3.20. Farklı oranlara sahip Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitlerinin çekme ve üç nokta eğilme testleri için proses parametreleri 59
Tablo 3.21. Farklı oranlara sahip Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitlerinin eroziv aşınma testleri için proses parametreleri 73
Tablo 3.22. Farklı oranlara sahip Kula ve Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin DSC ve DMTA testleri için proses parametreleri 82
Tablo 3.23. Saf PPS'nin optimize edilen prosese göre elde edilen DMTA test sonuçları 83

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E	: Elastisite modülü, (GPa)
E^*	: Kompleks modül, (MPa)
E'	: Depolama modülü, (Mpa)
E''	: Kayıp modül, (Mpa)
S/N	: Sinyal gürültü oranı
η	: "en büyük en iyi" durumu için S/N oranı
y_i	: Deneyde elde edilen değer
n	: Her bir test denemesi için tekrarlı numune sayısı
T_{10}	: %10'luk ağırlık kaybına denk gelen bozunma sıcaklığı, (°C)
T_{20}	: %20'luk ağırlık kaybına denk gelen bozunma sıcaklığı, (°C)
T_m	: Erime sıcaklığı, (°C)
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı (°C)
Tan δ	: Kayıp faktör
ρ	: Yoğunluk, (kg/m^3)
R_a	: Ortalama pürüzlülük
ΔH_m	: Erime entalpisi, (j/g)
σ_{maks}	: Çekme dayanımları, (MPa)

Kısaltmalar

ADC	: Analog Dijital Çevirici
Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
$CaCO_3$	: Kalsiyum Karbonat
CCD	: Charged Coupled Device (Işığa Duyarlı Yüzey)
CT	: Bilgisayarlı Tomografi
CTP	: Cam Takviyeli Polimer
DMTA	: Dinamik Mekanik Termal Analiz
DSC	: Differencial Scanning Calorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre)
FAR	: Federal Aviation Regulation (Federal Havacılık Regülasyonu)
GMT	: Glass Mat Reinforced Thermoplastic (Preslenebilir Takviyeli Termoplastik)
PPS	: Polifenilen Sülfit
PTFE	: Polytetrafluorethylene (politetrafloretilen)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Misroskobu)
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TiO_2	: Titanyum Oksit
VK	: Volkanik Kül

VOLKANİK KÜLLERİN HAVACILIK POLİMER KOMPOZİTLERİ İÇİN ALTERNATİF TAKVİYE MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ

ÖZET

Teknolojik gelişmeler ışığında her geçen gün havacılık alanında güç ve dayanıklılığın ağırlığa olan oranı önem kazanmaktadır. Bu çalışmada volkanik kül (VK) inorganik partiküllerin hava araçlarını hafifletmeye yönelik alternatif takviye malzemesi olarak polifenilen sülfit (polyphenylene sulphide-PPS) ile birlikte kompozit üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Üretilen saf PPS ve Kula ve Nevşehir VK/PPS kompozitlere; çekme testi, eğilme testi, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), dinamik mekanik termal analiz (DMTA), katı partikül erozyonu aşınma testleri uygulanmıştır. Mekanik ve tribolojik testler sonrası hasar analizi taramalı elektron mikroskobu (TEM) ile yapılmıştır. Tribolojik testler sonrası malzemelerin yüzeylerinde oluşan aşınma bölgeleri lazer 3D optik profilometre cihazı kullanılarak elde edilmiştir. VK partikül takviyelerinin PPS matris içerisindeki dağılımı bilgisayarlı mikro tomografi analizleri yardımıyla tespit edilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları volkanik küllerin, hava araçları için üretilen kompozit malzemelere alternatif takviye elemanı olabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Havacılık, İnorganik Partiküller, Kompozit Malzemeler, Polifenilen Sülfit (PPS), Volkanik Kül (VK).

THE AVAILABILITY OF VOLCANIC ASHES AS AN ALTERNATIVE REINFORCEMENT MATERIAL FOR AVIATION POLYMER COMPOSITES

ABSTRACT

Everyday, in the light of technological developments, the ratio of strength and durability to weight in the field of aviation gains importance. In this study, the use of volcanic ash (VA) inorganic particles as an alternative reinforcing material with polyphenylene sulphide (PPS) for reducing aircraft weight was investigated in composite production. Tensile test, bending test, differential scanning calorimetry (DSC), dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) and solid particle erosion wear test were applied to produced pure PPS and Kula, Nevşehir VA/PPS composites. Damage analysis was performed with scanning electron microscope (SEM) after mechanical and tribological tests. Wear zones on the surface of the material were obtained by using laser 3D optical profilometer after tribological tests. Distribution of the VA reinforcing particles in the PPS matrix was detected with the help of the computerized micro tomography analysis. Obtained measurement results show that volcanic ashes can be used as an alternative reinforcing material instead of composites using in aircrafts.

Keywords: Aviation, Inorganic Particles, Composite Materials, Polyphenylene Sulphide (PPS), Volcanic Ash (VA).

GİRİŞ

Havacılık alanında kullanılan polimer parçaların genellikle inorganik malzemeler ile takviye edilerek özelliklerinin geliştirilmeye veya maliyetin düşürülmeye çalışılması uzun süredir çalışılan bir konu başlığıdır. Dünya genelinde birçok inorganik partikül, polimer malzemelere takviye elemanı olarak kullanılıp kompozit malzeme üretilmektedir. Dünya rezervinin önemli bir kısmını ülkemizde bulundurduğumuz volkanik kül (VK) inorganik partikül malzemesinin bu amaçla kullanılabileceği fikri üzerine bu çalışmanın yapılmasına karar verilmiştir. Bu çalışmada, volkanik kül partiküllerinin polifenilen sülfit (polyphenylene sulphide-PPS) termoplastik malzemesi için takviye elemanı olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda üretilen malzemelerin bilhassa termal, mekanik ve eroziv aşınma özellikleri incelenmiştir.

Üretilen saf PPS ve işlemsiz Kula ve Nevşehir VK/PPS kompozitlere; çekme testi, eğilme testi, diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK), dinamik mekanik termal analiz (DMTA), katı partikül erozyonu aşınma testleri uygulanmıştır. Mekanik ve tribolojik testler sonrası hasar analizi taramalı elektron mikroskobu (TEM) ile yapılmıştır. Tribolojik testler sonrası malzemelerin yüzeylerinde oluşan aşınma bölgeleri lazer 3D optik profilometre cihazı kullanılarak elde edilmiştir. VK partikül takviyelerinin PPS matris içerisindeki dağılımı bilgisayarlı mikro tomografi analizleri yardımıyla tespit edilmiştir. Mekanik, termal ve tribolojik özellikler farklı parametreler altında en iyi sonuçların elde edildiği VK/PPS kompozitlerin karşılaştırmalı grafikler şeklindeki özeti bulgular bölümünde verilmiştir.

İlk olarak saf PPS polimerinin optimum mekanik, termal ve tribolojik özelliklerinin belirlenebilmesi için ekstrüder ve enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretim parametreleri Taguchi deney tasarımı metodu kullanılarak optimize edilmiştir. Bulunan optimum üretim parametreleri ışığında Kula ve Nevşehir yörelerinden iki farklı tür olarak tedarik edilen kütlece farklı yüzde takviye oranlarında VK partikülleri (%5,%10,%15,%20,%25) kullanılarak Kula ve Nevşehir VK/PPS

kompozitleri üretilmiştir. Üretim sonrası gerçekleştirilen mekanik, termal ve tribolojik testlerden elde edilen sonuçlar VK partikül takviye türü ve kompozit yapı içerisindeki kütlece VK oranı parametreleri ışığında irdelenmiştir.

Malzemelere uygulanan testler sonrasında hasar analizleri, partiküllerin yapı içerisinde dağılımı ve partikül/matris ara yüzey uyumunun görsel olarak tespit edilebilmesi için taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop yaygın olarak kullanılan görüntüleme yöntemleridir. Deneysel olarak elde edilen sonuçların yorumlanmasında da ayrıca katkı sağlamaktadır. Literatürde kullanılan mevcut hasar görüntüleme sistemleri çalışmada kullanılarak elde edilen deneysel sonuçların desteklenmesi amaçlanmıştır.

Bu bilgiler ışığında çalışmanın amacı; inorganik volkanik küllerin takviye malzemesi olarak PPS termoplastikler ile birlikte kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin mekanik, termal ve tribolojik özelliklerinde hangi seviyede gelişme sağlandığını incelemektir. Hava araçlarında kullanılan malzemelerin dayanıklılık ve ağırlık gibi özelliklerinin giderek daha çok önem kazandığı bu günlerde, yapılan çalışma önemli bir referans oluşturacaktır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Kompozit Malzeme Tanımı

En az iki farklı malzemenin makro seviyede (birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde) birleştirilmesiyle oluşturulan yeni malzemelere kompozit malzemeler denir. Amaçlanan tatmin edici olmayan özelliklere sahip iki farklı bileşeni birleştirerek daha iyi özelliklere sahip yeni bir malzeme oluşturmaktır [1].

Kompozit malzemede genelde iki koşul aranmaktadır:

- Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı, belirli ara yüzeylerle ayrılmış en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması,
- Kompoziti oluşturan malzeme bileşenlerinin birbirleri ile reaksiyona girmemesi veya alaşım oluşturmaması.

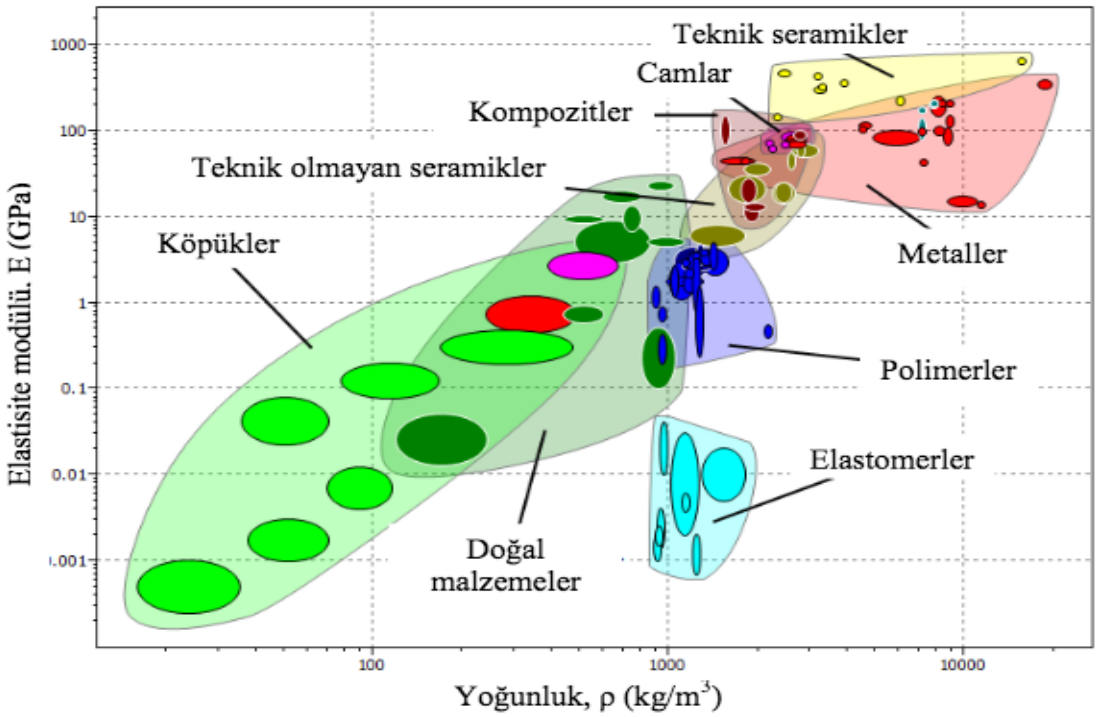
Bu şartlar altında malzeme, mikroskobik açıdan heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak makroskobik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır [2].

1.2. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Kompozit malzemeler, hem geniş fiziksel, mekanik ve kimyasal karakteristiklerinden hem de yapısal düzenleme ile özelliklerinin değiştirilmesinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Başlıca özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Metal malzemelere göre raf ömürleri daha kısadır [3].
- Eğimli yüzeylerde yüksek kullanım avantajlarına sahiptirler.
- Kompozit malzeme bileşenleri kimyasal olarak birbirlerini etkilemezler.
- Kompozit malzemelerde korozyon problemi yoktur. Bunda matris ve malzemenin uygun seçilmesinin önemi büyüktür. Herhangi bir uygunsuzluk galvanik korozyona sebep olabilir [3].
- Metallere oranla daha kolay şekil verilebilirliğe sahiptirler.
- Metaller ve seramiklerden daha düşük dayanıma sahiptirler [4].

- Hafiflik: Polimer kompozitler genelde 1,5-2 gr/cm^3 yoğunluğundadır. Metal kompozitler 2,5-4,5 gr/cm^3 olmakla beraber bazılarında sıçrama görülebilir. Seramik kompozitler ise bu iki değer arasındadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Malzemelerin yoğunluk elastik modül ilişkileri [5]

- Rijitlik ve Boyut Kararsızlığı: Genleşme katsayıları nispeten düşük olup sert, sağlam bir yapı ve büyük bir boyut kararlılığı gösterir. Rijitlik açısından, kuvvet yada moment etkisi altında şekil değiştirmeye olan direnci oldukça yüksektir.
- Bazı kompozit malzemeler çok yüksek akma sınırı değerlerine sahiptir.
- Yüksek Mekanik Özellikler: Çekme, basma, darbe, yorulma dayanımları yüksektir.
- Yüksek Kimyasal Direnç: Kompozitler birçok kimyasal maddeye, asitler, alkaliler, çözücüler ve açık hava şartlarına karşı son derece dirençlidirler.
- Yüksek Isı Dayanımı: Kompozitlerin ısı dayanımı sıradan polimerlere göre yüksektir.
- Elektriksel Özellikler: Elektriksel özellikler kompozitlerde isteğe göre ayarlanabilir. Metal matrisli birleşik malzemeler iletkendir.
- Akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu, titreşim absorbe edebilme kompozit malzemelerin önemli özelliklerindendir.

Son olarak, uçak yapılarında alüminyum alaşımlar, seramik gibi konvansiyonel malzemelerin yerini alan kompozit malzemeler, düşük ağırlığa oranla yüksek mukavemet özelliğine sahiptirler [6]. Uçak yapısı için malzeme seçiminde önemli bir kriter olan mekanik özelliğin yoğunluğa oranı ile ifade edilen, özgül mekanik özellik değerleri karşılaştırıldığında bor / epoksi ve karbon / epoksi kompozitlerin konvensiyonel malzemelerden önemli farklarla üstün oldukları görülmektedir (Tablo 1.1).

Tablo 1.1. Farklı malzemelerin parametre değerleri [1]

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Alaşımsız Çelik	7,9	459	203
Alüminyum	2,8	84	71
Bor-Epoksi	1,8	1600	224
Karbon-Epoksi	1,6	1260	218
Kevlar-Epoksi	1,4	1400	77
S camı-Epoksi	1,8	1400	56
E camı-Epoksi	1,8	1150	42

1.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları ve Teknolojik Gelişimleri

1.3.1. Kullanım alanları

Kompozit malzemelerin kullanımı 1960 yılından itibaren birçok gelişme kaydedilen aşamadan geçmiştir. İlk planda düşünülen "deneyelim, bakalım yapabilecek miyiz" üzerine kurulan bir kuramdır. İlk aşamada tartışılan bu malzemelerin uçaklarda kullanılmasından ziyade kompozit malzemelerin yapısı hakkında bilgi sahibi olabilmektir. İkinci aşamada ise, uçaklarda kullanılan metal parçaların yerini kompozit malzemelere bırakabilme ihtimalidir. Üçüncü aşamada çeşitli takviye malzemeleri kullanılarak farklı kompozit malzemeler üretebilmektir. Son aşama ise, herkesin hayal ettiği tüm hava aracını kompozit malzemelerden üretebilmektir [7]. Kompozit malzemelerinin kullanım alanlarını genel olarak şu şekilde sıralayabiliriz,

- Havacılık uygulamaları,
- Uzay araçlarındaki uygulamalar,
- Otomotiv sektöründeki uygulamalar,
- Denizcilik sektörü,
- Titreşim söndürücüler,
- Aktarma organları,
- Motor,
- Yarış araçlarındaki uygulamalar,
- Sağlık sektörü ve diğer birçok uygulama da kompozit malzemeler kullanılır.

Havacılık uygulamalarına ayrı parantez açmak gerekirse, boeing uçaklarındaki ana iniş takım kapakları karbon fiber kompozitlerden üretilmiştir. Burun iniş takım kapakları hibrid kompozitlerden üretilmiştir. Spoiler (kanat hız kesici) iç malzeme olarak petek yapılardan oluşturulmuştur. Üst kısım kevlar epoksi ile iç malzeme Nomex petek yapı malzemedir. İstikamet dümeni karbon/epoksilerden oluşturulmuştur. Dikey dengeleyici hibrid kompozitlerde ve can fiber kompozitlerden imal edilmiştir [8].

1.3.2. Teknolojik gelişimi

Kompozit malzemelerin bilinen en eski kullanım alanı inşaat sektörüdür. Saman ile liflendirilmiş çamurdan yapılan duvarlar ilk kompozit malzeme örneklerindendir. Bugün taş, kum, kireç, demir ve çimento ile oluşturulan kompozit malzemeler evlerimizi oluşturmaktadır [3].

Fiberlerle takviye edilen sentetik reçineler 1950'li yılların ortalarından itibaren endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde "fiberglass" diye tanınan bu malzeme 1960'lı yılların başından itibaren Türkiye'de sıvı depoları, çatı levhaları, küçük boyda deniz teknelerinin yapımında kullanılmıştır. Ülkemizde seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan Anadol'un kaportası bu malzemeden üretilmiştir.

Cam fiberleriyle takviye edilmiş sentetik polimer matrisli kompozit malzemeler için dilimize "Cam Takviyeli polimer(CTP)" adı yerleşmiştir. Cam takviyeli polimerlerin üretiminde, en çok kullanılan malzeme olan polyesterin yanı sıra, günümüzde, diğer termoset ve termoplastik matrislerde kullanılmaktadır [2].

Kompozitlerin havacılık uygulamaları 1970'li yıllardan sonra hızla artmıştır. Uçak konstrüksiyonlarında kullanılan; alüminyum, çelik ve titanyum gibi geleneksel malzemeler yerlerini kısmen kompozitlere bırakmıştır [8].

1.4. Kompozitlerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, kullanılan matriks malzemesinin cinsine göre ise beş ana sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar polimer matriks, metal matriks, seramik matriks, karbon/karbon ve nanokompozit malzemelerdir.

a. Matris Türüne Göre Kompozit Malzemeler
a.1. Metal Matriks Kompozitler
a.2. Seramik Matriks Kompozitler
a.3. Karbon-Karbon Kompozitler
a.4. Nanokompozitler
a.5. Polimer Matriks Kompozitler
a.5.1. Termosetler
a.5.2. Termoplastikler
a.5.3. Elastomerler
b. Takviye Türüne Göre Kompozit Malzemeler
b.1. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler
b.2. Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler
c. Tabakalı Kompozit Malzemeler
c.1. Çok Tabakalı Kompozit Malzemeler
c.2. Hibritler
c.3. Sandviç (sandwich) [7].

1.5. Termoplastik Esaslı Kompozitler

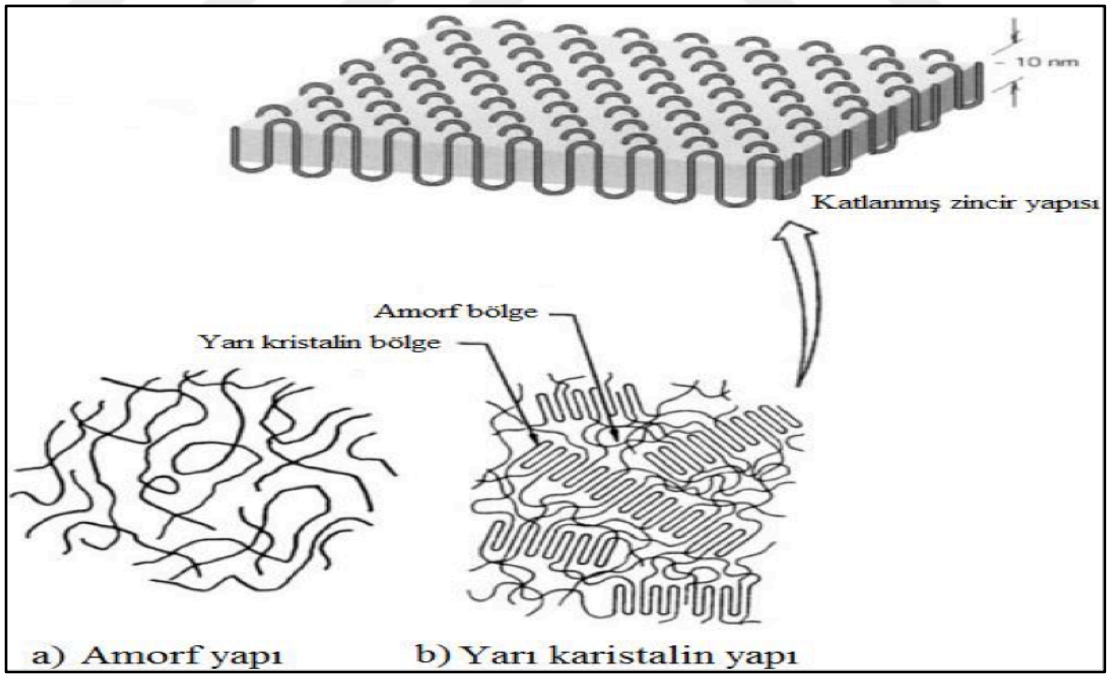
Günümüzde dünya çapında üretilen polimerlerin yaklaşık %85'ini termoplastikler oluşturmaktadır. Termoplastik malzemeler termosetlere göre daha sünek ve tokturlar. Tekrar tekrar eritilip soğutularak şekillendirilebilirler. Ancak yeni üretimde ortaya konulan ürünün özelliklerinde molekül yapıdaki değişim nedeniyle düşüş görülür [9].

Termoplastik kompozitler kalıtsal özelliklerinden dolayı havacılık alanında giderek yükselen bir grafik çizmektedir. Bu malzemelerin yüksek sertlik ve dayanıklılık

özelliği düşük ağırlık ile birleşince havacılık alanında uygulamaları hızla artmaktadır. Termoplastik kompozitler mükemmel seviyede yangın ve duman direnci, toksik özellikleri ile geri dönüştürülebilme kabiliyetleri sebebiyle üstün avantajlara sahiptirler.

Termoplastik kompozitler amorf veya yarı kristalin yapıda olabilirler ve bu iki şekilde sınıflandırılırlar (Şekil 1.2). Amorf termoplastiklerde moleküller rasgele düzen alır, bunun tersine yarı kristal polimerlerde kristalin bölgelerde moleküller düzenli şekil alır. Amorf termoplastikler camsı geçiş sıcaklıkları ile karakterize edilirler ki bu sıcaklığın üstünde modülleri hızla düşer ve viskoz özellikler sergilerler. Ayrıca amorf termoplastikler camsı geçiş sıcaklıklarının üstündeki sıcaklıklarda işlenirler. Yarı kristalin termoplastikler, %20 ile %90 arasında değişebilen farklı kristallenme oranlarına sahiptirler [9].

Polimerlerin karmaşık moleküler doğası nedeniyle tamamıyla %100 kristalin yapı elde etmek mümkün değildir. Termoplastiklerde zincirler arasında çapraz bağlanma olmaz. Bunun yanı sıra dallanma olabilir ki bu da moleküler hareketliliği azaltır [9].



Şekil 1.2. Moleküler düzen a) amorf yapı ve b) yarı kristalin yapı [9]

Yeryüzünde üretilen termoplastiklerin %70'ine yakınını düşük maliyetli ticari polimerler olan farklı yoğunluklardaki polietilenler, izotaktik polipropilen, polisitren,

ve poli(vinil klorür) oluşturmaktadır. Bir sonraki performanslı ve ucuz olanları ise akrilikler, akrilo nitril bütadien sitren terpolimerler ve yüksek darbe dirençli polisitrenlerdir. Asetallar, poliamidler, polikarbonatlar, polyesterler, poli(fenilen oksit)'ler artan oranla yüksek performans uygulamalarında kullanılırlar. Sıvı kristal polimerler, polisulfonlar, poliimidler, polifenilen sülfit (PPS) ve poli(eter keton) gibi uzman polimerler yüksek camsı geçiş ve erime sıcaklıkları nedeniyle ileri teknolojik alanlarda kullanılırlar.

Termoplastiklerin genel özelliklerini şu şekilde sıralayabiliriz:

- Hem otomotiv sektöründe hem de uçak sanayisinde yaygın olarak kullanılan termoplastiklere, ısıl yumuşar reçineler de denir.
- Termoplastikler ısıtıldıklarında yumuşar, soğutulduklarında tekrar sertleşirler.
- Metallerin yaklaşık beş katı termal genleşme katsayısına sahiptirler.

Tablo 1.2. Bazı termoplastiklerin sıcaklık parametreleri [10]

Polimer	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	Erime Sıcaklığı (°C)
Polietilen	-70 / -60	105-130
Polipropilen	-20 / +5	160
Poli (metil metakrilat)	85 / 110	130-140
Polistiren	70 / 100	240
Poli (eter keton)	145	340
Poli (laktik asit)	50 / 80	170-180

- Özgül ısıları metallerin iki katı, seramiklerin dört katıdır.
- Termal iletkenlikleri ise metallerden 3 kat düşüktür.
- Çoğunlukla enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplama yöntemleri ile üretilen termoplastikler, GMT (glass mat reinforced thermoplastics / preslenebilir takviyeli termoplastik) üretim tekniklerinde kullanılır [1].
- Bazı termoplastik malzemelerin erime sıcaklıkları tablo 1.2'de verilmiştir.

Termoplastik malzemeler özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yüksek sıcaklıklarda dahi yüksek performans düşük maliyet gibi gereksinimler için termoset

kompozitlere oranla daha geniş yer almaktadır. Termoplastiklerin başlıca teknolojik avantajlarını aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

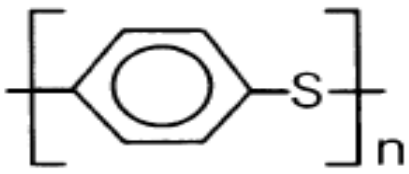
- ❖ Hammadde olarak raf ömürleri uzundur.
- ❖ Geri dönüşüm kabiliyetleri bulunmaktadır.
- ❖ Yüksek süneklik oranına (%1-500) sahiptirler.
- ❖ Termoplastik malzemeler, işlem sonrası tekrar ısıtılıp şekillendirilebilirler.
- ❖ Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastikler, soğutucu olmaksızın depolanabilirler.
- ❖ Sertleşmeleri için organik çözücülere ihtiyaç duyulmaz.
- ❖ Üstün kırılma toklukları nedeniyle darbe dayanımları yüksektir.
- ❖ Elektrik yalıtkanlık özellikleri çok iyidir.

Termoplastik esaslı malzemelerin dezavantajlarını da şu şekilde sıralayabiliriz:

- ▪ Çok düşük mukavemete, düşük sertliğe ve düşük rijitliğe sahiptirler.
- ▪ Bazı çeşitlerinin kompozit malzeme üretiminde matris olarak kullanılmaları zor ve maliyetleri yüksektir.
- ▪ Oda sıcaklığında işlenmeleri zordur.
- ▪ Bazı termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulur.
- ▪ Termoplastik hammaddeleri, termoset malzemelere göre daha pahalıdır.
- ▪ Oda sıcaklığında bile sünme (zamana bağlı şekil değişimi) olabilir.
- ▪ Bazı çeşitleri düşük ergime sıcaklığına sahiptirler [1].

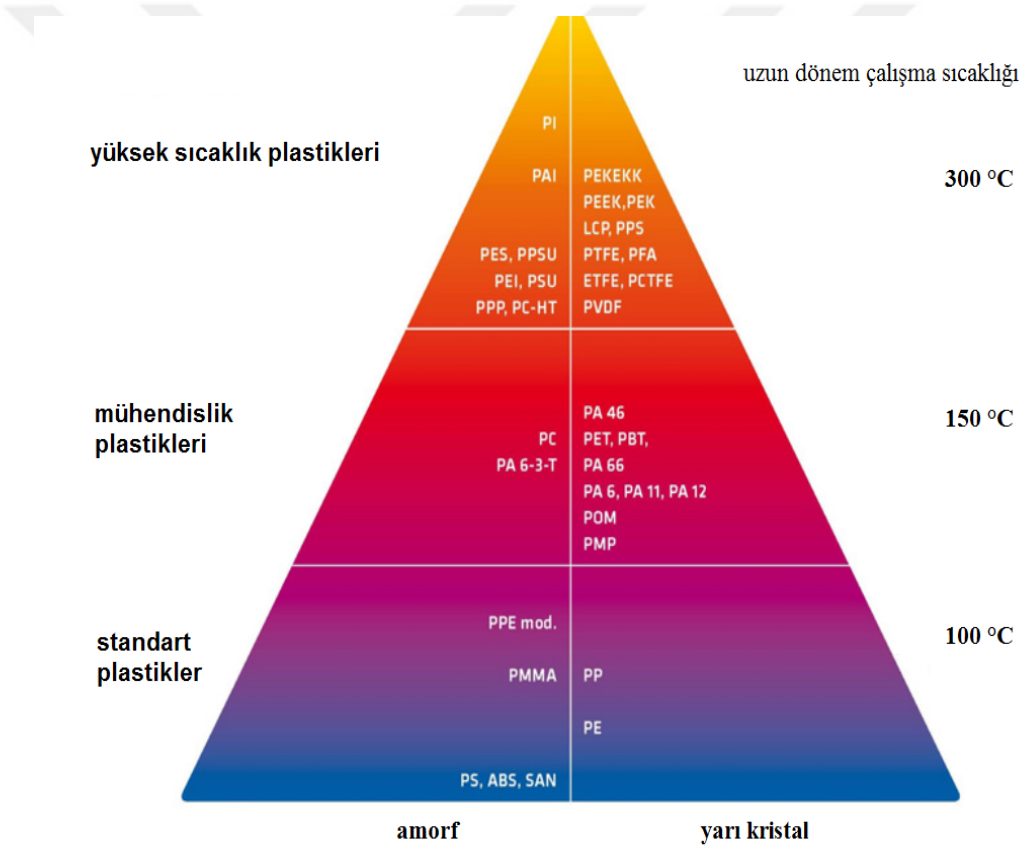
1.5.1. PPS (Polifenilen sülfit)

PPS, sülfür atomlarının bağlı olduğu aromatik fenil halkalarından oluşan bir organik polimerdir. Şekil 1.3'de kimyasal yapı formülü görülmektedir.



Şekil 1.3. Poli(fenilen sülfit)'in kimyasal yapısı

PPS yarı kristalin yapıya sahip yüksek performanslı bir mühendislik polimeridir. Termoplastik malzemeler piramidi şekil 1.4'te görülmektedir. Yoğunluğu 1,35-1,4 g/cm^3 arasındadır. Düşük nem emme özelliğine sahip PPS ayrıca yüksek sıcaklıklarda dahi düşük sürünme özelliği ile dikkat çekmektedir. %65 gibi yüksek kristallenme kabiliyetine sahip PPS'in camsı geçiş sıcaklığı yaklaşık 85°C ve erime sıcaklığı da yaklaşık 285°C civarındadır. Sürekli servis sıcaklığı en yüksek 240°C olan bu polimerin kısa zamanlı dayanabileceği en yüksek sıcaklık değeri de 270°C'yi bulmaktadır. Ayrıca PPS polimeri 200°C'nin altında hiçbir çözücü tarafından çözülmemektedir. Bu sayede otomotiv ve havacılık uygulamalarındaki çözücülerden, yağlayıcılardan ve kimyasal ortamlardan etkilenmemektedir [9].



Şekil 1.4. Termoplastikler [10]

PPS yüksek servis sıcaklığı, düşük sürünme, nispeten düşük su emilimi, çok yüksek kimyasal madde direnci, yüksek sürtünme direnci, parlamaya ve ısıya olan direnci sebebiyle kullanım alanını genişletmeye devam etmektedir. Bu özelliklerinin yanında PPS saf haliyle kullanımında tüm ihtiyaçlara tam anlamıyla cevap veremeyebilmektedir. Bu sebeple PPS polimeri çeşitli fiber ve minerallerle takviye edilmektedir. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve kolay işleme yöntemleri

sebebiyle fiber takviye malzemelerine bu süreçte yüksek önem verilmiştir. Gelişmiş fiber malzemeler arasında yüksek mekanik ve termal özellikleri nedeniyle karbon fiber malzeme, polimer matriksli kompozitlerde takviye elemanı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [9]. Fiber takviye malzemelerinin yanısıra silikatlar (mika, talk, silika) ve kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) gibi mineraller de takviye malzemesi olarak kullanılırlar.

1.6. Uçak Yapılarında Termoplastik Esaslı Kompozit Malzemelerin Kullanımı

Kompozitlerin havacılık endüstrisindeki kullanım alanları giderek artmaktadır. Fiber takviyeli termoplastik kompozitlerde olan gelişmeler uçak iskeleti yapılarının evrimleşmesindeki en önemli adımlardan biri olmuştur. Özellikle uçak yapı malzemelerinde kompozit malzemeler oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Kompozit malzemelerinin hafifliklerine oranla üstün mekanik özellikleri uçaklarda ve helikopterlerde sadece iç mekan değil yapısal parçalarında polimer esaslı kompozitlerden üretilmesine neden olmaktadır.

Termoplastik kompozitlerin kalıtsal özellikleri onların, düşük ağırlık ve düşük maliyet gibi parametrelerin önemli olduğu uçak malzemelerinde kullanılmasını sağlamıştır. Bu kompozitlerin havacılık uygulamalarında kullanılmasının en önemli sebebi, sahip oldukları yüksek dayanıklılık, tekrar üretilebilirlik ve mükemmel yangın güvenliği performanslarıdır.

Termoplastik kompozit malzemeler konusunda şuan atılan adımlar birincil uçak yapılarına ve yüzey panellerine yöneliktir. Yeni malzemeler ve geliştirilen üretim yöntemleri termoplastik kompozitlerin daha iyi bir düzeye getirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Termoplastik esaslı kompozit malzemelerin çeşitli üretim yöntemleri, uçaklarda bulunan karmaşık yapılı malzemelerin imal edilmesine imkan vermektedir. Özellikle hava aracı kabinlerinde bulunan, şekil itibariyle karmaşık yapıdaki koltuk ve koltuk destek elemanlarında termoplastik esaslı kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Şekil 1.5'te kabin içi koltuk destek elemanı görülmektedir.



Şekil 1.5. PPS kompozit koltuk destek parçaları [11]

Şuan itibariyle, artan sayıda termoplastik kompozit malzemeler uçaklarda kullanılmaya başlamıştır. Airbus 380 modeli uçağın kanat hücum kenarları cam fiber takviyeli PPS termoplastik malzemeden üretilmektedir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. A380 kanat hücum kenarı [11]

Airbus 400M tipi uçağın kokpit yer paneli termoplastik kompozit malzemeden üretilmiştir. Aynı şekilde Gulfstream G650 modeli iş jetinin rudder ve elevator kumanda yüzeyleri termoplastik esaslı kompozit malzemeden üretilmiştir.

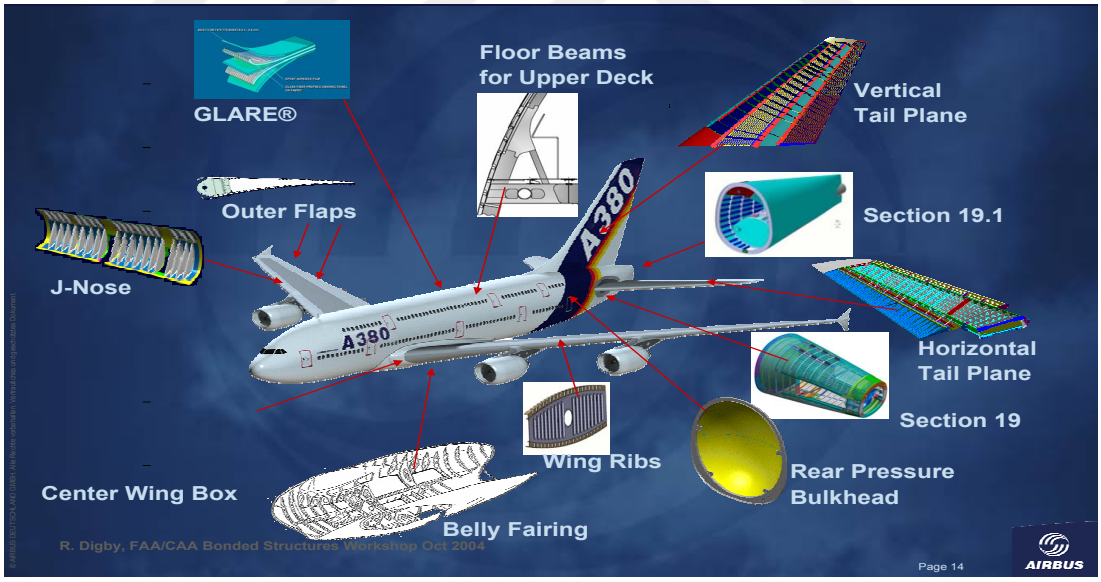
Uçakların ağırlığından elde edilen kazanım, yakıt tasarrufu ve işletme maliyetleri açısından büyük önem taşımaktadır. Termoplastik kompozitlerin uçaklarda

kullanılan karmaşık malzemelerin üretimi açısında metallere karşı üstünlüğü vardır. Bahsedilen karmaşık malzemeler metal olarak üretilse bile, ortaya çıkan maliyetler süreci zamanla imkansız kılacaktır. Günümüzde, Airbus 380 tipi uçağın yaklaşık 2,5 ton ağırlığındaki kısmı termoplastik kompozit malzemeden üretilmektedir [6].

Hava araçlarında kullanılan termoplastik esaslı kompozitleri şu şekilde belirtebiliriz:

- Gövde/ Kanat yapılarında,
- İklimlendirme sistemi borularında,
- Koltuk yapılarında,
- Pencere çerçeve yapılarında,
- Zemin panellerinde,
- Elektrik kablosu kaplamalarında,
- Çeşitli kelepçe ve bağlantı noktalarında,

Şekil 1.7'de Airbus 380 tipi uçağın termoplastik esaslı malzemeleri belirtilmiştir.



Şekil 1.7. Airbus 380 tipi uçağın termoplastik esaslı malzemeleri [3]

Havacılık endüstrisinin yüksek ivmeli gelişme hızı dolayısıyla, termoplastik kompozit malzemelerin uçaklarda kullanım alanının giderek yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Yüksek mühendislik termoplastikleri ve yüksek performanslı termoplastikler sahip oldukları malzeme özellikleri sebebiyle hava araçlarındaki kullanım alanlarını zamanla arttırmaktadır.

1.7. Literatür Taraması

Saf halde termoplastikler havacılık ve daha bir çok uygulamada yeterli özellikler sergileyememektedirler. Çünkü her geçen gün gelişen teknoloji ile birlikte malzemelerden beklenen özellikler de artmaktadır. Bu nedenle termoplastiklerin farklı takviye elemanları ile istenilen özelliklerinin güçlendirilmesi yoluna gidilmektedir. Bu amaçla termoplastikler, elyaf yada partikül malzemeler ile takviye edilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda arzu edilen özellikler açısından hem elyaf hem de partikül takviyeli termoplastik kompozitler araştırılıp geliştirilmiştir.

Partikül takviyeli termoplastik malzeme üretiminde ilk amaç maliyet konusunda avantaj sağlamaktır. Daha sonra kullanılan partiküllerin polimer malzemelerin uygulama performanslarını büyük ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir. En başından termoplastik polimerlerin partikül malzeme ile takviye edilmesinin sebeplerini şu şekilde sıralayabiliriz [9]:

- Düşük maliyet
- Yüksek üretim miktarı
- Yoğunluk kontrolü
- Optik etkiler (yarı saydamlık)
- Termal iletkenlik
- Termal genleşme kontrolü
- Elektriksel özellikler
- Manyetik özellikler
- Alev geciktirme
- Artan mekanik özellikler.

Termoplastiklerin önemli bir dezavantajı, ısıtıldıklarında farkedilir seviyede yumuşamalarıdır. Bu süreç gerçekleşirken termoplastik malzeme modüler özelliğini kaybeder ve biçim bozukluğu gözlemlenmeye başlanır. Sonuç olarak yüksek sıcaklıklarda malzeme şeklini kaybeder ve erimeye başlar. Bu durumun önüne geçebilmek için önemli bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Bahsedilen çalışmaların başında, termoplastik malzemeye talk (magnezyum silika) ilave edilmesi gelmektedir. Aslında, termoplastik malzemeye mineral takviyesinde bulunmak,

malzemenin modüler yapısını geliştirerek ısı ile bozulma sıcaklığını önemli ölçüde arttırmıştır [12].

Termoplastik kompozit malzemelerin çeşitli minerallerle takviye edilmesinin yanında, fiber malzemelerle de takviye edilebilmektedir. Sürekli,kısa ve uzun fiber malzemeler takviye elemanı olarak kullanılabilmektedir. Termoplastik kompozit malzemeyi çeşitli fiberler ile kuvvetlendirmek, malzemenin mekanik özelliklerini 2 veya 3 kat arttırır. Bazı durumlarda, takviye edilmiş termoplastiğin takviye edilmemiş termoplastiğe göre, çekme ve darbe mukavemeti 2 misli ve eğilme modülü 4 kat daha büyüktür. Cam fiber söz konusu olduğunda ne kadar uzun ise o kadar mukavemeti arttırır. Bunun yanında en yüksek mukavemet oranlarına sürekli fiber takviyeli malzemelerin sahip olduğu görülmüştür. Kısa fiber takviyelerinden bahsetmek gerekirse, sürekli bir ortam oluşturmadıkları için, bazı durumlarda fiberin uçlarında matris ile fiber bağları kopabilmektedir. Dolayısıyla fiberin orta noktasında gerilme maksimum değerde olurken, uç kısımlarında çok düşük değerlerde görülmüştür [13].

Araştırmamız kapsamında kullandığımız PPS termoplastik malzemesi, çeşitli takviye elemanları ile güçlendirilip, kompozit malzemeler oluşturulur. PPS, boyut kararlılığı, yüksek sıcaklık dayanımı, yanmaya ve kimyasallara olan direnci ile mükemmel bir mühendislik polimeridir. Kun zhang ve diğerleri (ve diğ.), PPS ve kısa karbon fiberi kullanarak enjeksiyon kalıplama yöntemi ile termoplastik bir malzeme oluşturmuşlardır. Hazırladıkları malzemenin mekanik ve dinamik özelliklerini incelemişlerdir. Karbon fiber takviyeli PPS kompozit malzeme, yüksek performanslı mühendislik polimerleri arasında önde gelen bir kompozit malzemedir. Buna rağmen karbon fiber takviyeli PPS kompozit malzemenin mekanik özellikleri mükemmel görülmemişti. Ancak şu da iyi bilinmeli ki karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerde, matris ve takviye elemanının birbiriyle olan karakteristikleri ve kimyasal/fiziksel etkileşimleri çok önemlidir. Diğer taraftan, PPS polimerinin gevreklik, kırılganlık ve bağları arasında zayıf reaksiyon gibi dezavantajları mevcuttur. Bundan dolayı karbon fiber ve PPS polimeri arasındaki yüzeyler arası bağlantı zayıf görülmüştü. Kun Zhang ve diğ. yaptıkları çalışma ile, yüzeyler arası bağı çeşitli kimyasal uyumlaştırıcılar kullanarak iyileştirmeye çalışmışlardır [14].

PPS kompozitler farklı takviye malzemeleri ile oluşturulurlar. Oluşturulan malzemeler düşük sürtünme ve aşınma özellikleri gösterirler. Bu önemli özelliklerinden dolayı malzemelerin tribolojik alanlarda kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Buna rağmen PPS matris malzemesi, düşük darbe gücünde kırılgan bir termoplastiktir. Bundan dolayı daha çok cam fiber malzeme ile takviye edilirler. Cam fiber takviyeli PPS kompozitlerin, güç ağırlık oranı açısından metallerle kıyaslandığında daha üstün özellikler gösterdiği kanıtlanmıştır ve uçak malzemelerinde kullanım alanlarını hızla arttırmaktadırlar. PPS malzemenin tribolojik özelliklerini, inorganik takviye elemanları, nano ölçekte takviye elemanları ve polimerler sayesinde geliştirebildiği rapor edilmiştir. Örnek vermek gerekirse; Ag_2S, grafit, PTFE (Polytetrafloretilen), SiC, Cr_3C_2 ve $Si3N_4$, CuS ve CuO, NiS ve kevlar fiber takviye malzemelerinin PPS termoplastiğin aşınma direncini ciddi oranda yükselttiği görülmüştür. Bunun dışında PbTe, MoS_2 ve Al_2O_3, CaF_2 ve ZnF_2, PbSe takviye elemanlarının ise PPS termoplastiğin aşınma direncini düşürdüğü tespit edilmiştir. PPS matris malzemesi aynı zamanda belirli takviye elemanları ile kaplama malzemesi olarak kullanılır. Takviye edilmemiş PPS malzemelerin, PPS kompozitlere göre yüksek aşınma direncine sahip olması da dikkat çeken çalışmalar arasında yer almıştır [15].

Kompozit malzemelerin kristalleşme hızı, takviye malzeme miktarını kademeli olarak arttırdıkça düşmektedir. Buna rağmen takviye edilmemiş matris malzemenin kristalleşme hızı kompozit malzemeye göre daha düşüktür. Liang ve diğ. PPS matris malzemeli cam fiber takviyeli kompozite, nanometre nano-$CaCO_3$ ilave ederek, kristalleşme davranışını incelemişlerdi. Araştırma sonucunda kompozit malzemenin kristalleşme oranının nano-$CaCO_3$ ağırlığını arttırdıkça arttığı gözlemlenmiştir. Kompozit malzemenin kristalleşme derecesinin değişimi ise düzgün bir eğri şeklinde artarken, bazı durumlarda da artan nano-$CaCO_3$ ağırlığı ile azaldığı görülmüştür. Bu durumun inorganik partiküller ve polimer moleküler zincirlerin arasındaki etkileşimden kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Diğer taraftan, inorganik partiküllerin polimerin kristal yapısını geliştirebileceği ve bunun sonucunda da kompozit malzemenin kristallik özelliğini arttırdığı düşünülmüştür [16].

Freddy ve diğ. %20 oranında kırpılmış fiber keçe takviyeli PPS kompozitine 140 ve 204°C'de uygulanan tavlamanın (ısıl işlem) malzemelerin dinamik ve mekanik

özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda, dinamik modül ve camsı geçiş sıcaklığı değerlerinin kritik ısıl işlem süresinden sonra önemli derecede arttığını, bunun yanında malzemenin kayıp faktörü ile ölçülen sönümleme kabiliyetinin de aynı oranda düştüğünü rapor etmişlerdir. Ayrıca düşük ısıl işlem sıcaklığının, malzemedeki uygun kristallenme oranı ve düzenini sağlamak için daha kontrollü bir proses oluşturacağını vurgulamışlardır [17].

Lee ve diğ. yukarıdaki çalışmanın devamında, %20-40 oranında cam fiber takviyeli PPS kompozitlerinin kristallenme derecelerinin ısıl işlem etkisi ile değişimlerini araştırmışlardır. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK) ölçümlerinde görülen ekzotermik ısı değişimleri ile bir önceki çalışmanın yorumlarını doğrulayacak şekilde; düşük ısıl işlem sürelerinin ancak kristalleşmemiş amorf bölgelerini tekrar kristallendirmeye çalıştığı şeklinde açıklanmıştır. Bu da göstermektedir ki kısa süreli ısıl işlem sonrası yapıda hala kristallenmemiş amorf bölgeler mevcuttur [18].

Son yıllarda metal takviyeli polimer kompozit malzemeler, elektromanyetik uygulamalarda kullanılabilirliği açısından akademik çalışmalarda yer almaya başlamıştır. Üretilmiş olan kompozit malzemelerin termal ve termo mekanik karakteristiklerini incelemek amacı ile termogravimetrik analiz (TGA) ve dinamik mekanik analiz (DMA) testleri uygulanır. Goyal ve diğ. PPS matrise partikül haline getirilmiş bakır takviyesi yapmışlar ve ürettikleri numunelere yaptıkları TGA analizleri neticesinde kütlesel olarak %30 bakır takviyesi ile saf PPS' in T_{10} (%10 kütle kaybının meydana geldiği sıcaklık) sıcaklığı 492ºC' iken takviyeli kompozitin T_{10} sıcaklığının 510ºC' ye yükseldiğini tespit etmişler. T_{20} (%20 kütle kaybının meydana geldiği sıcaklık) sıcaklığı ise saf PPS için 523ºC iken %30 bakır takviyesi ile 535,5ºC' ye %60 bakır takviyesi ile 582,2ºC' ye yükseldiğini tespit etmişler. Bunun yanında, bakır takviyeli PPS kompozit malzemenin mikro seviyede sertliği saf PPS malzemeye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. PPS malzemeye bakır takviyesi ile elektriksel iletkenliğin belli oranlarda 4 kat arttırıldığı tespit edilmiştir. Bakır takviyesi ile dielektrik sabitinin de saf PPS e oranla yükseldiği görülmüştür [19].

$CaCO_3$, genel olarak polimerler için kullanılan toz halinde inorganik bir takviye malzemesidir ve polimer malzemelere mikro ve ya nano ölçekte $CaCO_3$ ilave

edilmesinin etkisi literatür araştırmalarında fazlasıyla yerini almıştır. PPS termoplastik malzemesi de literatürde nano ölçekte $CaCO_3$ takviye edilerek oluşturulan PPS kompozit malzeme ile yerini almıştır. Wang ve diğ. $CaCO_3$ takviyeli PPS nano kompozit malzemeyi oluşturup, $CaCO_3$ miktarının nano kompozit malzemede oluşturduğu mekanik özellikleri masaya yatırmışlardır. $CaCO_3$ malzemesinin içerik oranı %5'in altındayken nano kompozit malzeme içerisindeki $CaCO_3$ nano partiküllerin iyi bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Mekanik test sonuçlarında, küçük miktarda $CaCO_3$ ilavesinin PPS kompozit malzemesinin çekme mukavemetinde az bir oranda gelişmeye sebep olduğu tespit edilirken, kırılma tokluğunda ise önemli ölçüde (%300) artışa olanak tanımıştır. Diğer taraftan, malzemede $CaCO_3$ miktarını arttırmak, nano partikül takviyelerin dağılımını olumsuz yönde etkilemiştir [20].

1.7.1. Polifenilen sülfit (PPS) kompozitlerin havacılıkta kullanım alanları

Son zamanlara kadar, hava araçlarının yapısı tamamen metaldi. Artık takviye edilmiş termoplastik kompozit malzemeler düşük ağırlık, yanma direnci ve dayanıklılık özellikleriyle sektörü tekrar keşfetmeye başlamıştır. Termoplastik kompozit malzemelerin metallerin yerini alması, gelecek nesil yolcu uçaklarında, havacılık sektöründe istenen %25-30 oranında yakıt tasarrufuna olanak sağlayacaktır. Termoplastik malzemelerin kompozit dünyasında uygulamaya koyulması yaklaşık 30 yıl önce başlamıştır. O yıllarda kompozit ve termoset malzemeler, uçaklarda bazı yapısal bölgelerde perçinli alüminyum malzemelerin yerini çoktan almaya başlamışlardı bile. Bunun en büyük sebebi, bu malzemelerin dayanıklılık ve sertlik özelliklerinin ağırlıkla oranlarının daha iyi seviyede olmasından kaynaklıdır. Bu önemli avantajın bir sebebi de takviye malzemesi olarak kullanılan fiber malzemelerdir.

Havacılık ve uzay teknolojisinde kullanılan termoplastik malzemelerde, genelde, takviye malzemesi olarak cam veya karbon fiber malzemeler kullanılır. Nadiren kullanılan takviye malzemesi aramid gibi polimer fiberler olabilir. Fiberler, kısa (bir kaç milimetrelik parçalar) ve ya sürekli şekilde olabilirler. Kısa cam fiber ile takviye edilmiş termoplastik kompozitler, enjeksiyon kalıplama ve ya ısı ile şekillendirme yöntemleriyle üretilebilirler. Sürekli cam fiber ve karbon fiber malzemeler

maksimum seviyede güç/yoğunluk oranı sağlayabilmek için kumaş, örgü ve ya tek yönlü bant şeklinde hazırlanırlar. Bu şekilde hazırlanmaları şekillendirme ve üretim yöntemlerine belli kısıtlamalar getirmiştir.

Çalışmamızda enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanıldığı için, bu yöntemle üretilen ve havacılık sektöründe halihazırda kullanılan PPS takviyeli termoplastik kompozit malzemelere değinildi. Celanese firması, uçaklarda kokpit ve kabin ekibi arasındaki iletişimi sağlamak için kullanılan, dijital elektronik birimi kasalarını PPS-SF20 olarak adlandırılan PPS termoplastik malzemeden üretmişlerdi (Şekil 1.8). Bu firmanın termoplastik kompozit malzemeleri "Celstran" marka ismiyle piyasada bulunmaktadır. Bahsedilen PPS termoplastik kompozitte %20 oranında ince tel şeklinde paslanmaz yüksek kalitede çelik bulunmaktadır [21].



Şekil 1.8. Dijital elektronik birimi kasası [21]

0214C1, 1140L4 ve 1140L0 kodlu PPS termoplastik malzemeler bazı uçak parçalarının üretiminde kullanılmaktadır. Celanese firmasının "Fortron" ticari ismiyle piyasaya sürdüğü bu malzemeler mükemmel seviyede erime gücüne sahip olup, enjeksiyon kalıplama yönteminde kullanılan polimer ham maddeleridir. 0214C1 koduna sahip malzeme takviye edilmemiş PPS termoplastiktir. Bu malzeme yüksek seviyede ısı ve kimyasal dirence sahiptir. Fiziksel, mekanik, elektriksel ve termal özellikleri Tablo 1.3 ve 1.4'te gösterilmiştir. Mükemmel seviyedeki akış dengesi ve erime gücü ile enjeksiyon kalıplama üretim yönteminde kullanılmaya uygundur. 0214C1 PPS malzemesi uçak kabininde, koltuk destek parçaları, koltuk ikram masası ve koltuk köşeleri gibi parçaların üretiminde kullanılır. Alüminyum

parçalara kıyasla %50 ağırlık kazancı sağlamıştır. Fortron ticari isimli 0214C1 PPS malzemesi, amerikan havacılık idaresinin FAR (Federal aviation regulation) 25.853 numaralı yangın ve duman yoğunluğu testinden başarıyla geçerek hava aracı içerisinde ve dışarısında kullanılabilirliğini kanıtlamıştır [11].

Tablo 1.3. 0214C1 kodlu malzeme fiziksel veri özellikleri [22]

Fiziksel Özellikler	**Metrik**	**Standartlar**
Özgül Ağırlık	1,35 g/cm3	ASTM D792
Yoğunluk	1,35 g/cm3	ASTM D792
Su Emiciliği	%0,030	ASTM D570
Viskosite	120000 cP	-

Tablo 1.4. 0214C1 kodlu malzemenin mekanik, elektriksel ve termal özellikleri [22]

Mekanik Özellikler	**Metrik**	**Standartlar**
Sertlik, Rockwell	93	ASTM D785
Uzama	%0,030	ASTM D638
Çekme Dayanımı	86,2 MPa	ISO 527-2/1A
Çekme Modülü	3,80 GPa	ISO 527-2/1A
Eğme Dayanımı	145 MPa	ASTM D790
Eğme Modülü	4,14 GPa	ASTM D790
Elektriksel Özellikler		
Dielektrik Sabiti	3,0	ASTM D150
Dielektrik Dayanımı	17,7 kV/mm	ASTM D149
Termal Özellikleri		
Termal İletkenlik	3,46 W/m-K	ASTM C177
Erime Noktası	280℃	ISO 11357-1,-2,-3
Cam Geçiş Sıcaklığı	90℃	ISO 11357-1,-2,-3

1140L0 kodlu PPS termoplastik kompozit, %40 cam fiber takviye edilmiş ve enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiş bir malzemedir. Mükemmel derecede ısı ve kimyasal dirence sahip olup, yüksek elektriksel özellikler göstermektedir. Bu malzemenin mekanik ve termal özellikleri Tablo 1.5 ve 1.6'da gösterilmiştir. Sahip olduğu yüksek sertlik ve rijitlik sayesinde arttırılan sıcaklıklarda iyi derecede yük dayanım performansı sergiler. 1140L0 kodlu ürün otomotiv dünyasında rot ve levha, havacılıkta ise birçok parçanın üretiminde kullanılır.

Tablo 1.5. 1140L0 kodlu malzemenin mekanik özellikleri [22]

Mekanik Özellikler	**Metrik**	**Standartlar**
Uzama	%1,9	ISO 527-2/1A
Çekme Dayanımı	185 MPa	ISO 527-2/1A
Eğme Dayanımı	280 MPa	ISO 178
Eğme Modülü	14 GPa	ISO 178

Tablo 1.6. 1140L0 kodlu malzemenin termal özellikleri [22]

Termal Özellikleri		
Erime Noktası	280℃	ISO 11357-1,-2,-3
Cam Geçiş Sıcaklığı	90℃	ISO 11357-1,-2,-3

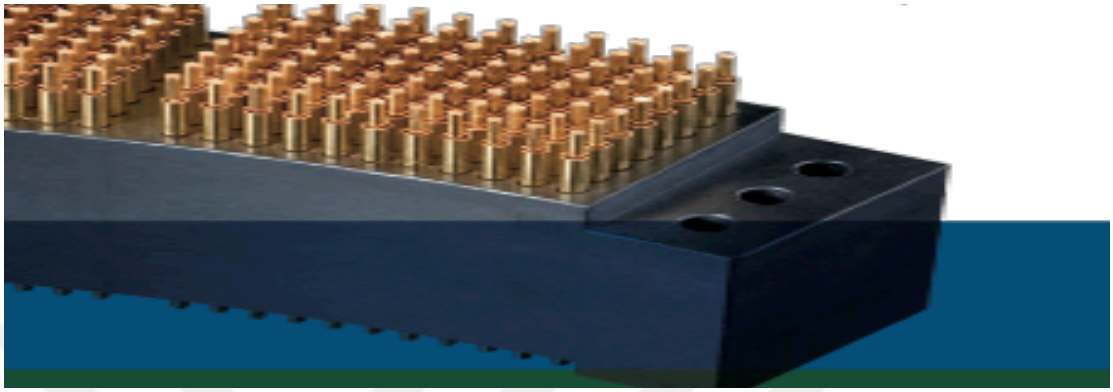
Fortron ticari ismiyle üretilen bir diğer PPS termoplastik kompozit ise 1140L4 kodlu %40 cam fiber takviyeli malzemedir. PPS termoplastik sınıfında aynı firmanın ürettiği, mevcut olan en güçlü ve dayanıklı malzemedir. Bir önceki malzeme gibi, mükemmel seviyede ısı ve kimyasal dirence sahiptir. Bunun yanında alev geciktirici özelliği sayesinde havacılık alanında kullanılmaya son derece uygundur. Malzemenin mekanik ve termal özellikleri Tablo 1.7'de belirtilmiştir. Bu malzeme bobin, lamba muhafazası ve fırça tutuçular gibi birçok elektronik malzemede kullanılmaktadır. Otomotiv ısıtıcıları, pompaları, valfleri ve yakıt rayları gibi yüksek seviyede güç ve kimyasal malzeme direnci istenilen yerlerde kullanılırlar.

Tablo 1.7. 1140L4 kodlu malzemenin mekanik ve termal özellikleri [22]

Mekanik Özellikler	**Metrik**	**Standartlar**
Sertlik, Rockwell	100	ASTM D785
Uzama	%1,7	ASTM D638
Çekme Dayanımı	195 MPa	ISO 527-2/1A
Çekme Modülü	14,7 GPa	ISO 527-2/1A
Eğme Dayanımı	241 MPa	ASTM D790
Eğme Modülü	13,1 GPa	ASTM D790
Termal Özellikleri	**Metrik**	**Standartlar**
Erime Noktası	280 ℃	ISO 11357-1,-2,-3
Cam Geçiş Sıcaklığı	90 ℃	ISO 11357-1,-2,-3

Ensinger firmasının "Tecatron" ticari ismiyle piyasaya sürmüş olduğu tecatron GF40 kodlu PPS kompozit termoplastik malzemeler önemli özelliklere sahiptir. Yüksek termal ve kimyasal direncin yanısıra düşük sertlik ve iyi seviyede sürünme direnci ile öne çıkan malzemelerden biri olmuştur. Tecatron GF40 malzemesi %40 oranında

cam fiber takviyesi içermektedir. Bu malzeme uçaklarda bazı elektriksel parçaların (Şekil 1.9), havalandırma borularının ve bazı yakıt sistem parçalarının üretiminde de kullanılır. Bunun yanında bazı uzay araçlarının tork silindirleri, sabitleme parçaları ve boru tutucularında da kullanılırlar [23].



Şekil 1.9. Tecatron GF40 malzemesi kullanılarak üretilen elektrik kontağı [24]

Kimyasal yapısı ve cam fiber takviyesi, tecatron GF40 termoplastik kompozit malzemesini biraz kırılgan bir hale getirmiştir. Üretim ve uygulama esnasında bu özellik göz önünde bulundurulmalıdır. Tablo 1.8'de bu malzemenin mekanik ve termal özellik parametreleri belirtilmiştir.

Tablo 1.8. Tecatron GF40 kodlu malzemenin mekanik ve termal özellikleri [24]

Mekanik Özellikler	**Metrik**	**Standartlar**
Uzama	%1,9	ASTM D638
Çekme Dayanımı	184 MPa	ISO 527-2/1A
Çekme Modülü	14,0 GPa	ASTM D638
Eğme Modülü	13,0 GPa	ASTM D790
Termal Özellikleri	**Metrik**	**Standartlar**
Erime Noktası	282℃	ASTM D2133
Cam Geçiş Sıcaklığı	90℃	ISO 11357-1,-2,-3

Sıchuan deyang kimyasal firmasının "Haton" ticari ismiyle ürettiği HGR20, HGR40DL, HGR41DL ve HGR50 kodlu malzemeler havacılık alanında parça üretiminde kullanılan PPS termoplastik kompozitlerdir. HGR20 kodlu malzeme %20 cam fiber takviyeli olup, yüksek derecede sürünme, sıcaklık, sürtünme ve alev direncine sahiptir. Bunun yanında mükemmel derecede elektriksel izolasyon özelliği, ark direnci ve radyasyon direnci gibi özelliklere de sahiptir [27]. Malzemenin mekanik ve termal özellikleri Tablo 1.9'da belirtilmiştir.

HGR20 kodlu PPS termoplastik malzemenin sahip olduğu özelliklerinden dolayı genellikle elektronik uygulamalarında kullanılır. Konnektörler, soketler, frekans bölücüler ve birçok ekipmanın muhafazasının üretiminde HGR20 kodlu malzeme kullanılır [27].

Tablo 1.9. HGR20 kodlu malzemenin mekanik ve termal özellikleri [22]

Mekanik Özellikler	**Metrik**	**Standartlar**
Sertlik, Rockwell	102	GB/T 3398.2-2008
Uzama	%1,8	GB/T 1040.2-2006
Çekme Dayanımı	130 MPa	GB/T 1040.2-2006
Eğme Dayanımı	190 MPa	GB/T 9341-2008
Eğme Modülü	9,10 GPa	GB/T 9341-2008
Termal Özellikleri	**Metrik**	**Standartlar**
Erime Noktası	280℃	GB/T 19466.3-2004

HGR40DL ve HGR41DL kodlu PPS termoplastik malzemeler düşük klor oranlı, %40 cam fiber takviyesinden oluşur. HGR40DL kodlu malzeme doğal renkli, HGR41DL kodlu malzeme ise siyah renklidir. Bu malzemeler iyi derecede mekanik özelliklerinin yanında yüksek derecede sürünme, sıcaklık, sürtünme, kimyasal ve alev direncine sahiptirler. Mükemmel derecedeki elektrik izolasyon özellikleri, ark dirençleri ve radyasyon dirençleri elektriksel alanda kullanımlarını yaygınlaştırmıştır [27].

HGR40DL ve HGR41DL kodlu PPS termoplastikler özellikle klor oranının önemli olduğu elektrik/elektronik alanlarında kullanılırlar. Yüksek performansları sayesinde uzay havacılığı, kimyasal ve mekanik sanayi ile demir yollarında kullanılırlar. Havacılıkta yüksek sıcaklık direnci ve elektriksel izolasyonun önemli olduğu yerlerdeki malzemelerin üretiminde kullanılırlar. Antikorozif valfler, yüksek sıcaklık dirençli kontaktörler, terminaller, anahtarlar ve bazı termokupullarda kullanılırlar. Belirtilen malzemenin mekanik ve termal özellik parametreleri Tablo 1.10'da gösterilmiştir.

Tablo 1.10. HGR40DL kodlu malzemenin mekanik ve termal özellikleri [22]

Mekanik Özellikler	**Metrik**	**Standartlar**
Sertlik, Rockwell	108	GB/T 3398.2-2008
Uzama	%1,4	GB/T 1040.2-2006
Çekme Dayanımı	180 MPa	GB/T 1040.2-2006
Eğme Dayanımı	265 MPa	GB/T 9341-2008
Eğme Modülü	14,9 GPa	GB/T 9341-2008
Termal Özellikleri	**Metrik**	**Standartlar**
Erime Noktası	280℃	GB/T 19466.3-2004

Polyone firması tarafından "Edgetek" ticari ismiyle SF2-40CF/000 kodlu termoplastik PPS malzeme enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiş olup, havacılık alanında birçok malzemenin üretiminde kullanılırlar. SF2-40CF/000 kodlu termoplastik PPS malzeme %40 oranında karbon fiber malzemeden oluşmaktadır. Yüksek servis sıcaklığına sahip ortamlarda kullanılmaya uygun bir malzemedir. Mekanik ve termal özellikleri Tablo 1.11'de belirtilmiştir. Yüksek derecede yapısal güç ve dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılırlar [27].

Tablo 1.11. SF2-40CF/000 kodlu malzemenin mekanik ve termal özellikleri [22]

Mekanik Özellikler	**Metrik**	**Standartlar**
Uzama	%1-%2	ASTM D638
Çekme Dayanımı	207 MPa	ASTM D638
Çekme Modülü	30,5 GPa	ASTM D638
Eğme Dayanımı	283 MPa	ASTM D790
Eğme Modülü	25,8 GPa	ASTM D790
Termal Özellikleri	**Metrik**	**Standartlar**
Erime Noktası	304℃-332℃	-

Lehmann & Voss firmasının "Luvocom" ticari ismiyle piyasaya sürdüğü 1301-0824 kodlu PPS termoplastik malzeme enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilir. Bu malzeme %30 oranında karbon fiber ile takviye edilmiştir. Yüksek dayanım ve sertliğe sahip olup, alev geciktiriciliği iyi seviyededir. Uçak kabinlerinde yüksek yapısal dayanıma ihtiyaç duyulan başüstü bagaj bölümlerinin üretiminde kullanılırlar [28]. Şekil 1.10'da uçakların kabin içi bagaj bölümü parçasına örnek görülmektedir.



Şekil 1.10. Uçak kabin içi bagaj bölümü parçası [28]

Luvocom ticari isimli malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1.12'de gösterilmiştir.

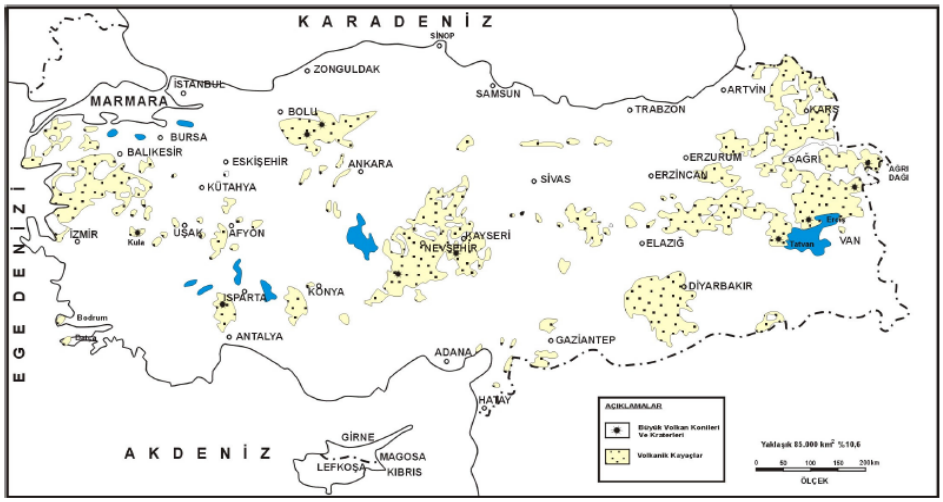
Tablo 1.12. Luvocom 1301-0824 kodlu malzemenin mekanik özellikleri [22]

Mekanik Özellikler	Metrik	Standartlar
Uzama	%1,3	ISO 527-2/1A
Çekme Dayanımı	205 MPa	ISO 527-2/1A
Eğme Dayanımı	310 MPa	ISO 178
Eğme Modülü	23 GPa	ISO 178
Elastiklik Modülü	27 GPa	ISO 527

1.8. Volkanik Küller

Volkanik kül (VK), toz halindeki inorganik takviye elemanlarına alternatif malzemelerdir. Bunun en büyük sebebi, diğer inorganik takviye malzemelerinden ucuz ve çevre dostu olmalarıdır. Bundan dolayı küller, endüstriyel piyasada rekabet edebilen inorganik malzemeler olabilmişlerdir. Dünyada bir hayli fazla sayıda püskürmüş volkan bulunduğundan dolayı, milyarlarca metreküp volkanik kül, bu volkanik dağların yamaçlarında birikmiştir. Volkanik küllerin ülkemiz açısından değeri ve önemi son 10 yılda anlaşılmaya başlanmış ve başta inşaat sektörü olmak üzere diğer endüstriyel alanlarda da kullanılmaya başlanılan bir hammadde konumuna gelmiştir. Bununla birlikte resmi olarak elde edilebilen verilere göre, 18 milyar m^3 civarında olan dünya volkanik kül rezervlerinin yaklaşık %40'ına (7.4 milyar m^3'den fazla) sahip olan ülkemiz açısından, volkanik kül madeni potansiyelimizde çok önemli bir yer tutmaktadır. Bugün ülkemizde işletilen volkanik kül sahaları açısından İç Anadolu bölgesi başı çekmekle birlikte, Akdeniz ve Doğu Anadolu bölgelerinde de önemli miktarda üretim faaliyetleri yapılmaktadır [29].

Türkiye'de volkanik malzeme potansiyel dağılımları Şekil 1.11'de belirtilen bölgelerde yer almaktadır.



Şekil 1.11. Volkanik malzeme potansiyeli açısından önemli alanlar [29]

Dünyada volkanik kül rezervleri bakımından önemli bir yeri olan Türkiye, yaklaşık 10 farklı renk ve doku kalitesine sahip volkanik kül çeşitleri ile oldukça yüksek bir pazar şansına sahiptir. Dünyanın önde gelen ham volkanik kül üreticisi ülkeler İtalya, Yunanistan, Türkiye, Almanya, ABD, Meksika, Fransa ve İzlanda'dır. Bu ülkelere son yıllarda Çin, Kanada, Yeni Zelanda, Endonezya gibi ülkeler de dahil olmuştur. Ülkemizde üretilen (yaklaşık 1.250.000 ton/yıl) volkanik külün yurt içinde tüketim miktarının tamamına yakını inşaat sektöründe, hafif yapı elemanı üretiminde kullanılmaktadır. Çok az bir oranda tekstil sektörü ve ziraat sektöründe kullanılmakta olup farklı endüstriyel alanlarda doğrudan kullanımı bulunmamaktadır [29]. Bununla birlikte, gerçekleştirilen tez çalışmasında volkanik kül malzemesinin takviye elemanı olarak kullanılabilirliği sağlandığında diğer endüstriyel uygulamalarda da kullanımının yaygınlaşacağı düşünülmüştür. Çünkü ülkemizde volkanik külün önemi her ne kadar 15 yıllık bir geçmişe sahip olsa da yeni yeni fark edilmektedir.

Yapılan araştırmaların sonucunda, volkanik külün feldispat mineral grubu, amfibol, kuvars, mika ve manyetitten meydana geldiği görülmüştür. Feldispat, yerkabuğunun %60-65'ini oluşturan bir mineral grubudur. Sodyum, potasyum, kalsiyum, lityum ve kimi zaman baryum ve sezyum içeren alümina silikatlardır. Volkanik küller gözenekli doğal malzemeler olup bünyesindeki bağlantısız boşluklar sayesinde yüksek ısı ve ses izolasyonu özelliklerine sahiptirler. Çok eski çağlardan beri çok

yönlü faydaları sebebi ile inşaat sektöründe kullanılan volkanik kül günümüzde yapılarda aranan uzun ömürlülük, hafiflik ve depreme, yangına dayanıklılık, şok emilmesi, elastikiyet, donma olaylarından etkilenmeme gibi niteliklerin öne çıkması sebebi ile her geçen gün volkanik külün kullanımı artmaktadır. Volkanik kül doymamış polyester, düşük erime sıcaklıklı cam, alüminyum-silika cam seramik ve seramik tuğlalarda kullanılır. Bu alanlara ilave olarak volkanik küllerin, polimerik malzemelerde inorganik takviye elemanı olarak kullanılabileceği düşünülmüştür.

Volkanik küller, mezogözenekli bir yapıya ve büyük yüzey alanına sahip inorganik takviye malzemeleri olarak bilinirler. Boşluklu yapısı sayesinde, bu boşlukların PPS malzeme içerisinde doldurulup, malzemenin geliştirilmesi muhtemel bulunmuştur. Yapılan çalışmalarda volkanik küllerin PPS kompozit malzeme içerisinde takviye elemanı olarak mekanik ve termal özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.

Hyundai ve kia otomotiv firmalarının mühendisleri maliyeti azaltmak için polipropilen ve polimer kompozit içerisinde volkanik kül kullanmışlardır. Buradaki bir diğer amaç ise, malzemeye kumaş görünümü kazandırabilmektir. Projenin hedefinin, araçlarda bulunan sütun giydirmelere daha iyi bir görünüm kazandırmak olduğu söylenmiştir. Parça başına ağırlıktan önemli oranda düşüş sağlanmasının yanında, çizilme direncinde gelişim, rahatsız edici koku konusunda ise büyük oranda azalma sağlanmıştır. Bu projede volkanik kül, cam kabarcıkları ve fiber parçacıkların tipini, boyutunu ve miktarını doğru belirlemek, malzemenin mekanik özellikleri ile kumaş görünüm sağlanması arasındaki dengeyi belli bir değerde tutmuştur. Volkanik küllerin mermer etkisi malzemede kumaş görünüm sağlanmasına büyük katkı sağlamıştır. Ayrıca volkanik küller, negatif iyon ve uzak kızılötesi ışınlar yayması ile malzemenin cazibesini arttırmıştır [30].

Tez çalışması süresince yapılan literatür araştırmaları sonucunda volkanik küllerin, PPS ile üretilmiş havacılık alanındaki parçalarda alternatif takviye malzemesi olarak kullanılabilirliği konusunda hiçbir çalışmaya rastlanmamıştır. Daha çok inşaat ve yapı sektörlerinde harç ve yapı elamanı üretiminde kullanımına rastlanmıştır. Sonuç olarak yapılan güncel literatür incelemesinde volkanik küllerin termoplastikler ile birlikte kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin, havacılık alanında kullanılabilirliğini mekanik ve termal açıdan inceleyen bir çalışma bulunamamıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzemeler

Tez çalışması kapsamında kompozit yapıyı oluşturacak polimer olarak PPS ve takviye elemanı olarak volkanik kül kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaç için temin edilmesi planlanan malzemeler ücretsiz olarak hibe yoluyla temin edilebilmiştir. Tez çalışmasında kullanılacak PPS polimeri Celanese firmasının Fortron 1200L1 ticari kodlu granül haldeki takviyesiz ekstrüder ve enjeksiyona uygun ürünüdür. Temin edilen PPS'nin fiziksel, mekanik ve ısıl özellikleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

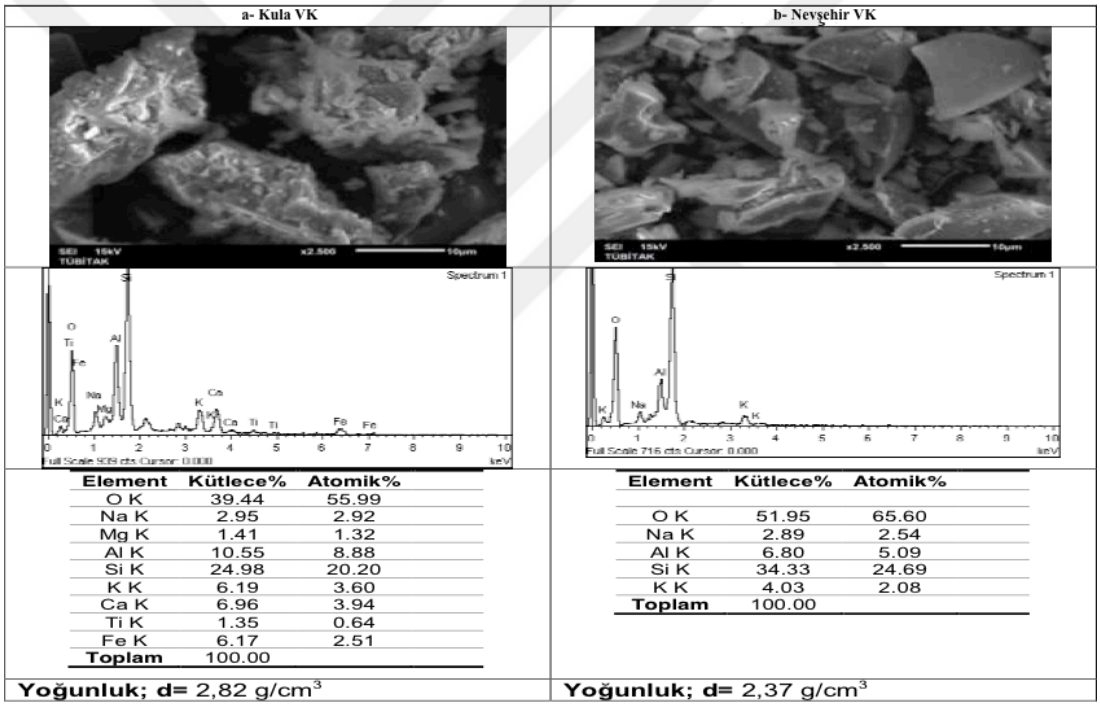
Tablo 2.1. PPS polimerin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri[22]

Fiziksel Özellikler	**Metrik**
Yoğunluk	1340 kg/m^3
Su Emilimi	%0.02
Mekanik Özellikleri	**Metrik**
Kopmada Çekme Gerilmesi	88 MPa
Çekme Modülü	4000 MPa
Eğme Dayanımı	141 MPa
Eğme Modülü	4100 MPa
Termal Özellikleri	**Metrik**
Erime Noktası	275℃
Cam Geçiş Sıcaklığı	90℃

Firma veri bilgisine göre yoğunluğu 1,34 g/cm^3 olup nem emme oranı ISO 62'ye göre % 0,02'dir. Takviye elemanı olarak kullanılacak volkanik küller "Kula" ve "Nevşehir" bölgelerinden olmak üzere iki tipte temin edilmiştir. Gelişme raporunda asidik ve bazik olarak tanımlanan küllerin anlam karmaşasına yol açtığı anlaşıldığından, bu anlam karmaşasının giderilmesi ve ürüne yönelik ticari çağrışım ve kolay ulaşım betimlemesi olması açısından tanımlamanın bölge isimlerine göre Kula ve Nevşehir olarak yapılması uygun görülmüştür. Her iki tür için yapılan elementel, mikroskop (TEM) ve yoğunluk analizi test sonuçları Şekil 2.1'de verilmiştir. Yoğunluk analizi "Quntachrome Ultrapycnometer 1000" marka helyum

piknometre cihazı ile, TEM analizi "JEOL 6335F JSM" marka taramalı elektron mikroskobu ile ve elementel analiz de TEM-EDS tekniği ile Tübitak Marmara Araştırma Merkezinde yapılmıştır.

Kula bölgesinden temin edilen volkanik külleri toz halde temin edilmiş olup sadece otomatik eleme yoluyla kullanıma hazır hale getirilmişken, Nevşehir bölgesinden temin edilen volkanik külleri yaklaşık 5 mm boyutunda olduklarından öncelikle bir öğütme işleminden geçirilmiş ardından otomatik eleme ile hazır hale getirilmiştir. Otomatik eleme sonrası boyutları "<71 μm" olarak istiflenen hem Kula hem de Nevşehir bölgesinden temin edilen volkanik külleri kompozit üretimi için kütlece % 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında tartılarak PPS ile karıştırılmak üzere hazırlanmıştır.



Element	Kütlece%	Atomik%
O K	39.44	55.99
Na K	2.95	2.92
Mg K	1.41	1.32
Al K	10.55	8.88
Si K	24.98	20.20
K K	6.19	3.60
Ca K	6.96	3.94
Ti K	1.35	0.64
Fe K	6.17	2.51
Toplam	100.00	

Yoğunluk; d= 2,82 g/cm^3

Element	Kütlece%	Atomik%
O K	51.95	65.60
Na K	2.89	2.54
Al K	6.80	5.09
Si K	34.33	24.69
K K	4.03	2.08
Toplam	100.00	

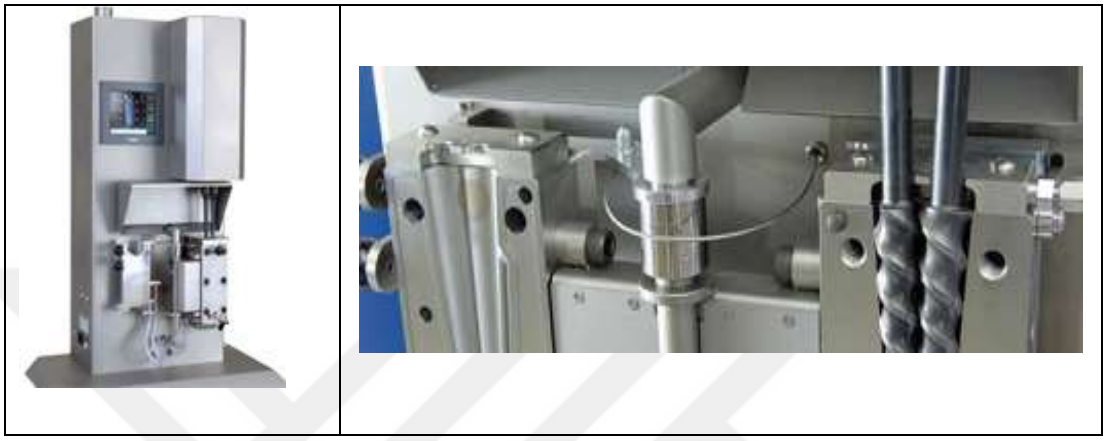
Yoğunluk; d= 2,37 g/cm^3

Şekil 2.1. Kula ve Nevşehir bölgelerinden temin edilen volkanik küllerin TEM, elementel analiz ve yoğunluk sonuçları

2.2. Ekstrüder ve Enjeksiyon ile VK/PPS Kompozitlerinin Üretimi

VK/PPS numunelerinin üretimi için ekstrüzyon cihazında karıştırma ve enjeksiyon cihazında kalıplama yöntemleri kullanılacaktır. Ekstrüzyon işlemi için DSM XPLORE firmasının 15 ml'lik hazneye sahip çift vidalı laboratuvar tipi karıştırıcısı (Micro-Compounder) kullanılacaktır (Şekil 2.2). Maksimum 400°C ve 250 d/dk'da çalışabilen bu cihazda sıcaklık kontrolünü sağlayan 6 adet termokupl bulunmaktadır.

Ekstrüder cihazı, beslenen polimerik malzemenin sıcaklıkla beraber eritilip katkı maddesi ile karıştırılması işlemini yapmaktadır. Ekstrüder cihazında hazırlanan ergiyik haldeki karışım malzemesinin arzu edilen standart test numunesi kalıbına basılması için DSM XPLORE firmasının 12 ml'lik hazneye sahip enjeksiyon kalıplama (Injection Moulding) cihazı kullanılacaktır (Şekil 2.3-a).



Şekil 2.2. DSM XPLORE marka ekstrüzyon cihazı (Micro-Compounder)

Ekstrüzyonda ergiyik halde hazırlanan malzeme enjeksiyon cihazına bir iletim ünitesi ile aktarılmaktadır (Şekil 2.3-b). Maksimum 400°C'lik çalışma sıcaklığına sahip taşınır haldeki iletim ünitesini ekstrüder çıkışına dayayıp, eriyiğin ünite içine dolduğundan emin olduktan sonra ünite enjeksiyon cihazındaki yerine yerleştirilecek ve ergiyik haldeki malzemenin maksimum 200°C'de çalışabilen numune kalıbına maksimum 12 bar'a ulaşabilen bir basınçla basılması sağlanacaktır.



Şekil 2.3. DSM XPLORE marka enjeksiyon cihazı ve iletim ünitesi

Ekstrüzyon ve enjeksiyon cihazında üretimin gerçekleşmesini sağlayacak etkin 7 adet parametre belirlenmiştir. Literatür araştırması ve çalışılması düşünülen polimer malzemesinin (PPS) özellikleri ile üretimi gerçekleştirecek olan cihazların çalışma

kapasiteleri göz önüne alınarak hangi 7 parametre ile ve bu parametrelerin hangi değerleri arasında çalışılması gerektiğine karar verilmiştir (Tablo 2.2).

Tablo 2.2. Üretim parametreleri ile en düşük ve en yüksek değerleri

Cihaz	Parametre	En Düşük Değer	En Yüksek Değer
Ekstrüzyon	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	300	340
Ekstrüzyon	Karıştırma Devri (d/dk)	50	100
Ekstrüzyon	Karıştırma Süresi (dk)	3	5
Enjeksiyon	Kalıp Sıcaklığı (°C)	140	150
Enjeksiyon	Enjeksiyon Basıncı (bar)	8	12
Enjeksiyon	Ütüleme Basıncı (bar)	8	12
Enjeksiyon	Ütüleme Süresi (s)	5	15

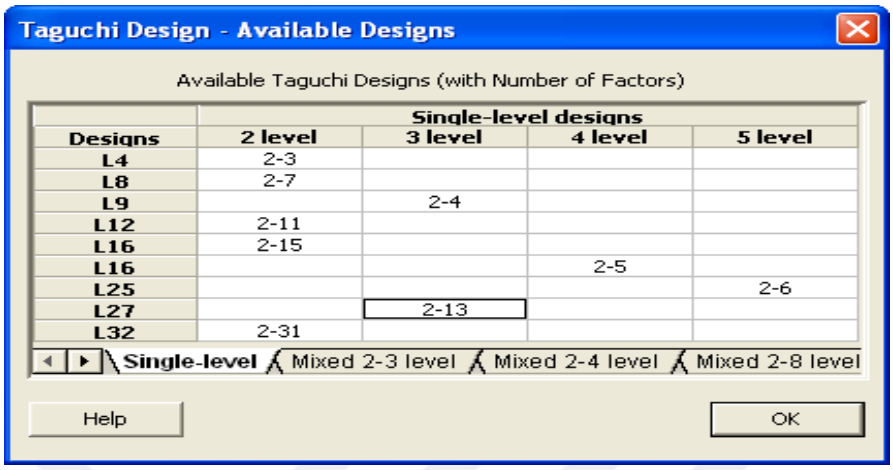
2.3. Taguchi Deney Tasarımı Metodu

PPS polimeri ile ekstrüder ve enjeksiyon cihazlarında üretilecek ürünün özelliklerinin arzu edilen optimum seviyelere getirilebilmesi için Taguchi deney tasarımı metodu kullanılacaktır. Üretimde belirlenen parametrelerin en düşük ve en yüksek değerlerine göre deney tasarımına uygun olarak seviye ve faktörler Tablo 2.3'te gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Deney tasarımı için belirlenen seviye ve faktörler

Parametreler	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	300	320	340
Karıştırma Devri (d/dk)	50	75	100
Karıştırma Süresi (dk)	3	4	5
Kalıp Sıcaklığı (°C)	140	145	150
Enjeksiyon Basıncı (bar)	8	10	12
Ütüleme Basıncı (bar)	8	10	12
Ütüleme Süresi (s)	5	10	15

Şekil 2.4'de görüldüğü üzere 7 faktör (2-13) ve 3 seviye için L27 Taguchi deseni kullanılması düşünülmektedir.



Şekil 2.4. Minitab programında yapılan Taguchi tasarımı

Tablo 2.4'te denemesi yapılacak 27 farklı kombinasyon bulunmaktadır. Tüm kombinasyonları denemek istersek tam faktöriyel deney için 2187 adet numune denemesi gerekirken, kısmı faktöriyel ile 27 adet deney gerçekleştirilecektir ki bu da hem maliyet hem de zaman açısından tasarruf sağlayacaktır. Deneysel sonuçlardan birçok sinyal-gürültü (signal-to-noise) (S/N) oranı hesaplanacaktır. PPS polimerinden üretilen ürünlerin özelliklerinin en yüksek değerlerini elde edebilmek için "en büyük en iyi" karakteristiği kullanılacaktır. Analizler için "en büyük en iyi" karakteristiğini;

$$\eta=-10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \qquad (2.1)$$

şeklinde tanımlayan denklem 2.1 kullanılacaktır. Bunun yanında "en küçük en iyi" karakteristiğini;

$$\eta=-10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2\right) \qquad (2.2)$$

şeklinde tanımlayan denklem 2.2 kullanılacaktır. Bu eşitlikte "η" "en büyük en iyi" durumu için S/N oranını; "y_i" deneyde elde edilen değeri; "n" ise her bir test için tekrarlı numune sayısını ifade etmektedir. S/N oranları yanında hangi parametrenin ürün özelliklerini hangi derecede etkilediğini tespit edebilmek için varyans analizleri "analysis of variance" (ANOVA) deneysel veriler üzerinde kullanılacaktır.

Tablo 2.4. L27 (3^7) Taguchi tasarımı

Deney No	Karıştırma Sıcaklığı(°C)	Karıştırma Devri(d/dk)	Kalıp Sıcaklığı	Karıştırma Süresi(dk)	Enjeksiyon Basıncı(bar)	Ütüleme Basıncı(bar)	Ütüleme Süresi(s)
1	300	50	140	3	8	8	5
2	300	50	140	3	10	10	10
3	300	50	140	3	12	12	15
4	300	75	145	4	8	8	5
5	300	75	145	4	10	10	10
6	300	75	145	4	12	12	15
7	300	100	150	5	8	8	5
8	300	100	150	5	10	10	10
9	300	100	150	5	12	12	15
10	320	50	145	5	8	10	15
11	320	50	145	5	10	12	5
12	320	50	145	5	12	8	10
13	320	75	150	3	8	10	15
14	320	75	150	3	10	12	5
15	320	75	150	3	12	8	10
16	320	100	140	4	8	10	15
17	320	100	140	4	10	12	5
18	320	100	140	4	12	8	10
19	340	50	150	4	8	12	10
20	340	50	150	4	10	8	15
21	340	50	150	4	12	10	5
22	340	75	140	5	8	12	10
23	340	75	140	5	10	8	15
24	340	75	140	5	12	10	5
25	340	100	145	3	8	12	10
26	340	100	145	3	10	8	15
27	340	100	145	3	12	10	5

VK/PPS kompozitlerin mekanik, termal ve tribolojik özellikleri inceleneceği için takviyesiz saf PPS ürünlerinin de aynı özellikler açısından proses optimizasyonu yapılmıştır. Her bir özellik kendi içinde ayrı ayrı optimize edilmiştir.

2.4. Üretilen PPS ve VK/PPS Kompozit Malzemelerinin Özelliklerinin İncelenmesi İçin Kullanılan Test ve Analiz Metotları

2.4.1. Çekme testi

ISO 527-2/5A standardındaki kalıba göre elde edilen numunelerin çekme özelliklerinin tespiti için "Shimadzu AG-X Universal Tester" (Şekil 2.5) cihazı kullanılacaktır. ISO 527-2 standardına göre 1 mm/dk'lık çekme hızı ile testler uygulanacak ve Trapezium-X Programı ile veriler kaydedilecektir. Her grup için beşer (5) numune test edilip standart sapma hesaplanacaktır.



Şekil 2.5. Shimadzu AG-X
marka universal test cihazı

2.4.2. Eğilme testi

80 x 10 x 4 mm^3 boyutlarında üretilen PPS ve kompozitlerinin eğilme dayanım ve modül değerlerinin tespiti için üç nokta eğilme testleri 10kN'luk yük hücresine sahip Shimadzu AG-X test cihazı ile 2 mm/dk hızda (Şekil 2.5) gerçekleştirilecektir. Her grup için 5'er numune ASTM D790 standardına göre test edilecek ve standart sapma hesaplanacaktır. Eğilme dayanımı ve modülü sonuçları Trapezium-X programı ile kaydedilecektir.

2.4.3. Diferansiyel taramalı kalorimetre (differential scanning calorimetry-DSC)

DSC bir malzemenin ısı emilimini ya da ısı kaybını sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçer ve kaydeder. Malzemenin sıcaklığa göre verdiği tepkiler o maddenin yapısı, saflığı ve dayanıklılığı gibi özellikleri hakkında bilgi verir. Üretilen numuneler sıcaklığa bağlı yapısal özelliklerinin belirlenmesi için DSC cihazında teste tabi tutulacaktır (Şekil 2.6). PPS malzemesinin tüm kristalleri dahil eridiği sıcaklık olarak belirlenen 340°C'ye 10°C/dk'lık sıcaklık artışı ile gidilerek test numunesinin sıcaklığa bağlı yapısal özelliklerindeki değişimler cihazın bilgisayar ortamındaki TA Universal Analysis programı ile incelenecektir [31]. Testlerde yaklaşık 10 mg'lık numuneler alüminyum kaplar (pan-lid) içinde izole şekilde hazırlanacaktır.



Şekil 2.6. TA Instruments DSC Q200 cihazı

2.4.4. Dinamik mekanik termal analiz (DMTA)

Dinamik mekanik termal analiz (DMTA); malzemelerin viskoz ve elastik davranışlarını anlatan dinamik ve termal malzeme özellikleri hakkında bilgi veren bir tekniktir. Bu dinamik testte zamanın periyodik fonksiyonu olan genlemedeki değişimler ölçülür. Yorulma testlerinin aksine, dinamik mekanik özellikler kalıcı deformasyonların olmadığı düşük genlemelerde ölçülür. Eğer bir sinüs dalga salınımlı gerilim tamamen elastik bir katıya uygulanırsa deformasyon ve genleme gerilmeyle birlikte tamamen aynı fazda olacaktır. Aynı sinüs dalga salınımlı gerilim viskoelastik bir katıya uygulanırsa genleme gerilmenin "δ" açısı kadar faz kayması gerçekleşir yani girdi ile yanıt arasında faz farkı oluşmaktadır. Belirli bir frekansta ($\omega=2\pi f$) zamanın fonksiyonu olarak uygulanan gerilme;

$$\sigma(t)=\sigma_0.\mathrm{Sin}(\omega t+\delta) \quad (2.3)$$

şeklinde denklem 2.3'te verilmiştir. Karışık dinamik modül (E*; uzama modunda);

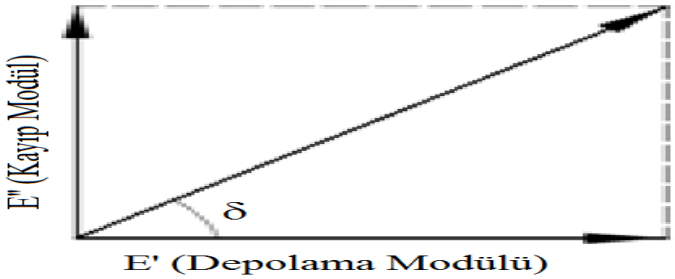
$$E^*=E'+i.E'' \quad (2.4)$$

şeklinde denklem 2.4'te tanımlanmıştır. Bu ifade $i=\sqrt{-1}$. E' olduğu zaman geçerlidir. Kayıp enerjinin depolanan enerjiye oranı tan δ (kayıp faktör) olarak adlandırılan faz açısının tanjantıdır. Bu eşitlik denklem 2.5'te;

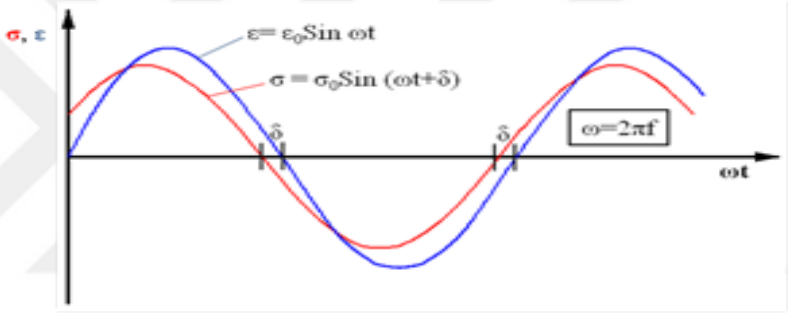
$$\tan\delta=[E''(\omega)]/[E'(\omega)] \quad (2.5)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Çok iyi bilinen modüller arasındaki bu ilişki Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Şekil 2.8'de gerilme genliği (ε) ile gerilme (σ) arasındaki faz açısı farkı açıkça görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ilk önce gerilme değeri daha sonra belirli bir gecikme ile gerilme genliği değeri sıfır olmaktadır.



Şekil 2.7. Depolama modülü E', kayıp modül E" ve kayıp faktör Tanδ arasında dinamik-mekanik ilişki

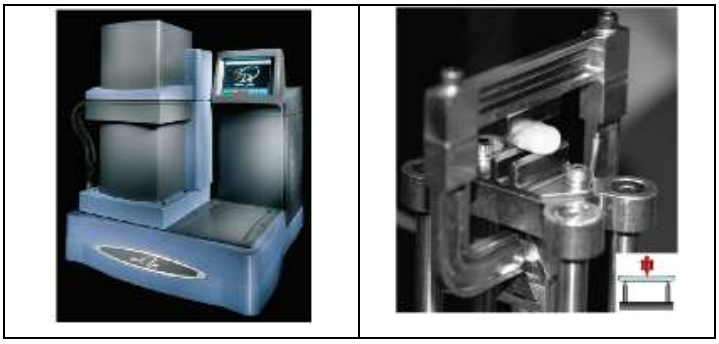


Şekil 2.8. Uygulanan frekans (f) değerinde sinüzoidal değişime sahip gerilme genliği (ε) ile gerilme (σ) arasındaki faz açısı (δ) farkı

DMTA ölçümleri sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki temel özellikleri verir:

- Polimerin ne kadar enerji depoladığını gösteren elastik modülünü (E').
- Polimerin ısıl olarak enerji dağıtabilme kabiliyetini gösteren viskoz modülünü (E").

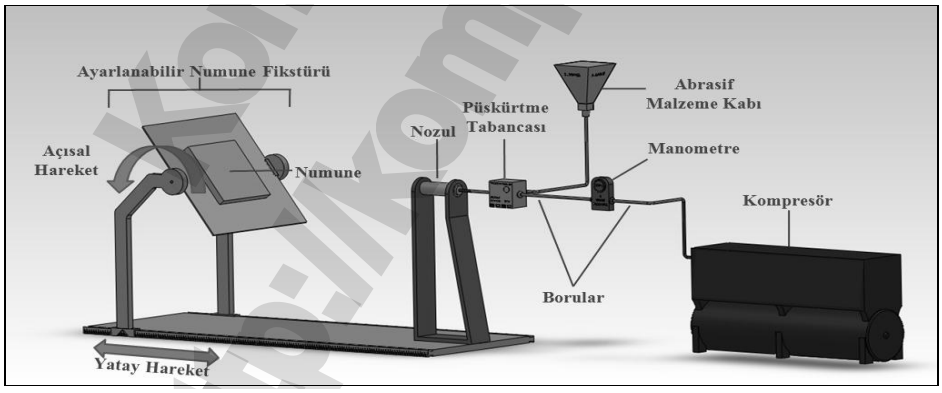
DMTA, DSC'nin çözünürlüğünün belirleyemediği küçük değişim bölgelerinin bile belirleyebilmektedir. Boyutu ISO standartlar toleransı kabulünde 28 x 4 x 2 mm^3 olan test numunesi dinamik, mekanik, termal analizler için TA Instruments firmasının ürettiği DMTA Q800 tipi cihazındaki üç nokta eğme aparatının (Şekil 2.9) sabit alt destek noktaları ile hareketli üst destek noktası arasına yerleştirilip fırın kapatılacaktır. Test numunesi için deney girdileri; frekans, genlik ve sıcaklık aralığıdır. DMTA tesleri 25°C –145°C aralığında 5°C/dakika ısıtma hızı ve 1 Hz'lik eğme frekansı ile yapılacaktır [32].



Şekil 2.9. TA Instruments DMTA Q800 cihazı ve kullanılan üç nokta eğme testi aparatı

2.4.5. Katı partikül erozyonu aşınma testi

Katı partikül erozif aşınma davranışı özel olarak tasarlanan Şekil 2.10'da şematik olarak gösterilen kumlama düzeneği ile gerçekleştirilecektir. Kumlama düzeneği basınçlı hava kompresörü, basınçlı hava tankı, kumlama kabini, numune sabitleyici ve kumlama tabancasından oluşmaktadır. Kumlama basıncı da kabin dışarısına yerleştirilen bir basınç regülatörü ile ayarlanmaktadır. Kumlama kabini içerisine numunenin sabitlenmesi ve numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtülmesini sağlayan özel bir numune tutucusu yerleştirilmiştir. Bu düzenek ile kabin içerisine sabitlenmiş kumlama tabancası, numunenin açısal olarak 15'er derece döndürülmesine olanak veren tutucunun hareketi ile numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtebilecektir. Kumlama işlemleri sırasında numuneler bu tutucu kullanılarak kumlama tabancasından 10 mm uzaklıkta tutulacaktır.



Şekil 2.10. Katı partikül erozyonu aşınma test düzeneğI şematik resmi

Malzemelerin katı partikül erozyonunu incelemek için aşındırıcı olarak 150-200 μm boyutlarındaki dairesel silika partikülleri kullanılacaktır. Katı partikül erozyonu

aşınma testi parametreleri ve değerleri Tablo 2.5'de verilmiştir (ASTM G76-13). Bu parametreler ışığında test gerçekleşecektir.

Tablo 2.5. Katı partikül erozyonu aşınma testi parametreleri

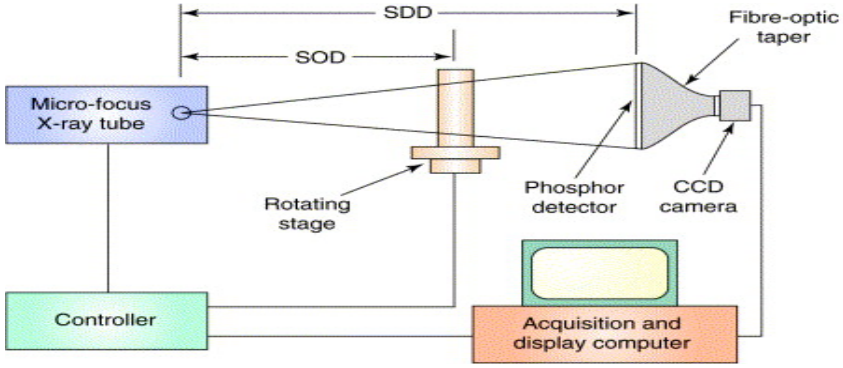
Aşındırıcı Partikül Boyutu (μm)	Püskürtme Basıncı (bar)	Süre (s)	Çarpma Açısı (º)
150-200	3	10	15-30-45-60-90

2.4.6. Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscopy-SEM) ile analiz

Üretimi yapılan numunelerin çalışma doğrultusunda mekanik testleri (çekme ve eğilme testleri) yapıldıktan sonra numune yüzeyleri ve hasar mekanizmalarının incelenmesi amacıyla TÜBİTAK-MAM'da bulunan "JEOL JSM-6335F" marka taramalı elektron mikroskobu kullanılacaktır. Hasara uğrayan numune yüzeyleri inceleme öncesi altın ile kaplanılarak hazırlanacaktır.

2.4.7. Bilgisayarlı mikro-tomografi ile analiz

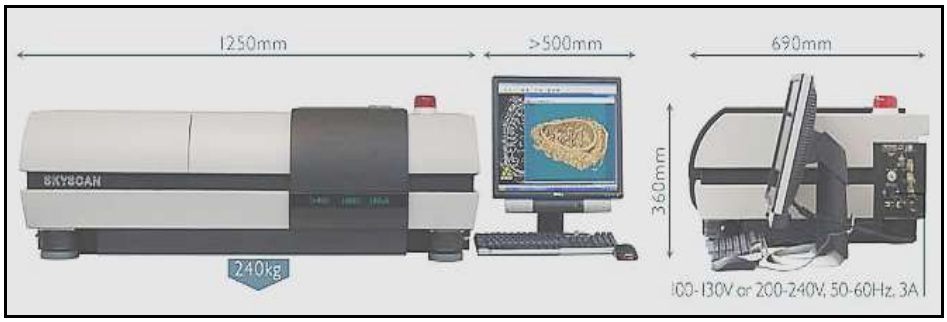
Şekil 2.11'de şematik çalışma prensibi görülen bilgisayarlı mikro-tomografi (mikro-CT) tıp alanındaki araştırmalarda kullanılmak üzere ortaya çıkmış, çalışma prensibi bilgisayarlı tomografi (CT) yöntemiyle eş olan fakat odak mesafesi kısalığından ötürü daha yüksek çözünürlükte içyapı görüntüleri alarak yeni görüntü işleme teknikleriyle üç boyutlu katı modeller elde etmeye yarayan görüntüleme tekniğidir.



Şekil 2.11. Bilgisayarlı mikro-tomografi cihazı çalışma prensibi

Mikro-bilgisayarlı tomografi yönteminde X ışını kaynağı olarak kullanılan tüp mikro boyutta odaklama özelliğine sahiptir. Mikro boyutta odaklama, incelenecek numunenin birim alanına etki eden X ışını yoğunluğunu artırmayı ve dolayısıyla birim alan çözünürlük miktarını artırmayı olanaklı kılar. X ışını kaynağından yayılan konik geometrili ışınlar incelenecek numuneye nüfuz ederek geçerler. Bu geçiş esnasında numune içyapısı ve katmanları arasındaki farklı yoğunluklu bölgeler farklı X ışını emilim değerlerine sahiptir. Bu emilim değerleri malzemeyi geçen X ışını yoğunluğunu direk olarak etkiler. Numuneden geçen x ışınlarını algılamak için bir CCD (charge coupled device = ışığa duyarlı yüzey) algılayıcı kullanılır. CCD algılayıcı, bir tabakanın üstüne dizilmiş ışığa duyarlı foto diyotlardan oluşur. Bunlar, düşen ışığı elektrik gerilimine çevirir. Ne kadar aydınlık olursa ışık hücresinde biriken gerilim de o kadar yüksek olur. Matrix gerilim, bir analog-dijital çevirici (ADC) ve işlemci vasıtası ile resme çevrilir. X ışınlarının kaynaktan çıkışı ile CCD algılayıcı tarafından algılanması bütün test numunesi yüzeyleri taranana kadar devam eder. Bu tarama esnasında test numunesi kendi etrafında bir derecelik açısal hızla döndürülür. Bu sayede numunenin 3 boyutlu taraması iki boyutta gerçekleştirilmiş olur. Daha sonra iki boyutlu açısal dilimler halinde elde edilmiş numuneye ait bir dizi görüntü bilgisayar görüntü işleme yazılımları sayesinde üst üste getirilerek birleştirilir. Bu birleştirme sonrasında iki boyutlu çekilmiş görüntü dilimleri üst üste konarak numunenin üç boyutlu bir katı modeli ortaya çıkarılmış olur.

Tez çalışması kapsamında üretilen Kula ve Nevşehir VK/PPS kompozitlerin içyapısındaki volkanik küllerin dağılımı Teknogem firmasından hizmet alımı gerçekleştirilerek numunelere ait mikro-CT taramaları SkyScan 1172 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.12).



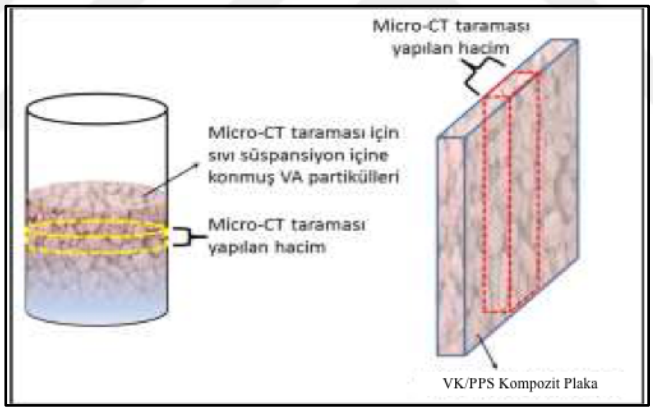
Şekil 2.12. SkyScan 1172 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihazı

SkyScan 1172 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihazının özellikleri Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6. SkyScan 1172 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihaz özellikleri

X – ışını kaynağı	20-100 kV, 10 W, <5µm nokta büyüklüğü
X – ışını algılayıcısı	11 Mp, 12-bit soğutmalı CCD
Maksimum numune	27 mm çapında (tek tarama) (100-140 mm tarama boyu)
Uzaysal çözünürlük	0,5 µm en yüksek çözünürlükte 7 - 8µm düşük kontrastta
Radyasyon Yayılımı	< 1 µSv / saat cihazın herhangi bir noktasında

VK/PPS kompozit numunelerden elde edilen mikro-CT taramalarına ait görüntü dilimleri, volkanik küllerin yalın halde Kula ve Nevşehir olmak üzere tanecik halinde görüntüleri ile Kula VK/PPS ve Nevşehir VK/PPS şeklinde %25 takviyeli kompozitlerden elde edilmiştir. Taramaların nerelerden yapıldığının şematik gösterimi Şekil 2.13'de verilmiştir.



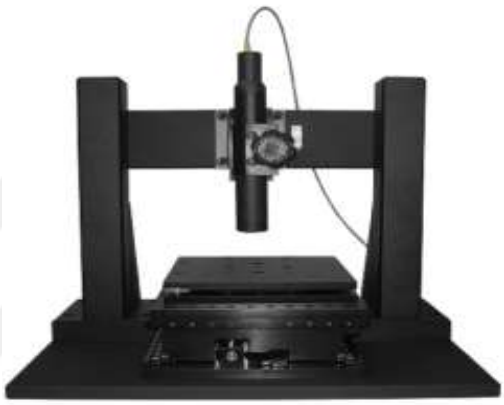
Şekil 2.13. Tomografi taramalarının malzeme üzerinde yapıldığı bölgeler

Tomografik taramalar sonucu her bir tarama başına 2439 adet görüntü dilimi elde edilmiştir. Elde edilen görüntü dilimleri üç boyutlu görüntü işleme programları yardımıyla özel algoritmalar kullanılarak işlenmiş ve incelemeler gerçekleştirilmiştir.

2.4.8. Lazer 3D optik profilometre ile analiz

Katı partikül erozyonu sonucu aşınan yüzeylerin aşınma davranışı açısından incelenmesi amacıyla "Nanovea PS50" marka 3D optik profilometre cihazı kullanılacaktır (Şekil 2.14).

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sonucu aşınma yüzeylerinin 3D topografyaları Mountain Software programı kullanılarak oluşturulacaktır. Bu topografya görüntülerinde maksimum tepe yükseklikleri ve maksimum hasar krateri derinlikleri ölçülebilecektir. Ayrıca tepe ve hasar kraterlerinin incelenen yüzeyde istatistiksel yüzey dağılımı elde edilecektir. Bu sayede, katı partikül erozyonu sonucu ortaya çıkan birinci dereceden önemli yüzey aşınma ve pürüzlülük karakteristikleri deneysel parametrelerle ilişkilendirilecektir. Bu sonuçlar ışığında üretilen VK/PPS kompozitlerinin yüzeylerinin katı partikül erozyonuna karşı dayanımları ortaya konacaktır.



Şekil 2.14. Nanovea PS50 marka lazer 3D optik profilometre cihazı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. PPS Polimerinin Taguchi Deney Tasarımı Metodu ile Optimizasyonu; Ekstrüder ve Enjeksiyon ile Üretilecek Olan Saf PPS Polimerinin Optimum Mekanik, Termal ve Tribolojik Özelliklerinin Sağlanması

3.1.1. Saf PPS'nin termal açıdan erime ve kristallenme özellikleri için proses optimizasyonu

Saf PPS'nin termal özelliklerinden erime sıcaklığı ve erime entalpisinin en büyük değerlerinin sağlanması için proses optimizasyonu yapılmıştır. Sonuçlar "Minitab 14" programı ile analiz edilmiştir. En yüksek erime sıcaklığının elde edilmesini sağlayan parametrelerin katkı oranları ve S/N oranları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1'deki S/N oranlarını incelediğimizde en yüksek erime sıcaklığının elde edilmesi için karıştırma sıcaklığının 340°C, karıştırma devrinin 75-100 d/dk, kalıp sıcaklığının 145-150°C, karıştırma süresinin 5 dk, enjeksiyon basıncının 12 bar, ütüleme basıncının 12 bar ve ütüleme süresinin 5-10 sn seviyelerinin seçilmesi gerekmektedir.

ANOVA analizi sonucunda %95 güven aralığına göre ($F_{2,12}$=3,89; P=0,024) en yüksek erime sıcaklığı için "karıştırma sıcaklığı" (F=298,20) parametresi en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca sırasıyla "enjeksiyon basıncı", "karıştırma süresi" ve "kalıp sıcaklığı" parametreleri de erime sıcaklığının en yüksek değeri sağlaması için etkilidirler. Ancak diğer geri kalan "karıştırma devri", "ütüleme basıncı" ve "ütüleme süresi" parametreleri erime sıcaklığı üzerinde çok küçük etkiye sahiptir.

Tablo 3.1. Saf PPS'nin erime sıcaklığı için proses optimizasyonu sonuçları

	S/N Oranları									Güven aralığı (%95)
Parametreler	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**1**	**2**	**3**	**Sıra**	**P**	**F**	**$F_{2,12}$=3,89; P=0,024**
Karıştırma sıcaklığı	48,87	48,90	**48,95**	300	320	**340**	1	0,000	298,20	**XXXXX**
Karıştırma devri	48,90	**48,91**	**48,91**	50	**75**	**100**	7	0,125	2,48	
Kalıp sıcaklığı	48,90	**48,91**	**48,91**	140	**145**	**150**	4	0,019	5,59	**X**
Karıştırma süresi	48,90	48,91	**48,92**	3	4	**5**	3	0,001	13,24	**XX**
Enjeksiyon basıncı	48,90	48,91	**48,92**	8	10	**12**	2	0,000	21,60	**XXX**
Ütüleme basıncı	48,90	48,90	**48,91**	8	10	**12**	5	0,107	2,71	
Ütüleme süresi	**48,91**	**48,91**	48,90	**5**	**10**	15	6	0,114	2,62	

En yüksek erime entalpisi değerinin elde edilmesini sağlayan parametrelerin katkı oranları ve S/N oranları Tablo 3.2'de verilmiştir. Tablo 3.2'deki S/N oranlarına göre en yüksek erime entalpisi değerinin sağlanması için karıştırma sıcaklığının 340°C, karıştırma devrinin 75 d/dk, kalıp sıcaklığının 150°C, karıştırma süresinin 5 dk, enjeksiyon basıncının 10 bar, ütüleme basıncının 12 bar ve ütüleme süresinin 10 sn seviyelerinin seçilmesi gerektiği tespit edilmiştir.

Tablo 3.2. Saf PPS'nin erime entalpisi için proses optimizasyonu sonuçları

	S/N Oranları									Güven aralığı (%95)
Parametreler	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**1**	**2**	**3**	**Sıra**	**P**	**F**	**$F_{2,12}$=3,89; P=0,024**
Karıştırma sıcaklığı	32,22	32,19	**32,51**	300	320	**340**	1	0,050	3,90	**X**
Karıştırma devri	32,30	**32,38**	32,25	50	**75**	100	3	0,582	0,57	
Kalıp sıcaklığı	32,18	32,37	**32,38**	140	145	**150**	2	0,234	1,64	
Karıştırma süresi	32,15	32,33	**32,45**	3	4	**5**	7	0,107	2,71	
Enjeksiyon basıncı	32,25	**32,43**	32,25	8	**10**	12	6	0,325	1,23	
Ütüleme basıncı	32,28	32,30	**32,35**	8	10	**12**	5	0,867	0,14	
Ütüleme süresi	32,26	**32,34**	32,33	5	**10**	15	4	0,771	0,27	

ANOVA analizi sonucunda %95 güven aralığına göre ($F_{2,12}$=3,89; P=0,024) en yüksek erime entalpisi değeri için yine "karıştırma sıcaklığı" (F=3,90) parametresi en etkin parametre olarak tespit edilmiştir. Ancak, erime sıcaklığının proses optimizasyonu sonuçlarından farklı olarak "karıştırma sıcaklığı" haricindeki parametrelerin erime entalpisi üzerine pek etkili olduğu söylenemez. Her iki termal özellik açısından en etkin parametre olan karıştırma sıcaklığının en etkin seviyesi 340 °C olarak görülmektedir. Bu durum PPS'nin termodinamik erime sıcaklığının 340°C olması ile ilişkilendirilebilir. Bu durumu destekleyen bazı çalışmalara göre

tam erime sağlanması ve özellikle kristalleşme esnasında çekirdek olarak davranabilecek kalıntı kristallerin dahi parçalanması için saf PPS termodinamik erime sıcaklığı olan 340°C civarlarına kadar ısıtılmalıdır [25,26]. Optimize edilmiş prosese göre üretilen saf PPS'nin termal özelliklerinin doğrulanması için doğrulama üretimi optimum parametre ve seviyelerine göre yapılmıştır. Doğrulama testleri yapılıp elde edilen erime sıcaklığı ve erime entalpisi sonuçları Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Optimize edilmiş prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin termal özelliklerinin doğrulama test sonuçları

Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Devri (d/dk)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Süresi (dk)	Enjeksiyon Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (bar)	Ütüleme Süresi (sn)	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (J/g)
340	75	150	5	12	12	10	280,67±26	43,14±49

Optimum parametre seviyeleri olarak maliyet de göz önünde bulundurulduğunda, karıştırma sıcaklığının 340°C, karıştırma devrinin 75 d/dk, kalıp sıcaklığının 150°C, karıştırma süresinin 5 dk, enjeksiyon basıncının 12 bar, ütüleme basıncının 12 bar ve ütüleme süresinin 10 sn seviyeleri seçilmiştir. Optimum prosese göre üretilen saf PPS'nin erime sıcaklığı 280,67±26°C ve erime entalpisi 43,14±49 J/g olarak en yüksek değerlerini almıştır. Gopakumar ve diğ. PPS/termotropik sıvı kristalin polimer karışımlarının termal özelliklerini incelemişler ve PPS'nin erime sıcaklığı ve erime entalpisi değerlerini sırasıyla 282°C ve 43,9 J/g olarak bulduklarını rapor etmişlerdir [37]. Çağlar ve diğ. karbon nanotüp takviyeli PPS kompozitlerini çift vidalı mikro-karıştırıcı ve enjeksiyon kalıplama prosesi ile üretmişlerdir. İnceledikleri DSC sonuçlarına göre saf PPS'nin erime sıcaklığı ve erime entalpisi değerlerini sırasıyla 282,01°C ve 43,70 J/g olarak raporlamışlardır [33]. Elde edilen bu literatür sonuçlarına kıyasla tez çalışmasında yapılan proses optimizasyonu sonucu elde edilen termal özelliklerin kabul edilebilir seviyelerde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak elde edilen bu termal özellikler volkanik kül takviyesi ile etkilenip etkilenmeyeceklerinin incelenmesi amacıyla referans değerler olarak kaydedilmiştir.

3.1.2. Saf PPS'nin dinamik mekanik termal özellikleri için proses optimizasyonu

Saf PPS'nin dinamik mekanik özelliklerin incelenmesi için dinamik mekanik termal analiz (DMTA) metodu kullanılmıştır. Analiz sonuçları depolama modülü (E'), kayıp modül (E''), kayıp faktörü (tanδ) ve camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olarak rapor edilmiştir. Depolama modülü malzemenin tersinir elastiklik ölçüsü olarak malzeme içinde depolanan enerji diye tanımlanır. Kayıp modül test esnasında malzeme içinde ısıya dönüşen mekanik enerji ölçüsü olarak bilinir. Kayıp modülün depolama modülüne göre daha yüksek olması mekanik kaybın daha yüksek olduğunu gösterir. Süspansiyon (damping) performans ile rijitlik arasında daha uygun bir bağıntı kurmak için kayıp faktör tanımı kullanılacaktır. Kayıp faktör herhangi bir sıcaklık anında kayıp modülün depolama modülüne bölünmesi ile bulunur. Bu sebeple depolama modülü ve kayıp modülü ayrı ayrı proses optimizasyonuna tabi tutulmadan sadece kayıp faktörün proses optimizasyonu yapılmıştır. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ise kayıp faktörün sıcaklığa bağlı olarak çizilen eğrisinde en yüksek seviyesini aldığı sıcaklık olarak incelenecektir.

Saf PPS'nin dinamik mekanik özellikleri (tanδ ve T_g) istenilen seviyelerde sağlanması için Taguchi metodu kullanılmıştır. Tanδ değerinin daha iyi performans için en düşük değerini almasını bekleriz. Bu nedenle proses optimizasyonu "en küçük en iyi" karakteristiğine göre yapılmıştır. En düşük tanδ değerinin elde edilmesini sağlayan parametrelerin katkı oranları ve S/N oranları Tablo 3.4'te verilmiştir. Açıkça görülmektedir ki, S/N oranlarına göre en düşük tanδ'nın elde edilmesi için karıştırma sıcaklığının 340°C, karıştırma devrinin 75 d/dk, kalıp sıcaklığının 145°C, karıştırma süresinin 4 dk, enjeksiyon basıncının 12 bar, ütüleme basıncının 8 bar ve ütüleme süresinin 5 sn seviyelerinin seçilmesi gerekmektedir. ANOVA analizi sonucunda %95 güven aralığına göre ($F_{2,12}$=3,89; P=0,024) tanδ istenilen değerde elde edilmesinde en etkili parametre olarak "karıştırma sıcaklığı" (F=16,30) bulunmuştur. Diğer parametrelerin tanδ üzerinde pek etkili olduğu söylenemez. En etkili parametre olan karıştırma sıcaklığının en etkin seviyesinin de yine 340°C olduğu göze çarpmaktadır.

Tablo 3.4. Saf PPS'nin tanδ için proses optimizasyonu sonuçları

	S/N Oranları									Güven aralığı (%95)
										$F_{2,12}$=3,89; P=0,024
Parametreler	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**1**	**2**	**3**	**Sıra**	**P**	**F**	
Karıştırma sıcaklığı	12,34	12,29	**12,77**	300	320	**340**	1	0,000	16,30	**X**
Karıştırma devri	12,44	**12,50**	12,46	50	**75**	100	6	0,793	0,24	
Kalıp sıcaklığı	12,38	**12,52**	12,49	140	**145**	150	5	0,353	1,14	
Karıştırma süresi	12,44	**12,49**	12,46	3	**4**	5	7	0,844	0,17	
Enjeksiyon basıncı	12,38	12,47	**12,54**	8	10	**12**	3	0,285	1,40	
Ütüleme basıncı	**12,55**	12,48	12,36	**8**	10	12	2	0,149	2,24	
Ütüleme süresi	**12,54**	12,39	12,46	**5**	10	15	4	0,297	1,34	

Arzu edilen özellikler açısından T_g'nin yüksek çıkmasını sağlayacak parametrelerin katkı oranları ve S/N oranları Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. Saf PPS'nin T_g için proses optimizasyonu sonuçları

	S/N Oranları									Güven aralığı (%95)
Parametreler	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**1**	**2**	**3**	**Sıra**	**P**	**F**	**$F_{2,12}$=3,89; P=0,024**
Karıştırma sıcaklığı	40,10	40,16	**40,21**	300	320	**340**	1	0,000	45,55	**XXXX**
Karıştırma devri	40,12	**40,18**	40,17	50	**75**	100	3	0,001	12,82	**XXX**
Kalıp sıcaklığı	**40,17**	**40,17**	40,13	**140**	**145**	150	4	0,006	8,10	**XX**
Karıştırma süresi	40,12	40,17	**40,18**	3	4	**5**	2	0,001	12,83	**XXX**
Enjeksiyon basıncı	40,14	**40,17**	**40,17**	8	**10**	**12**	5	0,029	4,80	**X**
Ütüleme basıncı	40,15	**40,17**	40,14	8	**10**	12	6	0,117	2,57	
Ütüleme süresi	**40,16**	**40,16**	40,15	**5**	**10**	15	7	0,689	0,38	

Taguchi analizinde elde edilen S/N oranlarına bakıldığında en yüksek T_g'nin elde edilmesi için karıştırma sıcaklığının 340°C, karıştırma devrinin 75 d/dk, kalıp sıcaklığının 140-145°C, karıştırma süresinin 5 dk, enjeksiyon basıncının 10-12 bar, ütüleme basıncının 10 bar ve ütüleme süresinin 5-10 sn seviyelerinin seçilmesi gerektiği görülmektedir. Parametrelerin etkinlik derecelerinin tespit eden ANOVA sonuçlarına göre %95 güven aralığında ($F_{2,12}$=3,89; P=0,024) en etkin parametrelerin sırasıyla karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi, karıştırma devri, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon basıncı olduğu görülmektedir. Ayrıca ütüleme basıncı ve ütüleme süresinin T_g üzerinde etkin olmadığı da tespit edilmiştir.

Tanδ ve T_g'nin istenilen seviyelerinin beraber elde edilmesini sağlayacak parametre ve seviyelerinin doğrulanması için doğrulama proses parametre ve seviyeleri Tablo 3.4 ve 3.5'e göre seçilmiş olup Tablo 3.6'da test sonuçları ile birlikte verilmiştir.

Optimum proses parametre seviyelerinden eşit etkide olanlarından seçim yapılırken minimum maliyet ve işçilik göz önünde bulundurulmuştur.

Tablo 3.6. Optimize edilmiş prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin dinamik mekanik termal özelliklerinin doğrulama test sonuçları

Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Devri (d/dk)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Süresi (dk)	Enjeksiyon Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (bar)	Ütüleme Süresi (sn)	tanδ	T_g (°C)
340	75	145	5	12	10	5	0,2309±0,0031	111,90±0,37

Optimum prosese göre üretilen doğrulama numunelerinin test sonuçlarına bakıldığında tanδ'nın 0,2309±0,0031 ve T_g'nin 111,90±0,37°C çıktığı görülmektedir. Lu ve diğ. moleküler ağırlığın PPS'nin yapı ve özelliklerine etkisini incelemişler. Tanδ'nın en yüksek seviyesini 0,24 olarak rapor etmişler [34]. Benzer bir sonuç olarak Zhang ve diğ. ise tanδ'nın 0,24 olduğunu yapmış oldukları çalışmada tespit etmişler [14]. Tüm bu ilgili literatür çalışmaları dikkatlice incelendiğinde proses optimizasyonu olmadan dinamik mekanik analiz sonuçlarının optimum değerlerinin elde edilemediği açıkça görülmektedir. Çünkü karşılaştırma yapacak olursak bu tez çalışmasında elde edilen tanδ ve T_g değerleri literatür verilerine kıyasla daha iyi seviyelerde olduğu açıktır. Bu nedenle proses optimizasyonu sonucu en etkin parametre ve seviye olarak görülen "karıştırma sıcaklığı" ve 340°C seviyesi doğrulama testlerini başarılı kılmıştır. Bunun yanında minimum maliyet göz önünde bulundurularak sırasıyla karıştırma süresi olarak 5 dk, karıştırma devri olarak 75 d/dk, kalıp sıcaklığı olarak 145°C ve enjeksiyon basıncı olarak 10 bar en iyi dinamik mekanik özelliklerin tespitinde etkin rollerini başarılı şekilde doğrulamışlardır.

3.1.3. Saf PPS'nin mekanik açıdan eğilme özellikleri için proses optimizasyonu

PPS'nin mekanik özelliklerinden eğilme dayanımı ve modülü değerleri de Taguchi deney tasarımı metodu kullanılarak en iyi seviyede elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla üretim optimizasyonu yapılan PPS'nin eğilme dayanımının "en yüksek en iyi" karakteristiğine göre yapılan Taguchi analizi sonuçlarından S/N oranları ve parametrelerin katkı oranları Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7'deki S/N oranları incelendiğinde en yüksek eğilme dayanımını sağlayacak parametre seviyelerinin karıştırma sıcaklığı için 340°C, karıştırma devri için 100

d/dk, kalıp sıcaklığı için 150°C, karıştırma süresi için 5 dk, enjeksiyon basıncı için 12 bar, ütüleme basıncı için 8 bar, ütüleme süresi için 15 sn olduğu tespit edilmiştir. ANOVA analizi sonucunda %95 güven aralığına göre ($F_{2,12}$=3,89; P=0,024) en yüksek eğilme dayanımı için en etkin parametrenin yine karıştırma sıcaklığı olduğunu, bunun yanında karıştırma devri ve kalıp sıcaklığı parametrelerinin de nispeten etkin olduklarını söyleyebiliriz. Ancak geriye kalan parametrelerin eğilme dayanımı üzerinde pek etkisi olmadığı açıkça görülmektedir.

Tablo 3.7. Saf PPS'nin eğilme dayanımı için proses optimizasyonu sonuçları

	S/N Oranları									**Güven aralığı (%95)**
Parametreler	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**1**	**2**	**3**	**Sıra**	**P**	**F**	**$F_{2,12}$=3,89; P=0,024**
Karıştırma sıcaklığı	41,97	42,12	**42,39**	300	320	**340**	1	0,000	37,64	**XXX**
Karıştırma devri	42,06	42,20	**42,23**	50	75	**100**	2	0,011	6,75	**XX**
Kalıp sıcaklığı	42,08	42,18	**42,22**	140	145	**150**	3	0,025	5,09	**X**
Karıştırma süresi	42,10	42,17	**42,21**	3	4	**5**	4	0,082	3,10	
Enjeksiyon basıncı	42,15	42,15	**42,18**	8	10	**12**	6	0,731	0,32	
Ütüleme basıncı	**42,18**	42,15	42,16	**8**	10	12	7	0,840	0,18	
Ütüleme süresi	42,11	42,18	**42,19**	5	10	**15**	5	0,276	1,43	

PPS'nin eğilme modülünün de yüksek olması arzu edildiğinden "en yüksek en iyi" karakteristiğine göre yapılan Taguchi analizi sonuçlarından S/N oranları ve parametrelerin etkinlik dereceleri Tablo 3.8'de verilmiştir. Tablo 3.8'deki S/N oranlarına göre en yüksek eğilme modülünü sağlayacak üretim parametre seviyeleri karıştırma sıcaklığı için 340°C, karıştırma devri için 50 d/dk, kalıp sıcaklığı 150°C, karıştırma süresi 3 dk, enjeksiyon basıncı 12 bar, ütüleme basıncı 12 bar ve ütüleme süresi 10 sn olarak tespit edilmiştir.

Tablo 3.8. Saf PPS'nin eğilme modülü için proses optimizasyonu sonuçları

	S/N Oranları									**Güven aralığı (%95)**
Parametreler	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**1**	**2**	**3**	**Sıra**	**P**	**F**	**$F_{2,12}$=3,89; P=0,024**
Karıştırma sıcaklığı	71,31	71,56	**71,62**	300	320	**340**	1	0,001	12,36	**XX**
Karıştırma devri	**71,56**	71,48	71,46	**50**	75	100	3	0,326	1,23	
Kalıp sıcaklığı	71,46	71,51	**71,53**	140	145	**150**	7	0,547	0,63	
Karıştırma süresi	**71,54**	71,51	71,44	**3**	4	5	4	0,377	1,06	
Enjeksiyon basıncı	71,44	71,52	**71,53**	8	10	**12**	6	0,367	1,09	
Ütüleme basıncı	71,46	71,48	**71,55**	8	10	**12**	5	0,374	1,07	
Ütüleme süresi	71,42	**71,56**	71,51	5	**10**	15	2	0,152	2,21	

ANOVA analizi sonucunda %95 güven aralığında ($F_{2,12}$=3,89; P=0,024) en yüksek eğilme modülü için en etkin parametrenin "karıştırma sıcaklığı" olduğu görülmektedir. Diğer tüm parametrelerin eğilme modülü üzerinde etkisi olduğu söylenemez.

Eğilme özellikleri endüstrideki uygulama alanına bağlı olarak farklı gereksinimler duyabilir. Örneğin bir uygulama için eğilme dayanımı daha önemli iken başka bir uygulama alanı için eğilme modülü daha önemli olabilir. Bu gibi durumlarda hangi özellik daha önemli ise ona göre üretim optimizasyonu yapılması gerekmektedir. Bu amaçla eğilme özellikleri hem ayrı ayrı hem de bütünleşik olarak yani hem eğilme dayanımını hem de eğilme modülünü en yüksek seviyede elde edebilecek şekilde doğrulama üretimine ve testlerine tabi tutulmuştur. Önce eğilme dayanımı Tablo 3.9'da verilen optimum üretim parametre ve seviyelerine göre doğrulama üretimine ve testlerine tabi tutulmuş, sonuçları ise yine Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9. Optimize edilmiş eğilme dayanımı prosesine göre üretilen saf PPS numunelerinin doğrulama test sonuçları

Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Devri (d/dk)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Süresi (dk)	Enjeksiyon Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (bar)	Ütüleme Süresi (sn)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)
340	100	150	5	12	8	15	120,7±0,9	3337,35± 26

Eğilme modülünün en yüksek seviyede elde edilmesi için daha sonra Tablo 3.10'da verilen optimum üretim parametre ve seviyelerine göre doğrulama üretimine ve testlerine tabi tutulmuş, sonuçları ise yine Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10. Optimize edilmiş eğilme modülü prosesine göre üretilen saf PPS numunelerinin doğrulama test sonuçları

Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Devri (d/dk)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Süresi (dk)	Enjeksiyon Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (bar)	Ütüleme Süresi (sn)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)
340	50	150	3	12	12	10	115,9±0,8	3410±49

Hem eğilme dayanımı hem de modülü için en yüksek seviyelerinin elde edilmesini sağlayabilecek Tablo 3.11'de verilen optimum üretim parametre ve seviyelerine karar verilip doğrulama üretimi ve testleri yapılmıştır, sonuçlar yine Tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.11. Optimize edilmiş ortak (hem eğilme dayanımı hem de modülü) prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin doğrulama test sonuçları

Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Devri (d/dk)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Süresi (dk)	Enjeksiyon Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (bar)	Ütüleme Süresi (sn)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)
340	75	150	4	12	12	10	117,82±0,9	3368±38

Saf PPS polimer malzemesinin Tablo 3.4, 3.5 ve 3.6'da elde edilen eğilme proses optimizasyonu değerleri için ortak optimizasyon parametrelerinin en iyi eğilme dayanımı ve modül değerlerini gösterdiği saptanmıştır. Zhang ve diğ. çalışmalarında carbon fiber takviyeli PPS kompozitlerinin eğilme özelliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre saf PPS polimerinin eğilme dayanımı ve modülü değerlerinin sırasıyla 95 MPa ve 2500 MPa olduğunu saptamışlardır [14]. Chen ve diğ. PA/PPS blendlerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Saf PPS polimerinin eğilme dayanımının 116 MPa olduğunu vurgulamışlardır [35]. Bir başka çalışmada ise, Deng ve diğ. nano boyutlu elmasları PPS polimerine çekirdeklenme ajanı olarak kullanmak için katmışlardır. Çalışmalarında saf PPS polimerinin eğilme dayanımı ve modülü değerlerini sırasıyla 100,7 MPa ve 2758 MPa olarak saptamışlardır [36]. Belirtilen tüm literatür çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, tez çalışmasının optimizasyon basamağında elde edilen eğilme dayanımı ve modülü değerlerinin daha yüksek olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu sonuçlarla optimizasyonun önemi bir kez daha açığa çıkmaktadır.

3.1.4. Saf PPS'nin mekanik açıdan çekme özellikleri için proses optimizasyonu

Saf PPS'nin çekme özelliklerinden çekme dayanımı ve modülünün en iyi sonuçlarının elde edilmesi amacıyla yapılan proses optimizasyonunda Taguchi metodu kullanılmıştır. Taguchi metodu hem çekme dayanımı hem de modülü için "en yüksek en iyi" karakteristiğini kullanmıştır. Çekme dayanımı açısından yapılan proses optimizasyon sonuçlarından S/N oranları ve parametre katkı oranları Tablo 3.12'de verilmiştir.

Tablo 3.12. Saf PPS'nin çekme dayanımı için proses optimizasyonu sonuçları

	S/N Oranları									Güven Aralığı (95%)
Parametreler	**S1**	**S2**	**S3**	**1**	**2**	**3**	**Sıra**	**P**	**F**	**$F_{2,12}$=3,89; P=0,024**
Karıştırma Sıcaklığı	55,20	55,29	**55,32**	300	320	**340**	1	0,024	**5,14**	**X**
Karıştırma Devri	55,23	55,27	**55,31**	50	75	**100**	3	0,298	1,34	
Kalıp Sıcaklığı	55,24	**55,34**	55,24	140	**145**	150	2	0,128	2,45	
Karıştırma Süresi	55,26	55,26	**55,30**	3	4	**5**	7	0,975	0,03	
Enjeksiyon Basıncı	55,26	55,24	**55,31**	8	10	**12**	6	0,611	0,51	
Ütüleme Basıncı	55,24	55,26	**55,32**	8	10	**12**	5	0,397	1,00	
Ütüleme Süresi	55,29	**55,30**	55,22	5	**10**	15	4	0,362	1,05	

Tablo 3.12'deki S/N oranlarına göre en iyi çekme dayanımının elde edilmesi için karıştırma sıcaklığının 340°C, karıştırma devrinin 100 d/dk, kalıp sıcaklığının 145°C, karıştırma süresinin 5 dk, enjeksiyon basıncının 12 bar, ütüleme basıncının 12 bar ve ütüleme süresinin 10 sn seviyelerinin seçilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca parametre katkı oranlarının tespiti için yapılan ANOVA sonuçlarına göre %95 güven aralığında ($F_{2,12}$=3,89; P=0,024) en etkin parametrenin yine "karıştırma sıcaklığı" olduğu görülmektedir. Diğer tüm parametrelerin ise çekme dayanımı üzerine etkisi olduğu görülmemektedir. Taguchi ile üretim optimizasyonu sonucu en iyi çekme dayanımı için sadece en etkin parametre olan karıştırma sıcaklığının 340 °C seviyesinin seçilmesi yeterli olacağı tespit edilmiştir. Yapılan literatür araştırmalarından ekstrüder ve enjeksiyon ile polimer üretimindeki üretim parametrelerinden kalıp ve fırın sıcaklığı, kalıpta tutma basıncı ve süresi, ve enjeksiyon basıncının üretilen parçaların artık gerilme dayanımını, büzülmeyi ve çarpılmayı etkilediği belirtilmiştir [38] (Tablo 3.13). Bu parametrelerden tutma basıncı, kalıp ve fırın sıcaklığının en etkin parametreler olduğu saptanmıştır.

Tablo 3.13. Proses parametrelerinin artık gerilme dayanımı, büzülme ve çarpılmaya etkileri [38]

Üretim parametreleri	**Artık gerilme dayanımı, büzülme ve çarpılmaya üretim parametrelerinin etkileri**
Fırın sıcaklığı	• Yüksek erime sıcaklığı: düşük artık gerilmeler Siegmann ve diğ. (1982) • Yüksek erime sıcaklığı: düşük büzülme Jansen ve diğ. (1998)
Kalıp sıcaklığı	• Yüksek kalıp sıcaklığı: düşük artık gerilmeler (Siegmann ve diğ, 1982; Hastenberg ., 1992) • Yüksek kalıp sıcaklığı: düşük büzülme Jansen ve diğ. (1998)
Enjeksiyon basıncı	• Düşük enjeksiyon hızı: çekme gerilmeleri Guevara-Morales ve Figueroa-Lo´pez (2014) • Yüksek akış hızı: basma gerilmeleri Guevara-Morales ve Figueroa-Lo´pez (2014) • Yüksek oranda akış hızı: basma gerilmelerinin genliği düşük Siegmann ve diğ. (1982)
Tutma basıncı	• Yüksek paketleme basıncı: düşük büzülme (Kurt ., 2009; Postawa ve Koszkul, 2005; Aisa ve Castany, 2009; Flaman, 1993) • Yüksek basınç çarpılma etkisi Chen ve diğ., 2009; Mathivanan ve Parthasarathy, 2009) • Derin çökme izleri [44] Jansen ve Titomanlio (1996)
Tutma süresi	• Uzun sureli tutma: düşük büzülme Huang ve Tai (2001) • Büzülmede en etkin parametre Chen ve diğ. (2009)

Tablo 3.14'deki S/N oranlarına göre en iyi çekme modülünün elde edilmesi için karıştırma sıcaklığının 340°C, karıştırma devrinin 50 d/dk, kalıp sıcaklığının 150°C, karıştırma süresinin 3 dk, enjeksiyon basıncının 10 bar, ütüleme basıncının 10 bar ve ütüleme süresinin 5 sn seviyelerinin seçilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca parametre katkı oranlarının tespiti için yapılan ANOVA sonuçlarına göre %95 güven aralığında ($F_{2,12}$=3,89; P=0,024) tüm parametrelerin çekme modülü üzerine etkisi olduğu görülmemektedir.

Tablo 3.14. Saf PPS'nin çekme modülü için proses optimizasyonu sonuçları

	S/N Oranları									**Güven Aralığı (95%)**
Parametreler	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**1**	**2**	**3**	**Sıra**	**P**	**F**	**$F_{2,12}$=3,89; P=0,024**
Karıştırma Sıcaklığı	69,83	69,91	**70,21**	300	320	**340**	4	0,034	1,24	
Karıştırma Devri	**70,14**	69,80	69,91	**50**	75	100	5	0,492	0,75	
Kalıp Sıcaklığı	69,59	69,82	**70,36**	140	145	**150**	1	0,052	3,81	
Karıştırma Süresi	**70,16**	70,00	69,70	**3**	4	5	3	0,288	1,38	
Enjeksiyon Basıncı	69,93	**70,10**	69,83	8	**10**	12	6	0,652	0,44	
Ütüleme Basıncı	69,91	**70,05**	69,89	8	**10**	12	7	0,832	0,19	
Ütüleme Süresi	**70,24**	69,69	69,93	**5**	10	15	2	0,192	1,90	

Sonuçları doğrulamak için Tablo 3.15'te gösterilen doğrulama prosesi parametre ve seviyelerine göre üretilen ve test edilen PPS numunelerinin çekme dayanımı ve modülü sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.15. Optimize edilmiş prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin doğrulama test sonuçları

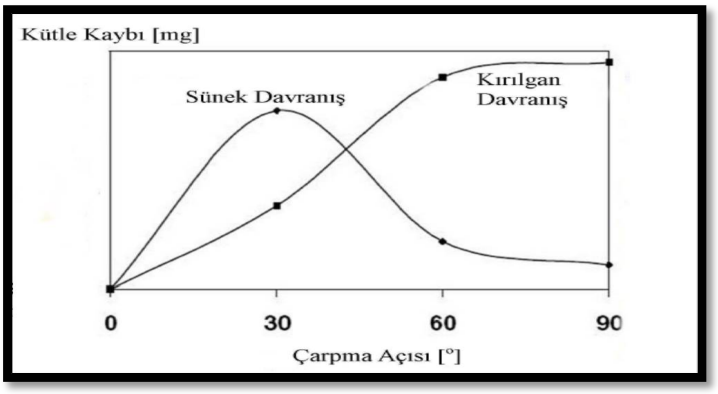
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	**Karıştırma Devri (d/dk)**	**Kalıp Sıcaklığı (°C)**	**Karıştırma Süresi (dk)**	**Enjeksiyon Basıncı (bar)**	**Ütüleme Basıncı (bar)**	**Ütüleme Süresi (sn)**	**Çekme Dayanımı (MPa)**	**Çekme Modülü (MPa)**
340	100	150	5	12	12	10	79,35±0,9	3519±48

Tablo 3.15'te elde edilen çekme dayanımı ve modül değerlerinin sırasıyla 79,35±0,9 MPa ve 3519±48 MPa olduğu açıkça görülmektedir. PPS'nin en iyi çekme özellikleri karıştırma sıcaklığının 340^{o}C seviyesinde saptanmıştır. Bunun nedeni termal ve termo mekanik sonuçlarda belirtildiği gibi PPS polimerinin termodinamik erime noktasının 340^{o}C olmasıdır [26]. Eğilme sonuçları açıklanırken yapılan literatür karşılaştırmasına benzer olarak PPS polimerinin çekme özellikleri de literatürde belirtilen çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Young ve Baird enjeksiyon kalıplama

üretim parametrelerinin üretilen PPS malzemesinin çekme dayanımı ve modülüne olan etkilerini incelemişler ve çekme dayanımı ve modülü değerlerinin sırasıyla 76 MPa ve 3060 MPa olduğunu saptamışlardır [39]. Chen ve diğ. PA/PPS karışımlarının mekanik özelliklerini incelemişler ve çekme dayanımının 62 MPa olduğunu belirtmişlerdir [35]. Sonuçlar göstermektedir ki, Taguchi deney tasarımı ile PPS polimerinin çekme özelliklerine yapılan üretim optimizasyonunun literatürde belirtilen değerlerin üzerine çıktığı gözlenmiştir. Hem eğilme hem de çekme özellikleri için bulunan optimum üretim parametreleri sayesinde hem saf PPS polimeri için en iyi mekanik özellikler elde edilirken hem de VK partikül takviyesi etkisinin incelenmesi için referans değer ortaya çıkmıştır.

3.1.5. Saf PPS'nin tribolojik açıdan eroziv aşınma özellikleri için proses optimizasyonu

Çarpma açısına bağlı olarak kütle kaybı ölçüldüğünde, sünek ve gevrek malzemeler farklı tepkiler sergilerler (Şekil 3.1). En fazla kütle kaybının yani eroziv aşınmanın 15°-30° arasında tespit edilmesi sünek malzemelerin davranışı sonucudur. Diğer bir taraftan en yüksek kütle kaybının 90°'de tespit edilmesi ise gevrek malzeme davranışının bir sonucudur. Altı farklı açıda (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) yapılan katı partikül erozyonu sonucu saf PPS'nin sünek eroziv aşınma karakteristiği gösterdiği tespit edilmiştir. Eroziv aşınma davranışı açısından kritik görülen 15°, 30° ve 90° çarpma açıları için en düşük kütle kaybı yani eroziv aşınma elde edilmesi amacıyla saf PPS'nin proses optimizasyonuna karar verilmiştir.



Şekil 3.1. Sünek / gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri [32]

15° çarpma açısı için yapılan proses optimizasyonunda "en düşük en iyi" karakteristiği kullanılarak yapılan Taguchi analizi sonucu elde edilen S/N oranları ve parametrelerin katkı oranları Tablo 3.16'da verilmiştir.

Tablo 3.16. Saf PPS'nin 15°'deki eroziv aşınma oranı için proses optimizasyonu sonuçları

	S/N Oranları									Güven aralığı (%95)
Parametreler	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**1**	**2**	**3**	**Sıra**	**P**	**F**	**$F_{2,12}$=3,89; P=0,024**
Karıştırma sıcaklığı	**-20,38**	-20,86	-21,18	**300**	320	340	1	0,007	7,79	**XX**
Karıştırma devri	**-20,66**	-20,78	-20,98	**50**	75	100	3	0,329	1,22	
Kalıp sıcaklığı	-21,00	**-20,66**	-20,76	140	**145**	150	2	0,259	1,51	
Karıştırma süresi	-20,80	**-20,78**	-20,84	3	**4**	5	7	0,945	0,06	
Enjeksiyon basıncı	-20,87	-20,82	**-20,72**	8	10	**12**	5	0,765	0,27	
Ütüleme basıncı	**-20,78**	**-20,78**	-20,86	**8**	**10**	12	6	0,896	0,11	
Ütüleme süresi	-20,93	-20,78	**-20,71**	5	10	**15**	4	0,573	0,58	

Tablo 3.16'da görülen S/N oranları incelendiğinde 15°'de yapılan erosiv aşınma için en düşük aşınma miktarının karıştırma sıcaklığının 300°C, karıştırma devrinin 50 d/dk, kalıp sıcaklığının 145°C, karıştırma süresinin 4 dk, enjeksiyon basıncının 12 bar, ütüleme basıncının 8-10 bar ve ütüleme süresinin 15 sn seviyelerinin seçilmesi ile elde edilebileceği tespit edilmiştir. Bunun yanında ANOVA analizi sonucunda %95 güven aralığında ($F_{2,12}$=3,89; P=0,024) en düşük aşınma miktarını sağlayabilecek en etkin parametrenin de yine karıştırma sıcaklığı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak 15°'de yapılacak eroziv aşınma için en düşük aşınma miktarının elde edilmesi için en etkin parametre olan "karıştırma sıcaklığının" 300°C olarak ayarlanması yeterli olacaktır.

PPS'nin altı açı arasından en fazla kütle kaybını yaşadığı 30° için Taguchi yardımıyla yapılan proses optimizasyonunda yine "en düşük en iyi" karakteristiği kullanılmıştır. Taguchi analizi sonucu elde edilen S/N oranları ve parametrelerin katkı oranları Tablo 3.17'de gösterilmiştir. Tablo 3.17'deki S/N oranları incelendiğinde 30°'de yapılacak eroziv aşınmada en düşük aşınma miktarının elde edilmesi için tüm parametrelerden karıştırma sıcaklığı için 340°C, karıştırma devri için 50 d/dk, kalıp sıcaklığı için 140°C, karıştırma süresi 3 dk, enjeksiyon basıncı için 8 bar, ütüleme basıncı için 8 bar ve ütüleme süresi için 5 sn seviyelerinin seçilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca ANOVA analizi sonucunda %95 güven aralığında ($F_{2,12}$=3,89; P=0,024) en düşük aşınma miktarını sağlayabilecek en etkin

parametrenin sırasıyla karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve kalıp sıcaklığı olduğu görülmektedir. Diğer parametrelerin aşınma davranışı üzerinde pek etkisi olduğu söylenemez. Sonuç olarak 30°'de meydana gelecek eroziv aşınmada minimum kütle kaybını sağlamak amacıyla en etkin parametrelerin yani karıştırma sıcaklığının 340°C, karıştırma süresinin 3 dk ve kalıp sıcaklığının 140°C seviyelerinin seçilerek PPS'nin üretilmesi yeterli olacaktır.

Tablo 3.17. Saf PPS'nin 30°'deki eroziv aşınma oranı için proses optimizasyonu sonuçları

	S/N Oranları									**Güven aralığı (%95)**
Parametreler	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**1**	**2**	**3**	**Sıra**	**P**	**F**	**$F_{2,12}$=3,89; P=0,024**
Karıştırma sıcaklığı	-21,93	-22,59	**-20,27**	300	320	**340**	1	0,000	42,13	**XXXX**
Karıştırma devri	**-21,49**	-21,75	-21,56	**50**	75	100	6	0,584	0,56	
Kalıp sıcaklığı	**-21,20**	-21,43	-22,16	**140**	145	150	3	0,008	7,44	**XX**
Karıştırma süresi	**-20,94**	-21,74	-22,11	**3**	4	5	2	0,002	10,52	**XXX**
Enjeksiyon basıncı	**-21,57**	-21,62	-21,61	**8**	10	12	7	0,979	0,02	
Ütüleme basıncı	**-21,30**	-21,66	-21,83	**8**	10	12	4	0,156	2,18	
Ütüleme süresi	**-21,37**	-21,78	-21,65	**5**	10	15	5	0,305	1,31	

90°'de yapılan eroziv aşınma davranışı diğer açılardan biraz farklıdır. Malzeme yüzeyine dik olarak çarpan aşındırıcı partiküller öncelikle malzeme yüzeyine gömülme göstermektedir. Gömülme süreci doygunlukla sona erip devam eden aşındırmada artık gömülü partiküllerin de çarpmaya karşı direnci söz konusudur. Bu nedenle aşındırma testlerinde kütle kayıpları gömülme neticesiyle kayıp olarak değil ağırlık artışı olarak kaydedilmiştir. Bu nedenle proses optimizasyonu uygulanırken Taguchi metodu "en yüksek en iyi" karakteristiğine göre yapılmıştır. Eksi (-) çıkan "kütle kaybı" sonuçlarının en yükseğinin yani -3'den ziyade -1'in daha iyi olması amaçlanmıştır. Burada amaç minimum gömülmeyi sağlayabilmektir. 90° için yapılan Taguchi analizi sonucu elde edilen S/N oranları ve parametrelerin katkı oranları Tablo 3.18'de gösterilmiştir.

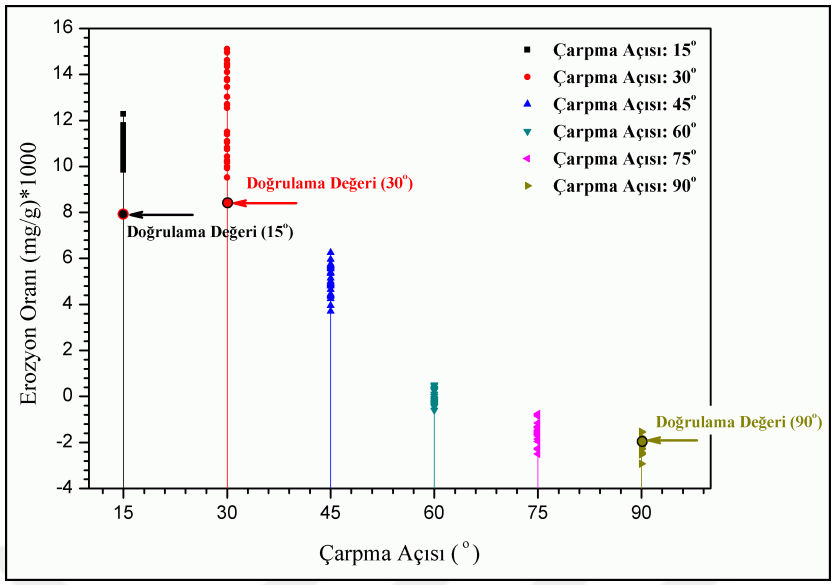
Tablo 3.18. Saf PPS'nin 90°'deki eroziv aşınma oranı için proses optimizasyonu sonuçları

	S/N Oranları									Güven Aralığı (%95)
Parametreler	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**1**	**2**	**3**	**Sıra**	**P**	**F**	**$F_{2,12}$=3,89; P=0,024**
Karıştırma sıcaklığı	**6,581**	5,947	4,725	**300**	320	340	2	0,160	2,52	
Karıştırma devri	**6,146**	6,095	5,013	**50**	75	100	5	0,413	1,16	
Kalıp sıcaklığı	4,702	**6,817**	5,734	140	**145**	150	1	0,018	3,17	
Karıştırma süresi	5,262	5,402	**6,589**	3	4	**5**	4	0,312	1,51	
Enjeksiyon basıncı	**6,307**	5,189	5,757	**8**	10	12	6	0,781	0,89	
Ütüleme basıncı	5,796	5,580	**5,877**	8	10	**12**	7	0,818	0,07	
Ütüleme süresi	6,071	**6,302**	4,880	5	**10**	15	3	0,299	1,65	

Tablo 3.18'deki S/N oranları incelendiğinde 90°'de yapılacak eroziv aşınma için minimum gömülmeyi sağlayabilecek proses parametre seviyelerinin karıştırma sıcaklığı için 300°C, karıştırma devri içim 50, kalıp sıcaklığı için 145°C, karıştırma süresi için 5 dk, enjeksiyon basıncı için 8 bar, ütüleme basıncı için 12 bar ve ütüleme süresi için 10 sn'nin seçilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Parametrelerin etkinlik derecelerinin tespiti için yapılan ANOVA analizi sonucunda %95 güven aralığında ($F_{2,12}$=3,89; P=0,024) 90° yapılacak eroziv aşındırma için hiçbir parametrenin gömülme ve aşınma davranışı üzerine etkisi olmadığı görülmüştür. Tüm bu üç açıya bağlı olarak elde edilecek en iyi aşınma davranışının doğrulanması için her bir açının Tablo 3.17'de gösterildiği gibi ayrı ayrı optimum proses parametre ve seviyelerine göre doğrulama üretimleri ve testleri yapılmıştır. Test sonuçları hem Tablo 3.19'da hem de Şekil 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.19. Optimize edilmiş proseslere göre üretilen saf PPS numunelerinin 15°, 30° ve 90° için eroziv aşınma doğrulama test sonuçları

Çarpma Açısı (°)	**Karıştırma Sıcaklığı (°C)**	**Karıştırma Devri (d/dk)**	**Kalıp Sıcaklığı (°C)**	**Karıştırma Süresi (dk)**	**Enjeksiyon Basıncı (bar)**	**Ütüleme Basıncı (bar)**	**Ütüleme Süresi (sn)**	**Eroziv Aşınma Miktarı (mg)**
15	300	50	145	4	12	8	15	7,9
30	340	50	140	3	8	8	5	8,4
90	300	50	145	5	8	12	10	-1,9

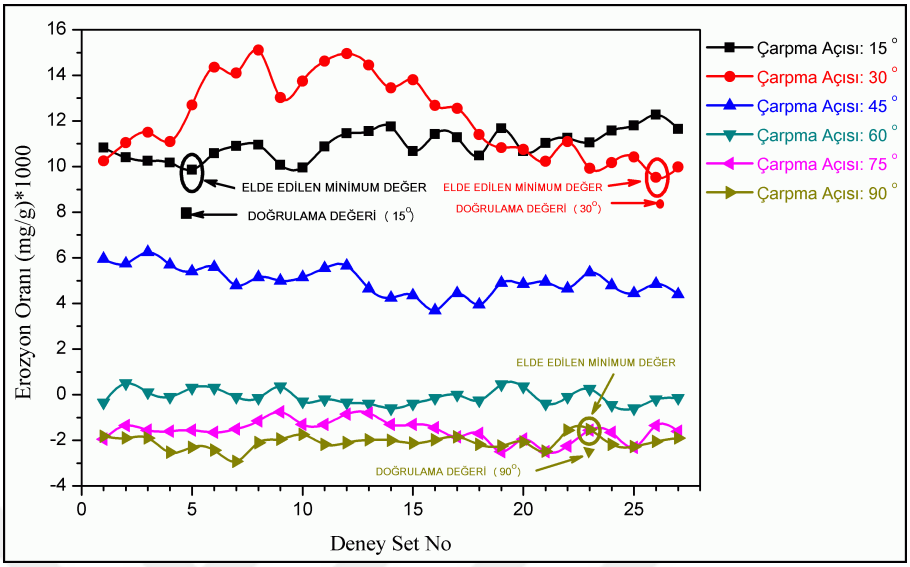


Şekil 3.2. Tüm açılarda yapılan eroziv aşınma test sonuçları (27 set) ile sadece 15°, 30° ve 90°'de yapılan Taguchi analizi eroziv aşınma doğrulama test sonuçları

Optimizasyon doğrulama test sonuçlarına bakıldığında 27 farklı üretimi gerçekleştirilen PPS'nin optimizasyon sonucu elde edilen eroziv aşınma miktarlarının 15° ve 30° için minimum seviyenin de altında elde edilerek doğrulandığı görülmektedir. 90° için ise 27 set içinde bir veri elde edilmiştir ki zaten sonuçlar birbirlerine çok yakındır. Tüm açılar incelendiğinde en yüksek aşınmanın tahmin edildiği üzere 30°'de çıktığı görülmektedir. Bunun yanında 15°'de biraz daha düşük, en düşük aşınmanın ise gömülme sonucu 90°'de olduğu tespit edilmiştir. PPS'nin eroziv aşınma açısından sünek malzeme davranışı optimizasyon sonucu değişmemiştir ancak önemli derecede geliştirilmiştir.

Üretim parametrelerinin PPS eroziv aşınma miktarına etkilerini ortaya koymak amacıyla 27 farklı yöntemler üretilen PPS kompozitlerin eroziv aşınma testleri üç tekrarlı şekilde yapılarak üç tekrarın ortalaması alınarak erozyon oranları bulunmuştur. Üretim parametrelerinin PPS eroziv aşınma oranı üzerine etkileri her bir açı değeri için net biçimde Şekil 3.3'te görülmektedir. Taguchi analizi yapılarak belirlenen en önemli parametrelere göre PPS üretim yöntemlerinde yapılan iyileştirmeler, erozyon aşınması dayanımına katkılarını 15˚, 30˚ ve 90˚ doğrulama testlerinde etkilerini açıkça göstermiştir. 27 farklı üretilen PPS kompozitlerde bu üç açıda ortaya çıkan minimum eroziv aşınma oranından daha düşük eroziv aşınma

oranları Taguchi analizi yardımıyla elde edilerek doğrulama testleriyle kanıtlanmıştır.



Şekil 3.3. Tüm açılarda 27 farklı üretim parametresiyle yapılan eroziv aşınma test sonuçları ile sadece 15°, 30° ve 90°'de yapılan Taguchi analizi eroziv aşınma doğrulama test sonuçları

3.2. Optimize Edilmiş PPS Polimerine Kula ve Nevşehir Bölgelerinden Temin Edilen VK Takviyesinin Yapılarak Kompozit Üretiminin Gerçekleştirilmesi

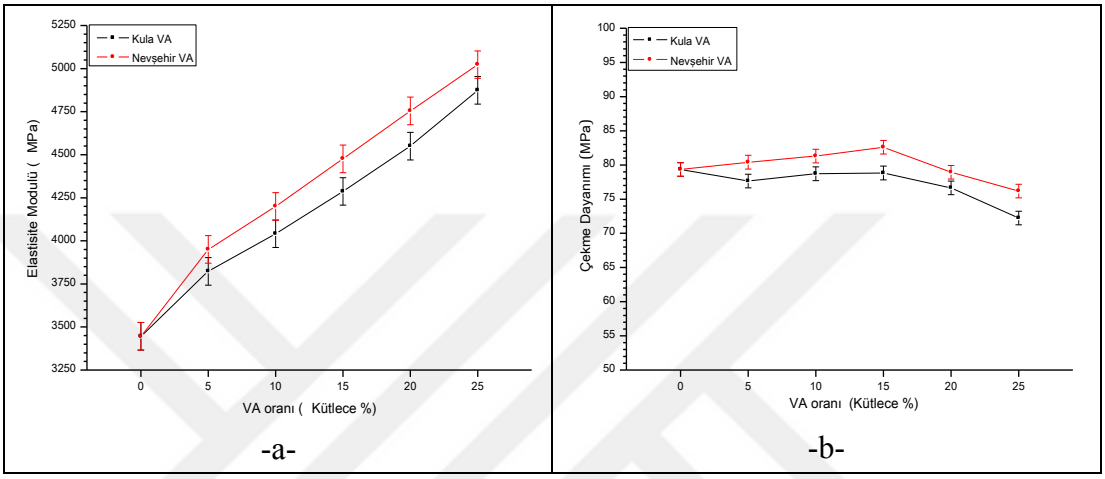
3.2.1. Saf PPS'ye göre mekanik özellikler açısından optimum VK takviyesinin belirlenmesi

Farklı oranlara sahip Kula ve Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin çekme ve üç nokta eğilme testleri için proses parametreleri Tablo 3.20'de verilmiştir.

Tablo 3.20. Farklı oranlara sahip Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitlerinin çekme ve üç nokta eğilme testleri için proses parametreleri

Üretim Cihazı	Üretim Parametreleri	Birim	Çekme Testi	Üç Nokta Eğme Testi
Ekstrüder	Karıştırma sıcaklığı	(°C)	340	340
Ekstrüder	Karıştırma devri	(d/dk)	100	100
Ekstrüder	Karıştırma süresi	(dk)	5	5
Enjeksiyonla kalıplama	Kalıp sıcaklığı	(°C)	150	150
Enjeksiyonla kalıplama	Enjeksiyon basıncı	(bar)	12	12
Enjeksiyonla kalıplama	Ütüleme basıncı	(bar)	12	8
Enjeksiyonla kalıplama	Ütüleme süresi	(s)	10	15

Tablo 3.20'de belirtilen proses parametrelerine göre farklı oranlara sahip Kula ve Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin üretimi gerçekleştirilmiş ve ISO 527-2 çekme standardına göre Shimadzu AG-X universal tets cihazında çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4'te oda sıcaklığında VK partikül oranına ve VK türüne bağlı olarak numunelerin elastisite modülleri (E) ve çekme dayanımları (σ_{maks}) gerilme-genleme eğrilerinden elde edilerek çizilmiştir.

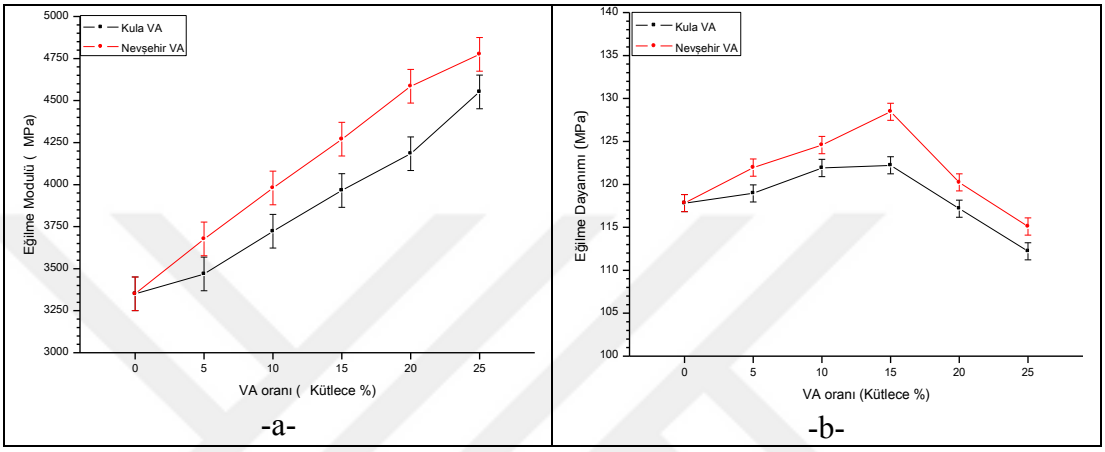


Şekil 3.4. VK/PPS kompozitlerinin elastisite modülleri (E) ve çekme dayanımları (σ_{maks})

Şekil 3.4-a'dan saf PPS polimerinin "E" değerinin yaklaşık olarak 3500 MPa olduğu, artan Kula ve Nevşehir VK partikül miktarı ile (kütlece %25) sırasıyla %38,57 ve %42,85 arttığı tespit edilmiştir. Bu durum için Díez-Pascual ve diğ.'nin çalışmasına benzer olarak matris malzemesinden mikro boyuttaki takviye malzemelerine gerilmelerin mükemmel bir şekilde iletildiği saptanmıştır [40]. Bir başka çalışmada ise Hussain ve diğ. karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerine nano boyutlu Al_2O_3 takviyesi yapmışlardır. Nano boyutlu Al_2O_3 takviyesi ile kompozit malzemenin elastisite modülünün arttığı rapor edilmiştir [41]. VK takviye oranının PPS polimerinin "E" değerine etkisi belirtildikten sonra VK türünün "E" değerine olan etkisi belirtilecek olursa tüm takviye oranları için Nevşehir VK partiküllerinin PPS polimerinin "E" değerini daha fazla iyileştirdiği gözlenmiştir (Şekil 3.4-a). Bunun nedeninin Nevşehir VK takviyesi ile matris malzemesi arasındaki ara yüzeyin daha iyi olması nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Şekil 3.4-b'de VK/PPS kompozitlerinin çekme dayanımlarındaki değişim VK türü ve VK takviye oranı parametrelerine göre değişimi belirtilmiştir. Şekil 3.4-b'de görüldüğü gibi, kütlece

%15 Nevşehir VK dolgu takviyesinde PPS polimerinin çekme dayanımı değerinin yaklaşık olarak %4,5 arttığı tespit edilirken aynı oranda Kula VK takviyesinde ise PPS polimerinin çekme dayanımı değerinin %0,67 azaldığı gözlenmiştir. Kula VK takviyesinde hiçbir oranda saf PPS polimerinin çekme dayanımı değerlerine ulaşılamamasına rağmen %25 Kula VK takviyesinde bu azalım yaklaşık %9 kadar olduğu belirlenmiştir. Nevşehir VK takviyesine bakılacak olursa, kütlece %15'e kadar PPS polimerinin çekme dayanımını arttırdığı kütlece %20 takviyede ise %0,53 oranında düşüşün yaşandığı artan VK oranı ile (kütlece %25) ise %4'e kadar bir düşüşün yaşandığı saptanmıştır. Bu da Nevşehir VK takviyesinin PPS polimeri ile daha uyumlu bir takviye malzemesi olduğunu göstermektedir. Díez-Pascual ve diğ.'nin çalışmasına benzer olarak PPS polimerine inorganik partiküllerinin eklenmesi ile partiküllerin dayanım özelliklerinden ziyade rijitliğe daha çok etki ettiği tespit edilmiştir [40]. Rong ve diğ'nin çalışmasında rijit partiküllerin topaklanmasının polimerin dayanımını belirgin bir şekilde etkilediği belirtilmiştir [42]. Sonuç olarak Nevşehir VK/PPS kompozitlerdeki çekme dayanımındaki düşük seviyedeki artışın daha iyi bir dağılım ve daha düşük topaklanma sonucu elde edildiği düşünülmektedir. Kütlece %15'e kadar VK oranlarında, VK partiküllerinin etrafı PPS matris ile iyi bir şekilde sarılmıştır bunun sonucunda partiküller belirgin bir şekilde kompozit yapı içerisinde konumlanmıştır. VK partiküllerinin her biri bağımsız bir birim olarak davranmaktadır ve numuneye uygulanan çekme gerilmesinin düzgün bir şekilde dağılmasına olanak sağlanmıştır. Böylece çekme dayanımı artmıştır bunun yanında yüksek oranlarda VK partiküllerinin ıslatılabilirliği daha az olduğundan dayanım düşmektedir. Yüksek konsantrasyonlarda yetersiz matris nedeniyle iki tip etkileşim ortaya çıkmaktadır; polimer matris - partikül ve partikül - partikül. Yüksek takviye oranlarında partikül - partikül etkileşimi polimer matris - partikül etkileşiminden daha baskın olduğu bununda çatlakları oluşturduğu ve Hundiwale ve diğ.'nin çalışmasına benzer olarak çekme dayanımını düşürdüğü belirlenmiştir [43]. Sonuç olarak, çekme test sonuçlarından PPS ile üretilen hava aracı parçalarının maliyetini düşürmek amacıyla VK takviyesinin (özellikle Nevşehir VK) kütlece %15'e kadar eklenmesi ile mekanik özellikleri iyileştireceği saptanmıştır. Bu da hem PPS gibi maliyetli bir polimerin daha az tüketilmesini hem de Türkiye'de çok kolay temin edilebilen inorganik volkanik küllerin yapısal parçalarda kullanılabilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

Tablo 3.20'de belirtilen üretim parametrelerine göre farklı oranlara sahip Kula ve Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin üretimi gerçekleştirilmiş ve ASTM D790 eğilme standardına göre Shimadzu AG-X universal test cihazında eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5'te oda sıcaklığında VK partikül oranına ve VK türüne bağlı olarak numunelerin eğilme modülleri ve eğilme dayanımları gerilme-şekil değişimi eğrilerinden elde edilerek çizilmiştir.



Şekil 3.5. VK/PPS kompozitlerinin eğilme modülleri ve eğilme dayanımları

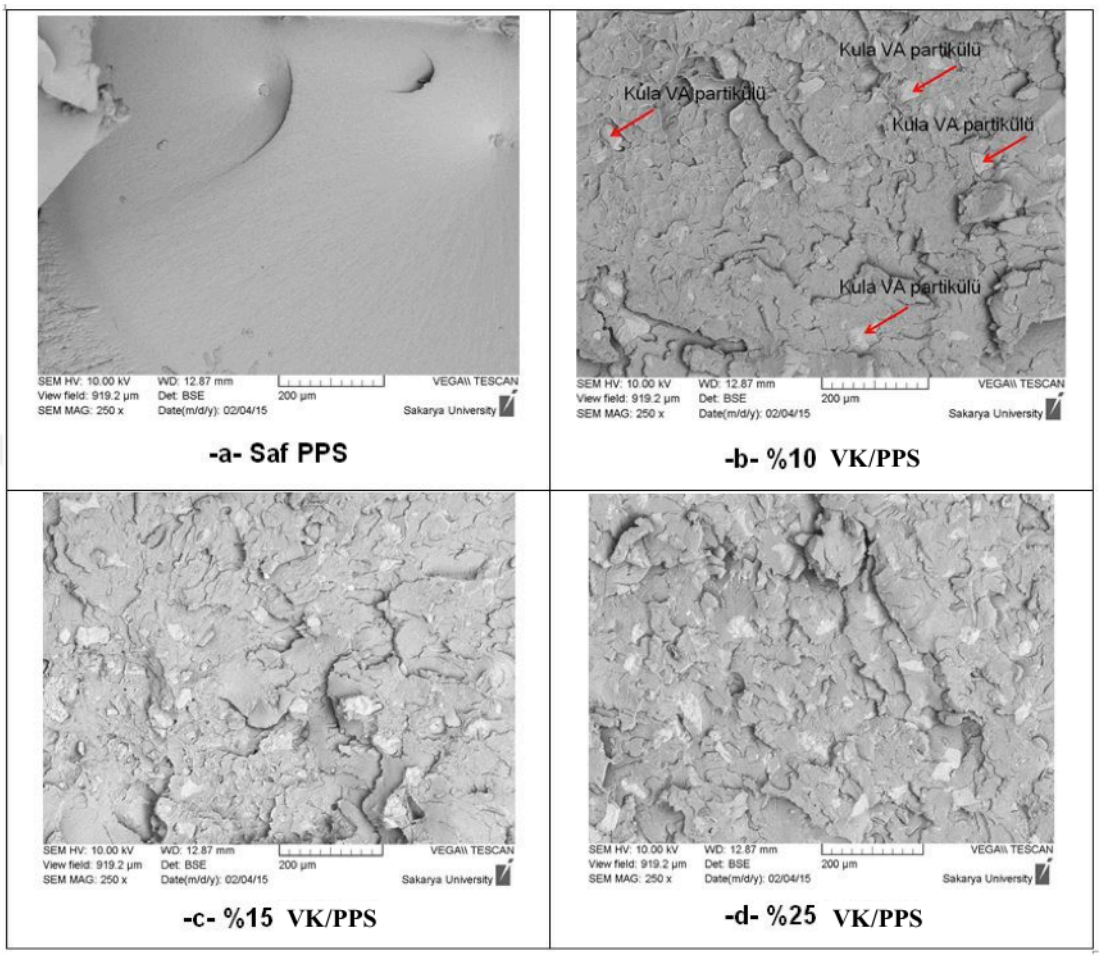
Şekil 3.5-a'da VK/PPS kompozit malzemelerin çekme modül sonuçlarına benzer olarak VK oranı artıkça eğilme modülü değerlerinin sürekli bir şekilde arttığı gösterilmiştir. Kütlece %25 Nevşehir ve Kula VK oranlarında saf PPS polimerinin eğilme modülüne göre sırasıyla %42,53 ve %35,82 artış tespit edilmiştir. Buradaki artış matris malzemesinden takviye elemanlarına gerilmelerin düzgün bir şekilde aktarıldığının bir kanıtı olduğu düşünülmektedir. Hem çekme hem de üç nokta eğilme testlerinden elde edilen modül değerlerinden Nevşehir VK takviyesinin PPS polimeri ile daha uyumlu bir ara yüzey oluşturduğu saptanmıştır. Şekil 3.5-b'de ise VK/PPS kompozitlerinin eğilme dayanımları gösterilmiştir. Çekme dayanımı sonuçlarına benzer olarak her iki VK türünde de kütlece %15 orana sahip PPS kompozitlerinin eğilme dayanımlarının en yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir. Kütlece %15 oranlarındaki Nevşehir ve Kula VK takviyeli PPS kompozitlerinin eğilme dayanımları değerleri sırasıyla 128,45 MPa ve 122,22 MPa olduğu görülmektedir ki bu değerlerin de saf PPS polimerinin eğilme dayanımı değerine göre yaklaşık olarak %9 ve %4'lük bir artışa karşılık geldiği belirlenmiştir. Öte yandan, artan VK oranlarında (hem Kula hem de Nevşehir takviyelerinde) ise eğilme dayanımı değerlerinin gözle görülür bir şekilde azaldığı belirlenmiştir. Kütlece

%15'e kadar VK oranlarında, matrisin uygun boşluk yapılı ve yüksek spesifik yüzey alanlı inorganik VK partiküllerini çevreleyebildiği bunun da güçlü bir partikül/matris etkileşimi ortaya çıkardığının kanıtı olduğu düşünülmektedir. Artan homojenliğin eğilme dayanımındaki artışla tutarlı olduğu gözlenmiştir. Yüksek oranlarda ise, reaksiyona girmemiş ya da kısmen reaksiyona girmiş VK partikülleri PPS matris içinde kısılıp kalmışlardır. Reaksiyona girmemiş ya da kısmen reaksiyona girmiş VK partiküllerinden dolayı porozite seviyesinin arttığı düşünülmektedir. Kütlece %20 ve %25 hem Kula hem de Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin eğilme dayanımlarındaki azalım VK partikülleri ve PPS matrisi arasındaki zayıf bağdaşmadan genel olarak kaynaklandığı ki bunun da ara yüzeyi bölgelerinin zayıf bir şekilde oluşmasına yol açtığı düşünülmektedir. Bu nedenle zayıf ara yüzey bölgelerinde matris malzemesinden takviye elemanlarına gerilme iletimi veriminin düştüğü rapor edilmiştir.

3.2.2. VK/PPS kompozitlerin mekanik testler (çekme ve eğme) sonrası TEM ile hasar analizleri

Çekme ve üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (TEM) analizleri ile incelenmiştir. 250x ve 1000x büyütmelerde numunelerin kırılma yüzeylerinden görüntüler alınmış ve Kula/Nevşehir VK partiküllllerinin kütlece oranına bağlı olarak PPS polimeri içerisindeki dağılımları, partikül/matris ara yüzey durumu, matrisin partikülleri sarması gibi durumlar incelenmiştir. Şekil 3.6'da farklı oranlara sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin 250x büyütmedeki kırılma yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 3.6'dan genel olarak saf PPS polimeri ile Kula VK/PPS kompozit malzemelerinin farklı kırılma davranışını gösterdiği görülmektedir. Saf PPS'nin yüzeyinin kaba olmayan pürüzsüz bir yüzey morfolojisine sahip olması ile birlikte genel olarak boşluksuz ve çatlaksız bir yüzeye sahip olduğu görülmektedir. PPS'nin Kula VK takviyesi ile çekme gerilmesi altında yüzeyinin daha girintili çıkıntılı yani daha fazla dayanım gösterdiği saptanmıştır. Genel olarak partikül takviyeli kompozitlerde üç hasar mekanizmasının ortaya çıktığı belirtilmiştir [48]; yerinden çıkma, ani kırılma ve kaymalı-kırılma. Şekil 3.6'da düşük büyütme nedeniyle PPS'nin iyi bir şekilde Kula VK partiküllerini sarmaladığı gözlenmektedir [40]. Ayrıca Kula VK partiküllerinin

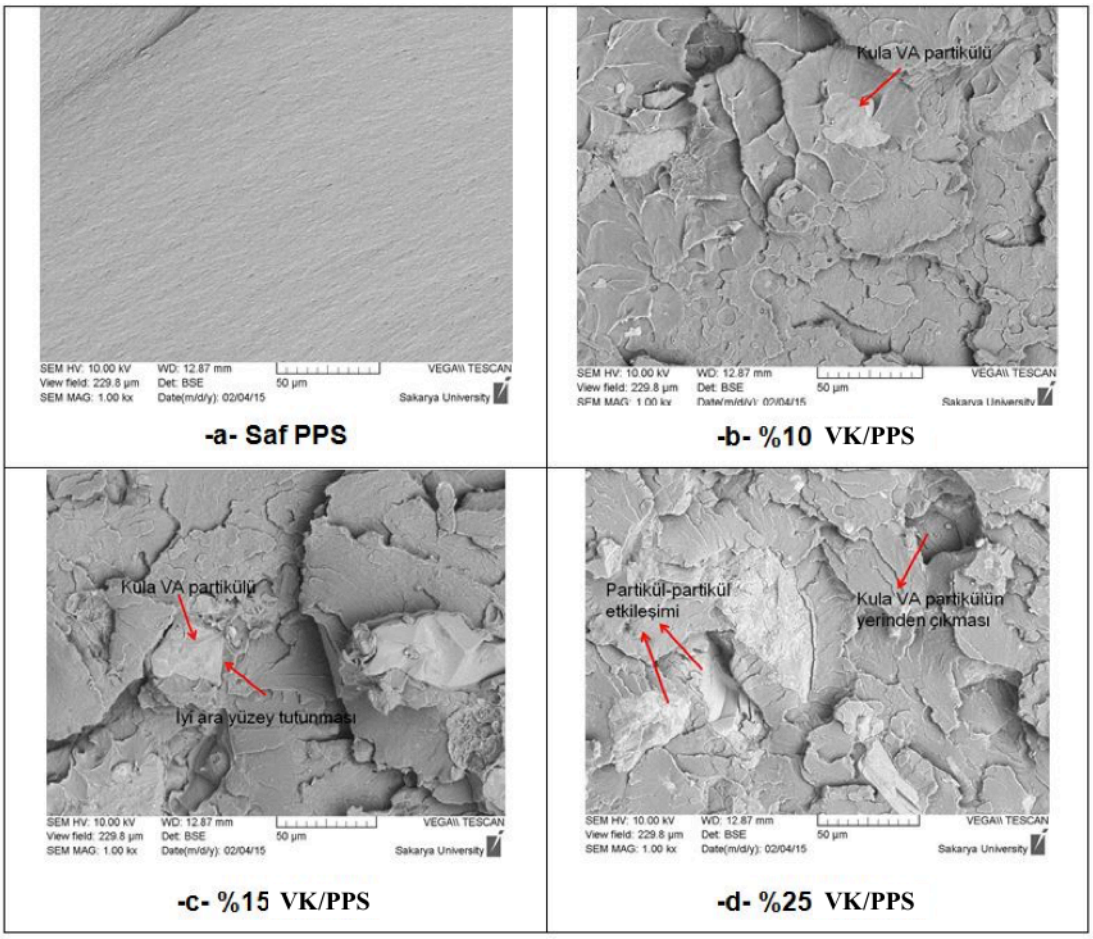
bazılarının PPS matris ile örtülmediği de açıkça görülmektedir. Kütle oranı arttıkça örtülmeyen Kula VK partikül sayısının arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.6. Saf PPS polimeri ve farklı kütle oranlarına sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin çekme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (250x büyütme)

Yukarıda belirtilen üç genel hasar mekanizmasının VK/PPS kompozitlerinde olup olmadığını belirlemek için daha büyük büyütmelerde kırılma yüzeylerinden TEM analizleri alınmıştır. Şekil 3.7'de farklı oranlara sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin 1000x büyütmedeki kırılma yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 3.7-b, c ve d'de Kula VK partikülleri ve PPS polimeri ile ara yüzeyleri daha detaylı bir şekilde görülmektedir. Düşük VK oranlarında yaklaşık %15' e kadar VK partiküllerinin kolay bir şekilde PPS polimeri tarafından sarıldığı gözlemlenirken artan VK oranlarında (Şekil 3.7-d, kütlece %25 VK) ise VK partiküllerinin arasına PPS polimerinin girmesinin zorlaştığı hatta partikül-partikül etkileşiminin ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bununla birlikte ara yüzey yapışmasının azalması nedeniyle gelen çekme yüklemelerinde Kula VK partiküllerinin kolayca yerinden çıktıkları tespit edilmiştir. Bu da açıkça

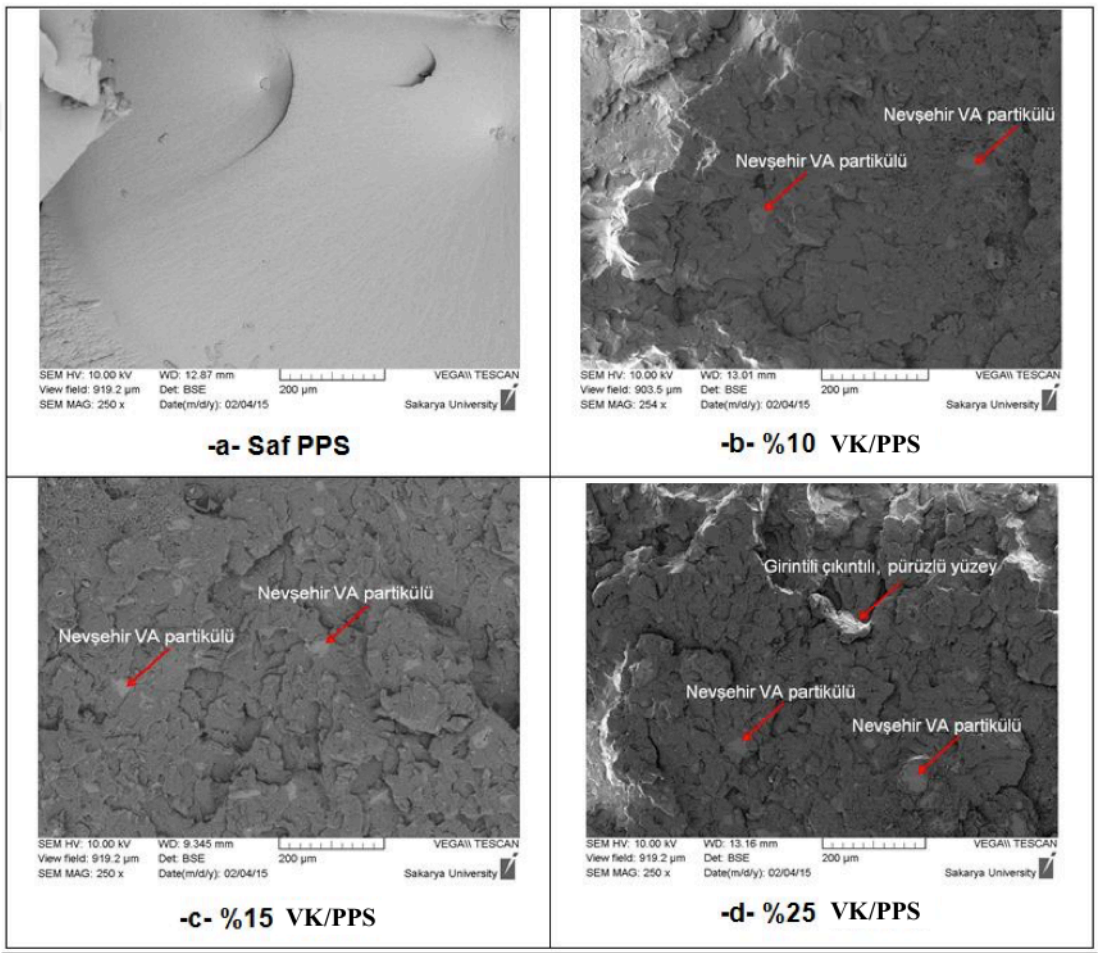
göstermektedir ki, artan VK oranlarında yapının dayanımı düşmektedir. Öte yandan, düşük VK oranlarında ise partikül/matris ara yüzeyinin iyi olduğu herhangi bir çatlak yada boşluk durumuna rastlanmamıştır.



Şekil 3.7. Saf PPS polimeri ve farklı kütle oranlarına sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin çekme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (1000x büyütme)

Çekme testleri sonrasında, Kula VK/PPS kompozitlerinin kütlece oranına bağlı olarak numunelerin kırılma yüzeylerindeki değişim incelendikten sonra 250x ve 1000x büyütmelerde Nevşehir VK partikülllerinin kütlece oranına bağlı olarak PPS polimeri içerisindeki dağılımları, partikül/matris ara yüzey durumu, matrisin partikülleri sarması gibi durumlar incelenmiştir. Şekil 3.8'de farklı kütlece oranlara sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin 250x büyütmedeki kırılma yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 3.8'den genel olarak saf PPS polimeri ile farklı kütlece Nevşehir VK/PPS kompozit malzemelerinin Kula VK/PPS kompozitlere benzer olarak farklı kırılma davranışını gösterdiği görülmektedir. Kula VK/PPS kompozitlerin kırılma yüzeylerinden farklı olarak Nevşehir VK takviyelerinde kırılma yüzeylerinin daha

fazla girintili-çıkıntılı olduğu, yüzeyden ayrılmaya çalışan bölgelerin daha katmanlı olduğu gözlenmiştir. Bununda çekme gerilmesi altında malzemenin daha fazla tepki gösterdiğinin kanıtı olduğu düşünülmektedir. Şekil 3.8'den Nevşehir VK partiküllerinin kesite düzgün bir şekilde dağıldığı bununla birlikte Kula VK takviyelerine göre PPS matris tarafından daha fazla üzeri örtüldüğü tespit edilmiştir. Aynı kütledeki Kula VK/PPS kompozitlerine kıyasla daha az Nevşehir VK partikülü görülebilmektedir. Bu da partikül/matris uyumunun daha iyi olduğunun bir başka kanıtı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.8. Saf PPS polimeri ve farklı kütle oranlarına sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin çekme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (250x büyütme)

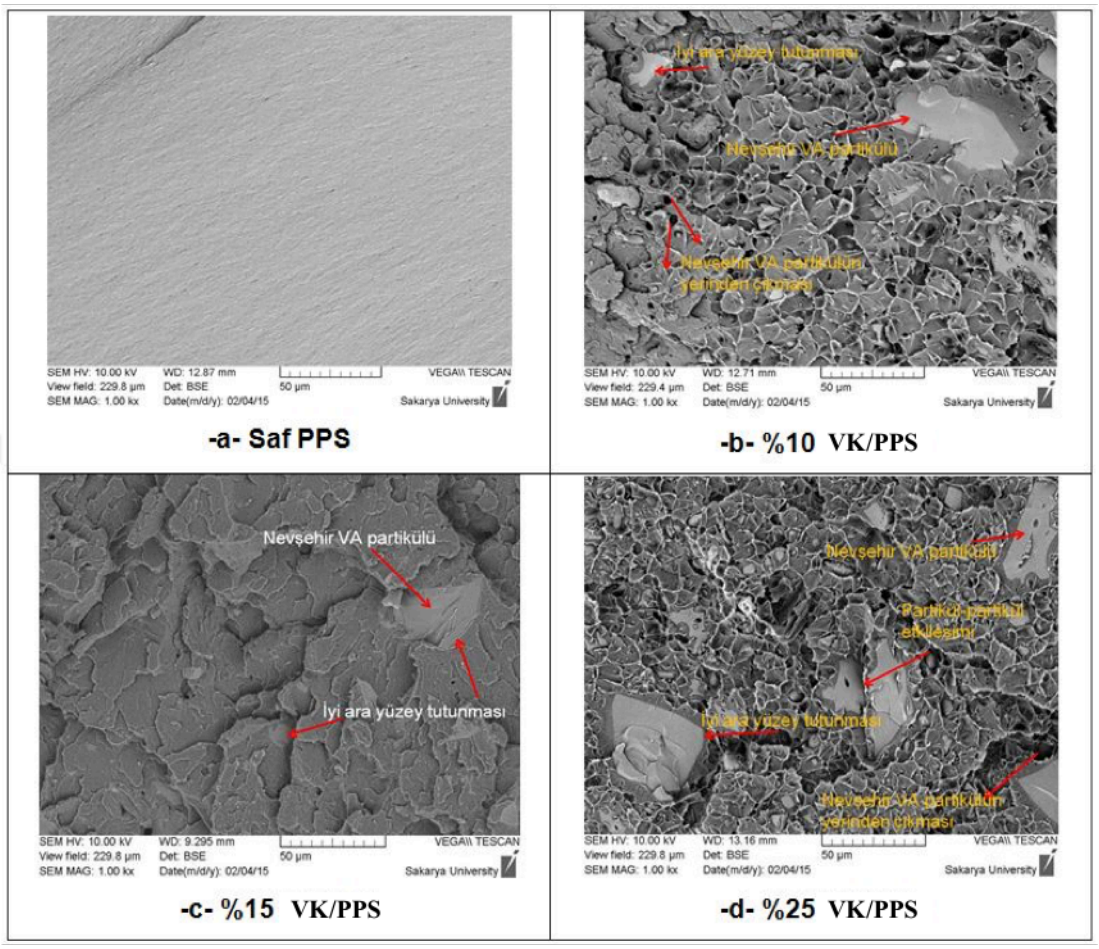
Saf PPS polimeri ve farklı kütle oranlarına sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin çekme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (1000x büyütme) Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Kula VK/PPS kompozitlerinden farklı birkaç durum tespit edilmiştir. Bunlardan ilki özellikle büyük büyütmelerdeki TEM fotografları incelendiğinde (Şekil 3.7 ve 3.9), Kula VK partiküllerinin yüzeyinin daha pürüzlü olduğu bunun

yanında Nevşehir VK partiküllerinin ise yüzeylerinin daha düzgün bir yüzeye sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durumun kırma ve öğütme işlemlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kula VK partikülleri temin edildiğinde öğütme ve eleme işlemleri yapılarak uygun boyut elde edilirken, Nevşehir VK partikülleri öğütme ve eleme işlemleri ile uygun boyuta getirilmiştir. Kırma işleminde Nevşehir VK partiküllerinin poroz yüzeyinin belli ölçülerde azaldığı düşünülmektedir. Fakat bu azalmanın herhangi bir mekanik özelliklerde azalmaya etki ettiği gözlenmemiş aksine her durumda Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin mekanik özelliklerinin Kula VK takviyelilere göre daha yüksek çıktığı çekme ve üç nokta eğilme testlerinde belirtilmişti.

Kula VK/PPS kompozitlerinden farklı bir diğer durum ise, kütlece %10 ve kütlece %25 VK takviyelerinde küçük boyutlu Nevşehir VK partiküllerinin yerlerinden çıkmasıdır (Şekil 3.9-b ve d). Daha büyük VK partikülleri yerlerinde sağlam bir şekilde dururken küçük tanelerin matrisle yeterli ara yüzey sağlayamaması nedeniyle çıktıkları düşünülmektedir. Tane boyutunun belli bir büyüklüğe ulaşması ile partikül/matris ara yüzeyinin iyi bir şekilde oluştuğu gözlenmektedir. Kütlece %15 Nevşehir VK takviyesinde ise iyi bir partikül/matris ara yüzeyi görülmekle birlikte herhangi bir partikülün yerinden çıkmasına rastlanmamıştır. Bununla birlikte kütlece %15 Nevşehir VK/PPS kompozitte matrisin VK partiküllerini iyi bir şekilde örtmesi nedeniyle görülen partiküllerin sayısının azaldığı belirlenmiştir (Şekil 3.9-c). Öte yandan, kütlece VK oranı arttığında (Şekil 3.9-d) küçük boyutlu VK partiküllerinin yerinden çıkmasının yanında ayrıca partikül-partikül etkileşimide gözlenmektedir. Bu nedenledir ki, artan VK partikül oranı ile dayanım düşmektedir.

Kompozit numunelerin çekme yüklemesi nedeniyle oluşan kırılma yüzeyleri incelendikten sonra üç nokta eğilme testlerine maruz bırakılmış kompozit numunelerin kırılma yüzeyleri TEM analizleri ile görüntülenmiştir. Bu bağlamda, 250x ve 1000x büyütmelerde numunelerin kırılma yüzeylerinden görüntüler alınmış ve Kula-Nevşehir VK partikülllerinin kütlece oranına bağlı olarak PPS polimeri içerisindeki dağılımları, partikül/matris ara yüzey durumu, matrisin partikülleri sarması gibi durumlar incelenmiştir. Üç nokta eğilme testlerinde saf PPS numuneleri ASTM D790 standardında belirtilen esaslara göre yüklenmesine rağmen herhangi bir

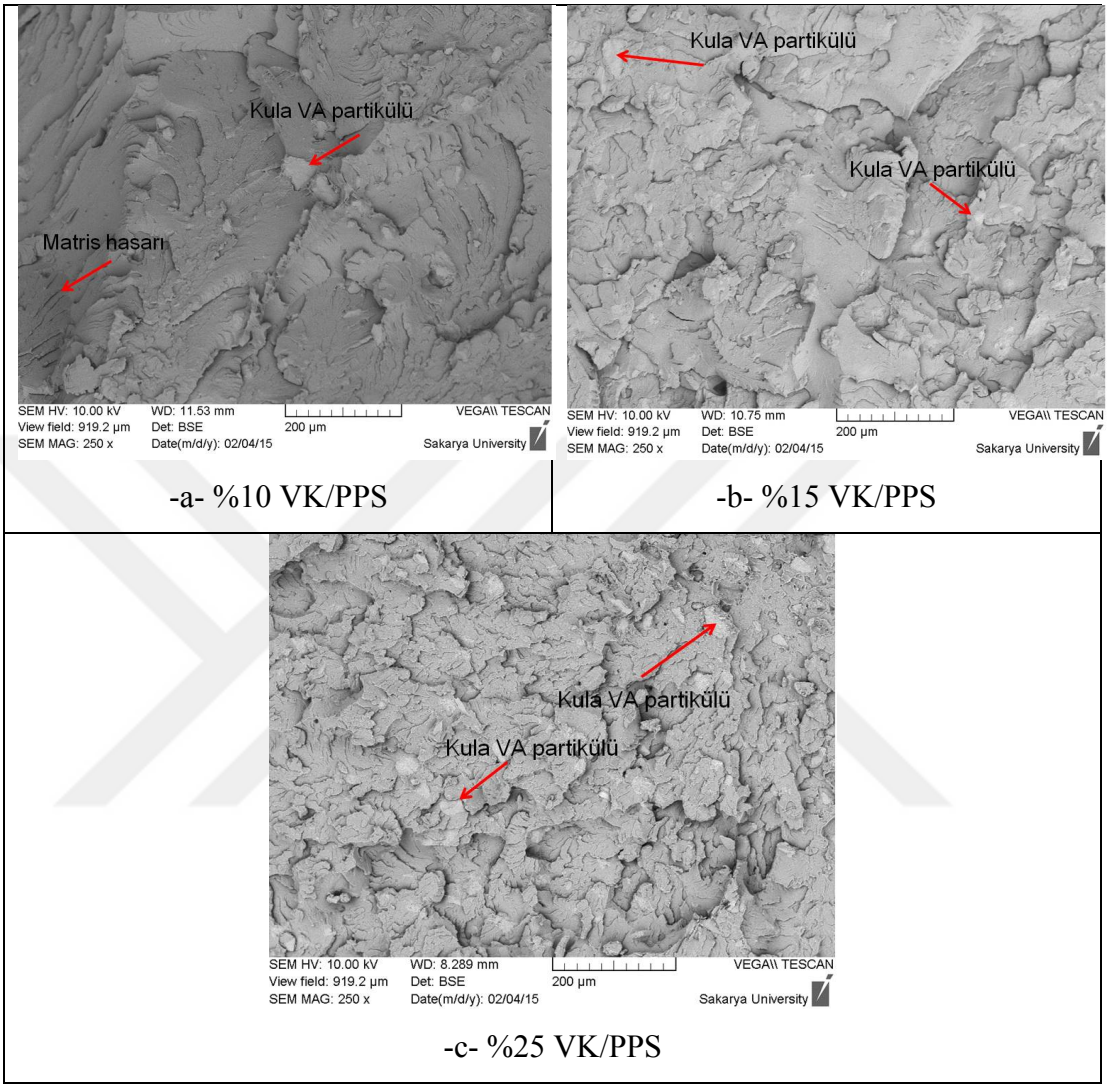
kırılma gözlenmemiştir. Bu nedenle saf PPS numunelerin üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma yüzeyleri incelenememiştir.



Şekil 3.9. Saf PPS polimeri ve farklı kütle oranlarına sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin çekme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (1000x büyütme)

Şekil 3.10'da makro düzeyde farklı kütle oranlarına sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin kırılan yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 3.10'dan genel olarak artan VK partikül takviyesi ile kesit yüzeyinde daha fazla gözle görülebilir VK partiküllerinin olduğu (Şekil 3.10-c) ve VK partiküllerinin homojen bir şekilde yapıya dağıldığı görülmektedir. Bunun yanında, artan VK partikül oranı ile kırılma yüzeylerinin daha pürüzlü (girintili-çıkıntılı) olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin PPS matris malzemesinin daha fazla polimer olarak deforme olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [49]. Matris ile partikül ara yüzeyinin iyi olması nedeniyle PPS polimeri daha fazla polimer olarak deforme olmuştur. Kütlece %15 Kula VK/PPS kompozit malzemede ise VK partiküllerinin tespit edilmesi

güçleşmiştir. Bunun nedeninin ise matrisin VK partiküllerinin üzerini örtmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

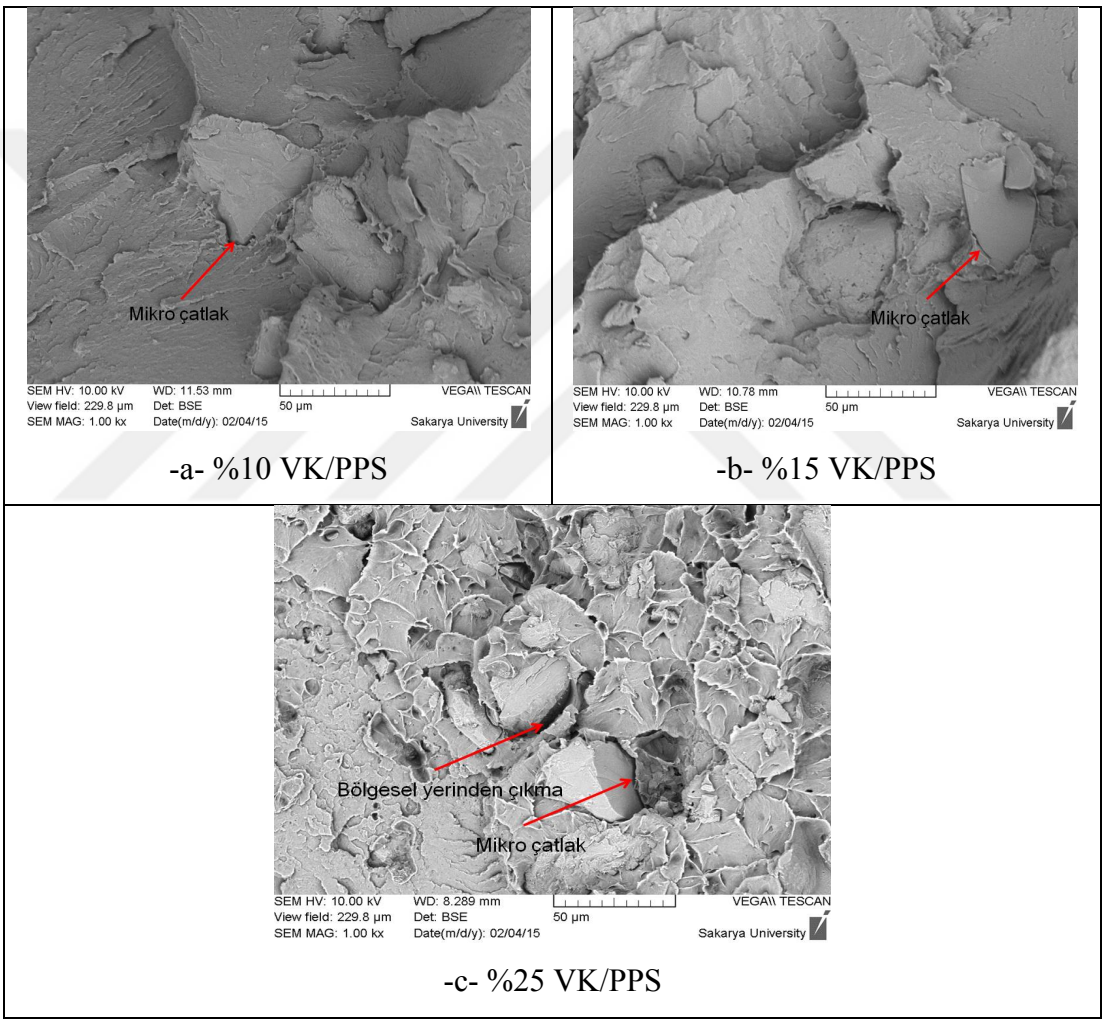


Şekil 3.10. Farklı kütle oranlarına sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (250x büyütme)

Farklı kütle oranlarına sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (1000x büyütme) Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Şekil 3.11'den genel olarak tüm Kula VK takviyelerinde partikül/matris ara yüzeyinde tam yapışmama nedenli mikro çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Bu mikro çatlakların özellikle kütlece %25 Kula VK takviyesinde daha fazla oluştuğu bununla birlikte partiküllerin matris tarafından iyi sarılamaması nedeniyle partiküllerin bölgesel olarak yerinden çıktığı tespit edilmiştir. Şekil 3.11-b'de görüldüğü gibi kütlece %15 Kula VK takviyesinde oluşan mikro çatlağın tüm partikül/matris ara

yüzeyine yayılmadığı gözlenmiştir. Bununla birlikte kesit yüzeyinde görülebilen partikül sayısının kütlece %15 VK takviyesinde daha az olduğu tekrar saptanmıştır.

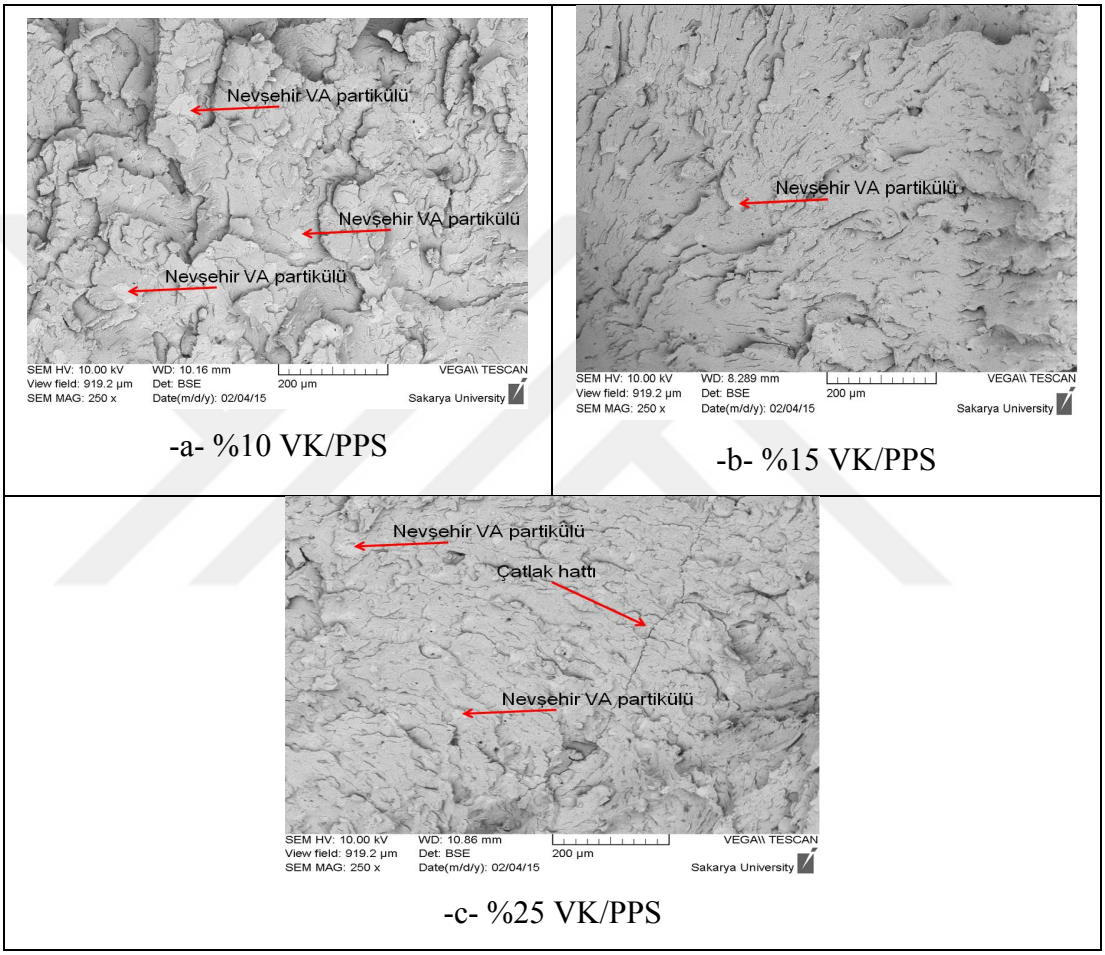
Üç nokta eğilme testleri sonrasında, Kula VK/PPS kompozitlerinin kütlece oranına bağlı olarak numunelerin kırılma yüzeylerindeki değişim incelendikten sonra 250x ve 1000x büyütmelerde Nevşehir VK partikülllerinin kütlece oranına bağlı olarak PPS polimeri içerisindeki dağılımları, partikül/matris ara yüzey durumu, matrisin partikülleri sarması gibi durumlar incelenmiştir.



Şekil 3.11. Farklı kütle oranlarına sahip Kula VK/PPS kompozitlerinin üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (1000x büyütme)

Şekil 3.12'de farklı kütlece oranlara sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin 250x büyütmedeki kırılma yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 3.12'den genel olarak farklı kütle oranlarında VK/PPS kompozitlerin eğilmeye maruz bırakılmış kesit yüzeylerine göre matrisin daha fazla polimer olarak deforme olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte

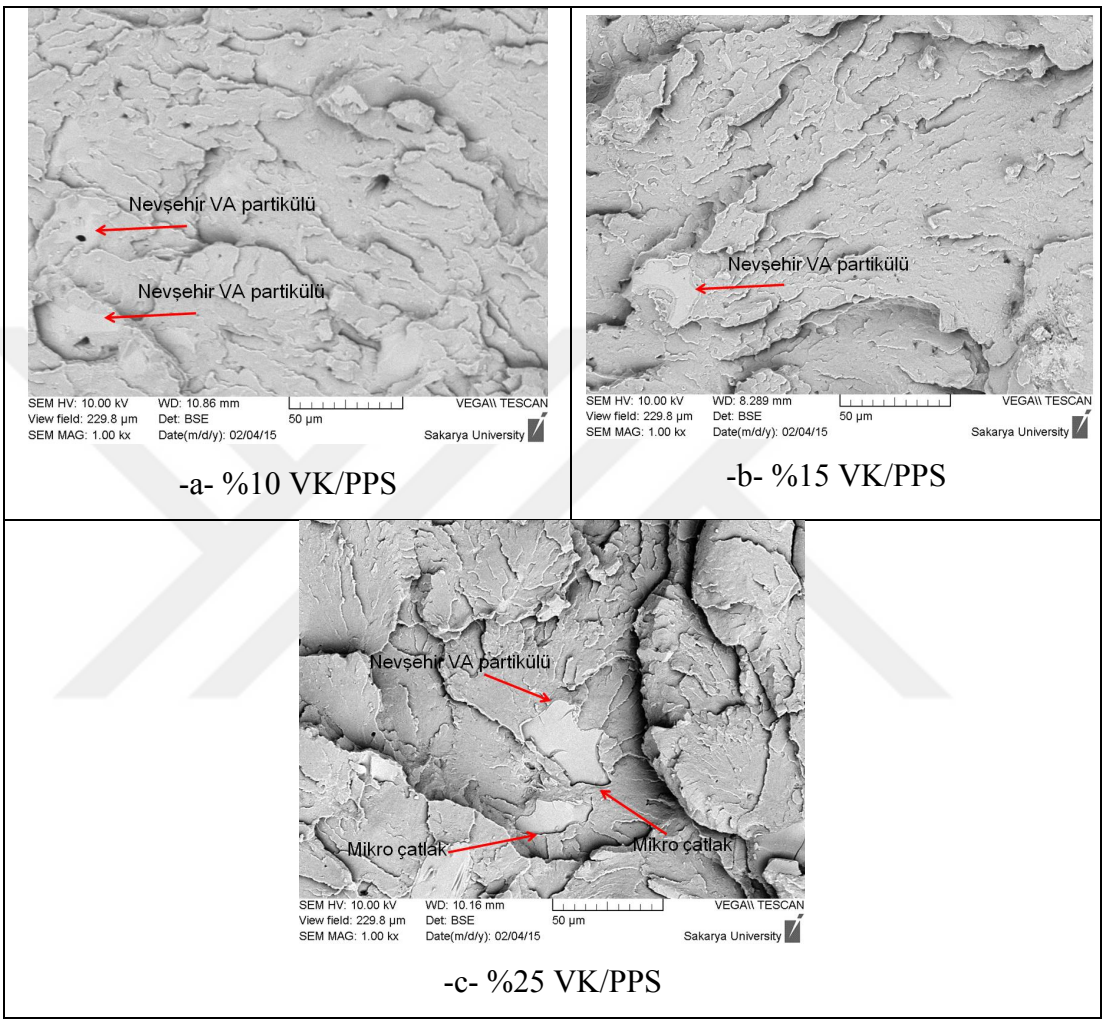
kütlece %15 Nevşehir VK/PPS kompozitinde kütlece %10 Nevşehir VK/PPS kompozitlerine göre daha az partikülün açıkta kaldığı belirlenmiştir. Kütlece %10 ve %15 VK takviyelerinde makro boyutta kesit incelendiğinde partikül/matris ara yüzeyinin iyi olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan, kütlece %25 Nevşehir VK takviyesinde ise kesit boyunca ilerlemiş çatlak hattının oluştuğu bununda özellikle dayanımı ciddi bir şekilde düşürdüğü düşünülmektedir (Şekil 3.12-c).



Şekil 3.12. Farklı kütle oranlarına sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (250x büyütme)

Farklı kütle oranlarına sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (1000x büyütme) Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Şekil 3.13-a ve b'den genel olarak kesit yüzeyi boyunca Nevşehir VK partikülleri/matris ara yüzeyinin iyi bir şekilde sağlandığı fakat kütlece %25 VK takviye oranlarına çıkıldığında (Şekil 3.13-c) partikül/matris ara yüzeyinde mikro çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Özellikle kütlece %15 Nevşehir VK takviyelerinde neredeyse hiç VK partikülü açıkta kalmamıştır. Bununla birlikte Şekil 3.13-b'de

görüldüğü gibi VK partikülü ne kadar girintili-çıkıntılı olsa da partikül/matris ara yüzeyinin mükemmel bir şekilde oluştuğu tespit edilmiştir. Kütlece %10 VK/PPS kompozitlerinde küçük mikro boşluklar da yapıda rastlansa da bu mikro boşlukların tüm yapıya yayılmadığı matris malzemesi bölgesinde oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 3.13. Farklı kütle oranlarına sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin üç nokta eğilme testleri sonrası kırılma yüzeyi morfolojileri (1000x büyütme)

Sonuç olarak, hem mekanik test sonuçlarından (çekme ve eğilme dayanımları, çekme ve eğilme modülleri) hem de numunelerin kırılma yüzeylerinden en iyi mekanik özelliklerin Nevşehir VK türü ile takviye edilmiş PPS kompozitlerinde olduğu bununla birlikte her iki VK türü ile takviye edilmiş PPS kompozitlerin kütlece %15 oranındaki VK takviyelerinde maksimum mekanik değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte özellikle TEM analiz incelemelerinden partikül/matris ara yüzeylerinde iyi bir yapışmanın yaşandığı fakat artan VK oranı ile (bazen de her

oranda) partikül/matris ara yüzeylerinde mikro çatlakların oluştuğu ve partiküllerin yerlerinden çıktığı tespit edilmiştir.

3.2.3. Saf PPS'ye göre tribolojik özellikler açısından optimum VK takviye oranının belirlenmesi

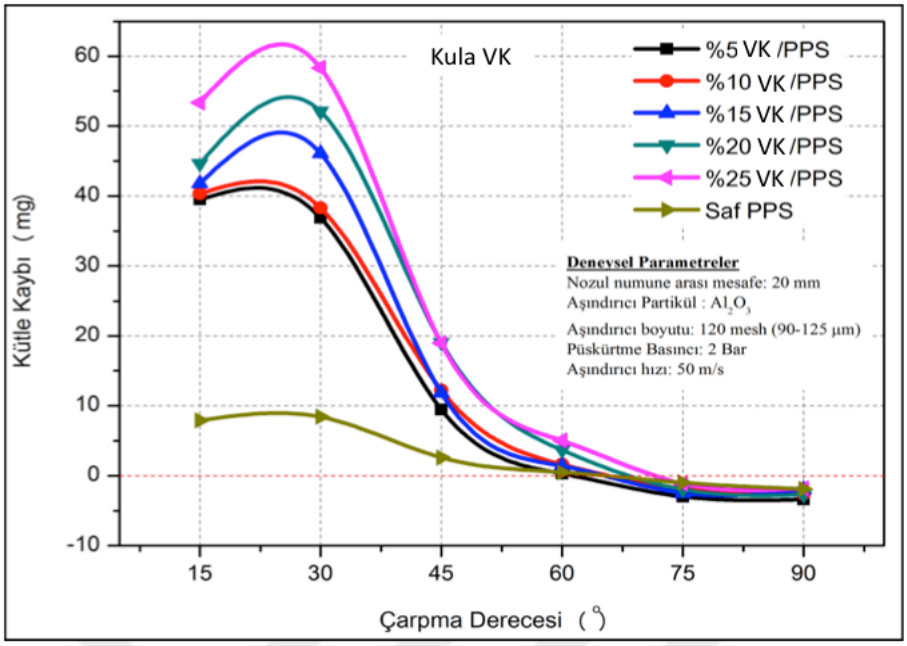
Farklı oranlara sahip Kula ve Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin eroziv aşınma testleri için numune üretim proses parametreleri Tablo 3.21'de verilmiştir.

Tablo 3.21. Farklı oranlara sahip Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitlerinin eroziv aşınma testleri için proses parametreleri

			Eroziv aşınma testi					
Üretim Cihazı	**Üretim Parametreleri**	**Birim**	**15°**	**30°**	**45°**	**60°**	**75°**	**90°**
Ekstrüder	Karıştırma sıcaklığı	(°C)	300	340	340	340	300	300
Ekstrüder	Karıştırma devri	(rpm)	50	50	50	50	50	50
Ekstrüder	Karıştırma süresi	(dk)	4	3	3	3	4	5
Enjeksiyonla kalıplama	Kalıp sıcaklığı	(°C)	145	140	140	140	145	145
Enjeksiyonla kalıplama	Enjeksiyon basıncı	(bar)	12	8	8	8	12	8
Enjeksiyonla kalıplama	Ütüleme basıncı	(bar)	8	8	8	8	8	12
Enjeksiyonla kalıplama	Ütüleme süresi	(s)	15	5	5	5	15	10

Optimum proses parametreleri ile üretilen numunelerin eroziv aşınma davranışları karakterizasyonu için ASTM G-76 standardına göre testler gerçekleştirilmiştir.

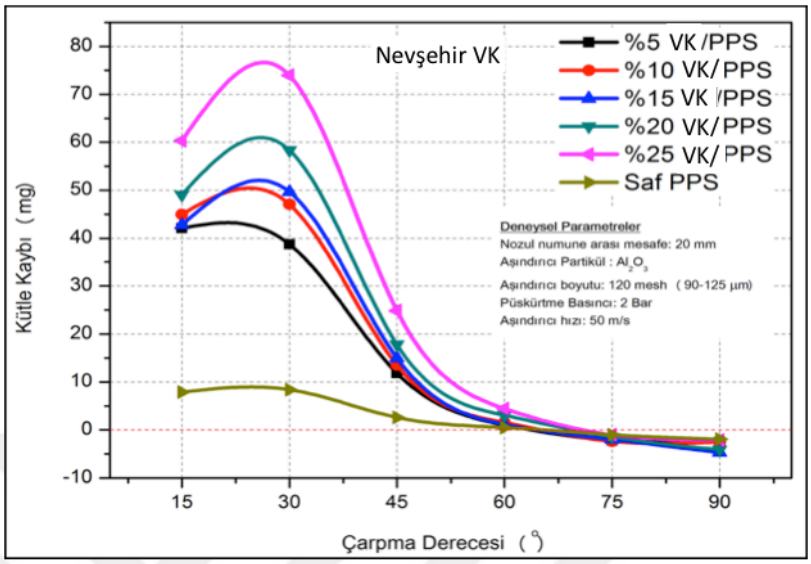
Şekil 3.14'de beş farklı oranda partikül takviyesine sahip Kula VK/PPS kompozitlerin eroziv aşınma testleri sonrası ortaya çıkan kütle kayıpları, aşındırıcının malzeme yüzeyine çarpma derecesine göre verilmiştir. Sünek karakterli malzemelerde 15°-30° çarpma açılarında görülen maksimum aşınma eğilimi Kula VK partikül takviyesinde de aynı şekilde gözlenmiştir. Kula VK oranının %5'ten %25'e artması Kula VK/PPS kompozitte ortaya çıkan kütle kaybını da artırmıştır. 30° çarpma açısında %25 VK oranında ortaya çıkan maksimum kütle kaybı, eroziv aşınma sırasında kompozit yüzeyinde daha fazla oranda bulunan Kula VK parçacıklarının matristen ayrılarak kopup uzaklaşmasına bağlıdır. Burada takviye oranı arttıkça Kula VK ile PPS arayüzeyinin kütle kaybına etkisinin arttığı söylenebilir. Arayüzey iyileştirmeleri yüksek oranda Kula VK takviyesi kullanılacağı zaman önem kazanmaktadır.



Şekil 3.14. Beş farklı oranda Kula VK içeren PPS kompozitlerde ortaya çıkan kütle kaybının çarpma derecesine bağlı değişim eğrileri

Şekil 3.15'te, beş farklı oranda partikül takviyesine sahip Nevşehir VK/PPS kompozitlerin eroziv aşınma testleri sonrası ortaya çıkan kütle kayıpları, aşındırıcının malzeme yüzeyine çarpma derecesine göre verilmiştir. Kula VK/PPS kompozitlerde olduğu gibi Nevşehir VK/PPS kompozitler de sünek karakterli eroziv aşınma göstererek 30° çarpma açısında maksimum kütle kaybını göstermiştir. Çarpma açısı 90° olduğunda kütle kaybı ortadan kalkmış hatta kütlede artış gözlemlenmiştir. Dik çarpma açısında kütle artışının sünek malzemelerde görülmesi aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye gömülerek kalmasına bağlıdır. Aşındırıcı partiküller yüzeye çarparak sekmezler, bunun yerine çarpma enerjileri ile hedef malzeme yüzeyine gömülerek kalırlar. Kütle kaybı Nevşehir VK oranı arttıkça artmış, maksimum kütle kaybı %25 Nevşehir VK oranında ortaya çıkmıştır. Nevşehir VK ile %25 oranlı takviye yapıldığında Kula VK takviyesine göre daha yüksek seviyede kütle kaybı gerçekleşmiştir. Bu sonucun muhtemel sebeplerinden birincisi, Nevşehir VK takviyesinin PPS ile daha zayıf arayüzey oluşturmasıdır. Nevşehir VK partikülleri Kula VK partiküllerine göre aşındırıcı tanelerin çarpması sonucu daha kolay yerinden sökülüp uzaklaşabilmektedir. Diğer bir muhtemel sebep ise aşındırıcı partiküllerin Nevşehir VK partiküllerine çarpması sonucu Nevşehir VK partiküllerini daha etkin şekilde kırarak çatlaklar oluşturup tüm taneciği parçalayarak küçük hale getirmesidir. Bu sayede parçalı kırıklar kompozitten daha kolay kopup uzaklaşmıştır.

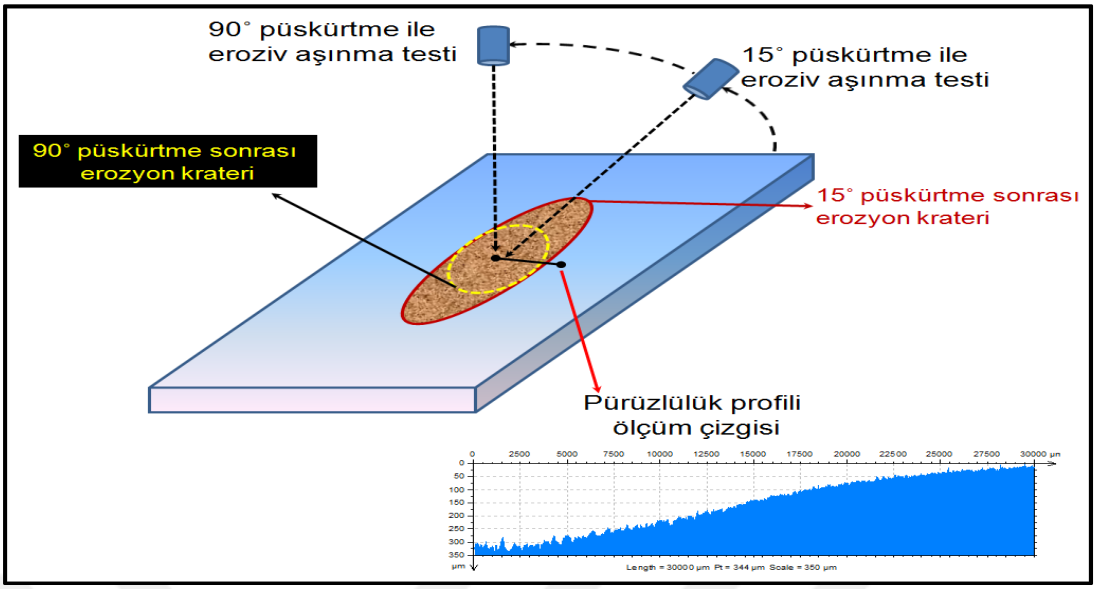
Bu sebep daha uygun görülmektedir. Çünkü mekanik test sonuçlarından Nevşehir partiküllerinin PPS ile daha iyi bir yapışma sağladığı rapor edilmiştir.



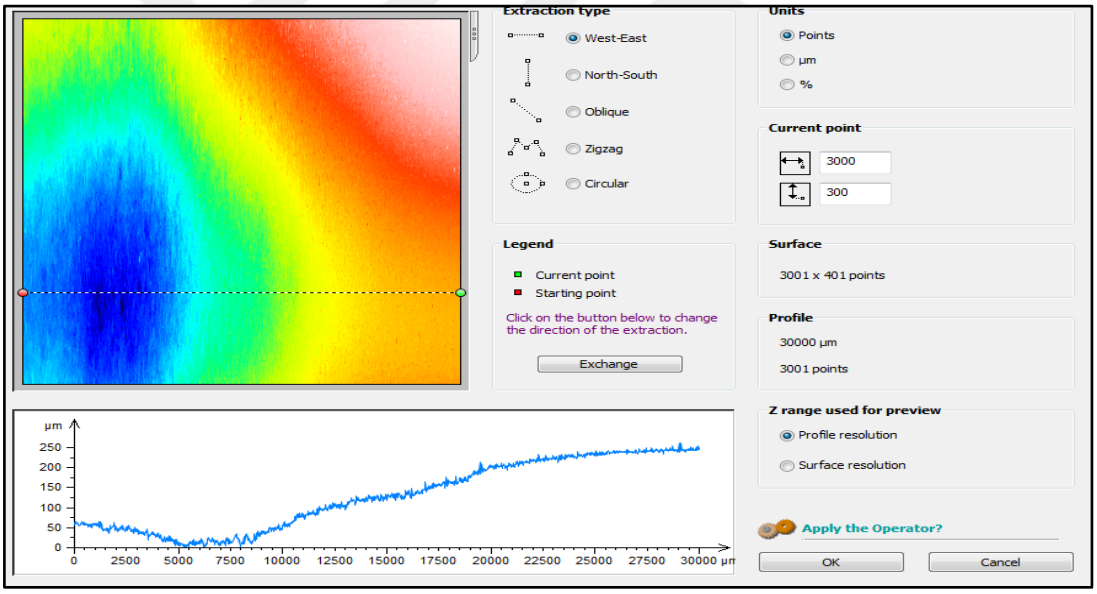
Şekil 3.15. Beş farklı oranda Nevşehir VK içeren PPS kompozitlerde ortaya çıkan kütle kaybının çarpma derecesine bağlı değişim eğrileri

3.2.4. VK/PPS kompozitlerin eroziv aşınma testleri sonrası yüzeylerinin lazer 3D profilometre ile analizi

Katı partikül erozyonu testleri sonrası Kula ve Nevşehir VK/PPS kompozitlerin yüzey hasarlarını değerlendirmek amacıyla Nanovea PS50 Temassız üç boyutlu profilometre kullanılarak yüzey pürüzlülük taraması gerçekleştirilmiştir. Altı farklı püskürtme açısıyla yapılan eroziv aşınma testlerinde ortaya çıkan erozyon krateri farklı büyüklükte olduğundan ölçümlerde erozyon krateri merkezinden yarıçaptan daha uzun bir tarama hattı belirlenerek profil pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde ölçüm yapılan pürüzlülük profili ölçüm çizgisi ve ortaya çıkan örnek pürüzlülük profili Şekil 3.16'da verilmiştir. 30000 µm uzunluğunda bir profil 10 µm hassasiyetle taranmıştır. Numune profilometreye sabitlendikten sonra taramaların her biri üç defa tekrarlanarak ortalama pürüzlülük değerleri karşılaştırılarak teyit edildikten sonra profil taramaları kaydedilmiştir. Tarama sonrası ham veriler profesyonel 3 boyutlu pürüzlülük işleme programı kullanılarak profil topografyaları oluşturulmuştur. Programda veri işleme sırasında ayarlanan ölçüm çizgisi koordinatları Şekil 3.17'de verilmiştir.

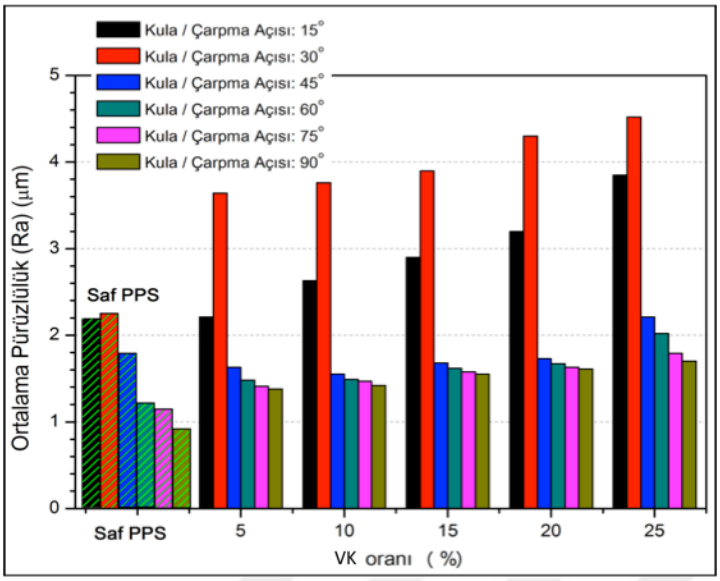


Şekil 3.16. Erozyon aşınması testleri sonrası erozyon kraterinde ortalama yüzey pürüzlülük ölçümünün yapıldığı profil çizgisinin şematik gösterimi



Şekil 3.17. Erozyon krateri ve ortalama pürüzlülük ölçümünün yapıldığı profil çizgisinin yeri

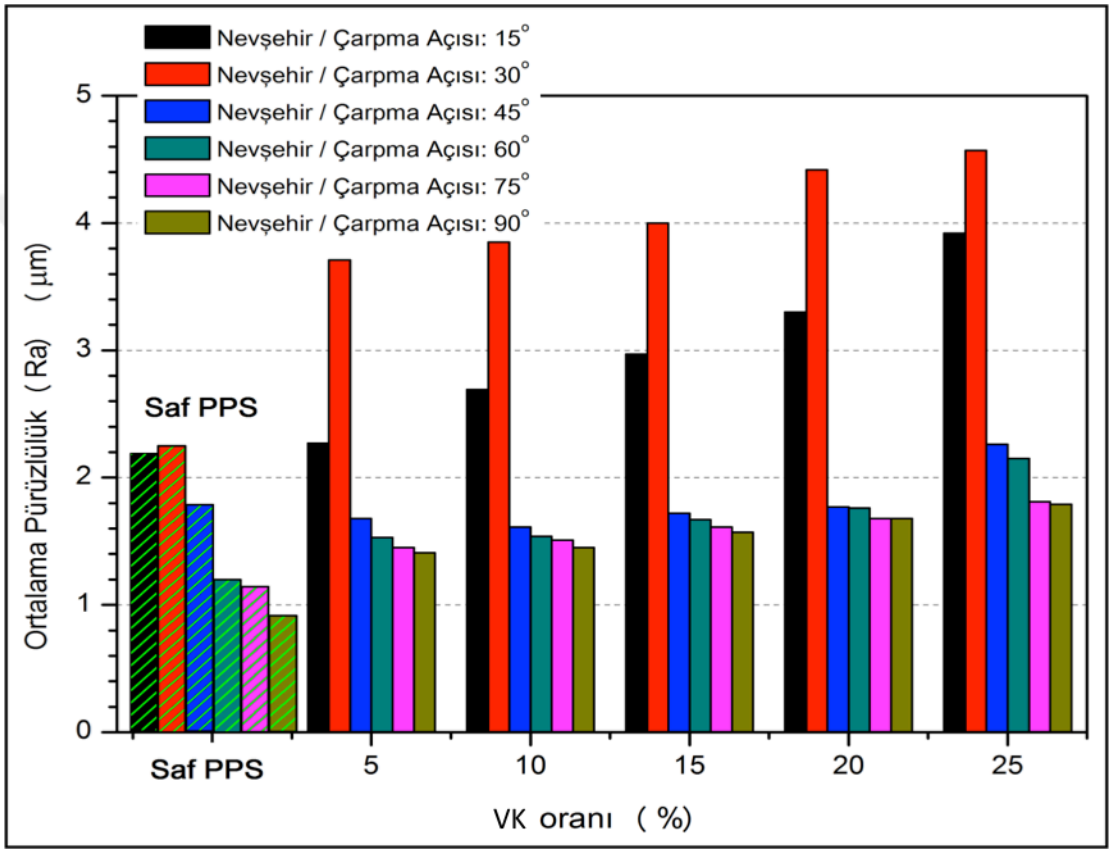
Şekil 3.18'de yukarıda belirtilen ölçüm metoduna göre gerçekleştirilmiş Kula VK/PPS kompozitlerin pürüzlülük profilleri ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi verilmiştir. Altı farklı püskürtme açısı için beş farklı VK takviye yüzdesi için profiller işlenerek aynı ölçeklendirme aralığı kullanılarak karşılaştırma için hazırlanmıştır. Her bir profil için ortalama pürüzlülük değeri R_a olarak belirtilmiştir.



Şekil 3.18. Kula VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin % VK oranına göre değişimi

Şekil 3.18'de Kula VK/PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin % VK oranına göre değişimi altı farklı çarpma açısı için karşılaştırma amacıyla çubuk grafik şeklinde verilmiştir. Eroziv aşınma testleri sonrası ortaya çıkan maksimum kütle kaybının 30˚ çarpma açısında ve %25 Kula VK takviyesinde görüldüğü belirlenmişti. Elde edilen ortalama pürüzlülük değerleri de göstermiştir ki maksimum yüzey ortalama pürüzlülük değeri yine 30˚ çarpma açısında gözlemlenmiştir. 30˚ çarpma açısında hem Kula VK partiküllerin kopup uzaklaşması sonucu hem de mikro-sürme ve mikro-kesme hasar mekanizmalarının birlikte Kula VK/PPS kompozit yüzeyinde maksimum pürüzlendirme etkisini göstermiştir. Diğer taraftan Kula VK takviyesi oranı arttıkça ortalama yüzey pürüzlülük değeri de artarak %25 Kula VK takviyesinde maksimum değerini görmüştür. 90˚ çarpma açısında ise her Kula VK takviyesi yüzdesinde minimum ortalama pürüzlülük değeri gözlemlenmiştir. Dik açılı çarpma sonucu aşındırıcı Al_2O_3 partiküller dövme etkisi yaparak yüzeyde daha homojen bir dağılım göstermiştir. Aşındırıcı partiküllerin normal eksende hareketleri açısal sapmaları azaltmış, erozyon kraterinde homojen bir dövme etkisi yaratmıştır. Bu etki pürüzlülük değerinin minimum seviyede kalmasına katkı sağlamıştır. Diğer taraftan 90˚ çarpma açısında aşındırıcı partiküllerin PPS matris yüzeyine gömülmesi sonucu kütle kaybı yerine kütlede artma görüldüğü kütle kaybı grafiğinde daha önce net olarak görülmüştür.

Şekil 3.19'te yukarıda belirtilen ölçüm metoduna göre gerçekleştirilmiş Nevşehir VK/PPS kompozitlerin pürüzlülük profilleri ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi verilmiştir. Altı farklı püskürtme açısı için beş farklı VK takviye yüzdesi için profiller işlenerek aynı ölçeklendirme aralığı kullanılarak karşılaştırma için hazırlanmıştır. Her bir profil için ortalama pürüzlülük değeri R_a olarak belirtilmiştir.

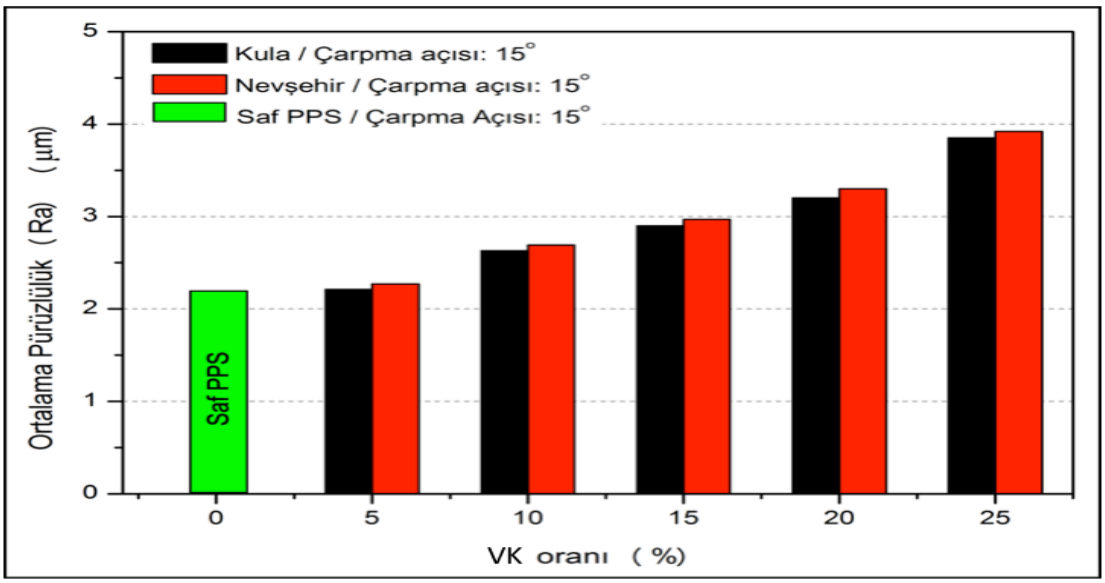


Şekil 3.19. Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi

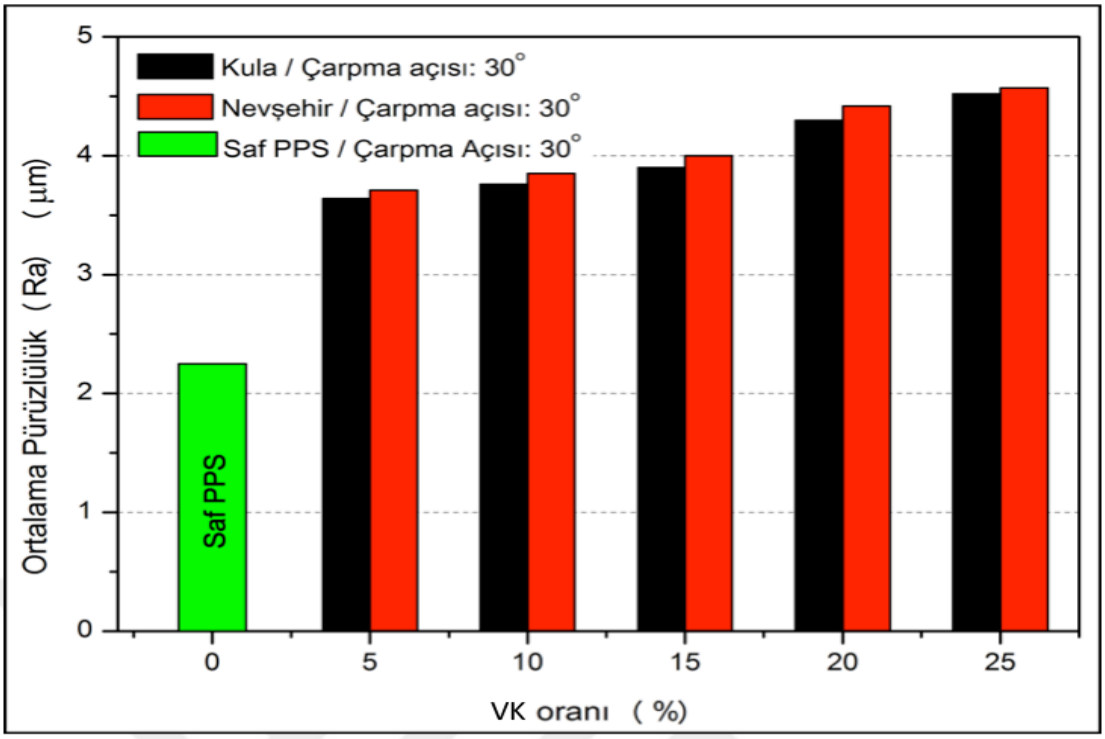
Şekil 3.19'da Nevşehir VK/PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi altı farklı çarpma açısı için karşılaştırma amacıyla çubuk grafik şeklinde verilmiştir. Eroziv aşınma testleri sonrası ortaya çıkan maksimum kütle kaybının 30˚ çarpma açısında ve %25 Kula VK takviyesinde görüldüğü belirlenmişti. Yüzey pürüzlülük taramaları sonrası elde edilen ortalama pürüzlülük değerleri de göstermiştir ki maksimum yüzey ortalama pürüzlülük değeri yine 30˚ çarpma açısında gözlemlenmiştir. Kula VK/PPS kompozitlerde de aynı pürüzlülük değişimi gözlemlenmesine rağmen, Nevşehir

VK/PPS kompozitte, Kula olana göre daha yüksek ortalama pürüzlülük değerleri gözlemlenmiştir. Erozyon testlerinde ortaya çıkan sonuçlarda kütle kaybının Nevşehir VK takviyesinde Kula VK takviyesine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmişti. Aynı şekilde ortalama pürüzlülük değerlerinde de Nevşehir VK Kula VK ile karşılaştırıldığında daha fazla pürüzlülüğe sahip olduğu görülmektedir.

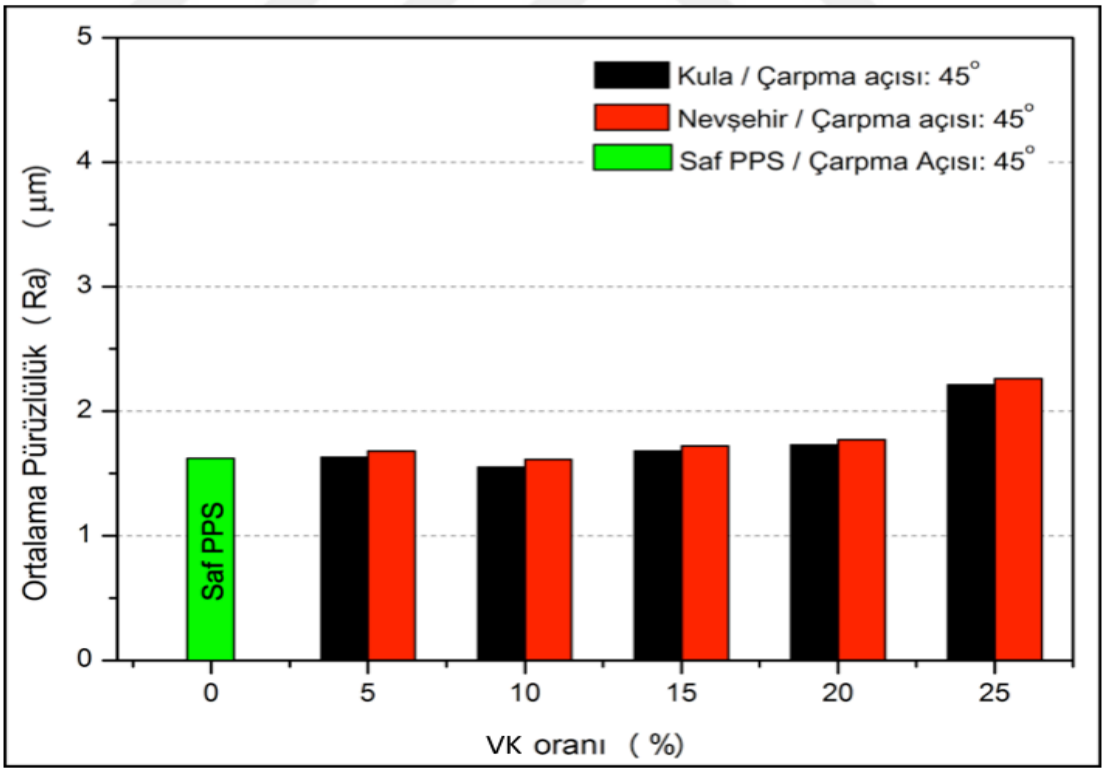
Şekil 3.20 - Şekil 3.25 arasındaki grafiklerde ortalama pürüzlülük değerlerinin altı farklı çarpma açısında Kula VK/PPS ve Nevşehir VK/PPS karşılaştırması verilmiştir. En yüksek ortalama pürüzlülük değerinin 30˚ çarpma açısında ortaya çıktığı ölçülmüştür. En düşük ortalama pürüzlülük değeri 90˚ çarpma açısında ortaya çıkmıştır. Çarpma açılarına bağlı ortalama pürüzlülük değerleri ile daha önce irdelenen eroziv aşınmaya bağlı kütle kayıpları arasında bir korelasyon olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, Nevşehir VK/PPS, Kula VK/PPS'ye göre daha kötü eroziv aşınma direnci göstermiş, aynı şekilde ortalama pürüzlülük değerleri de Nevşehir VK/PPS'de daha yüksek çıkmıştır. Tribolojik performans açısından değerlendirildiğinde, Kula VK/PPS kompozit eroziv aşınma direncinin Nevşehir VK/PPS'e göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. VK takviyeli PPS kompozit eğer servis şartları altında eroziv aşınmaya maruz kalacaksa, VK takviyesinin Kula esaslı olması gerektiği açık şekilde görülmüştür.



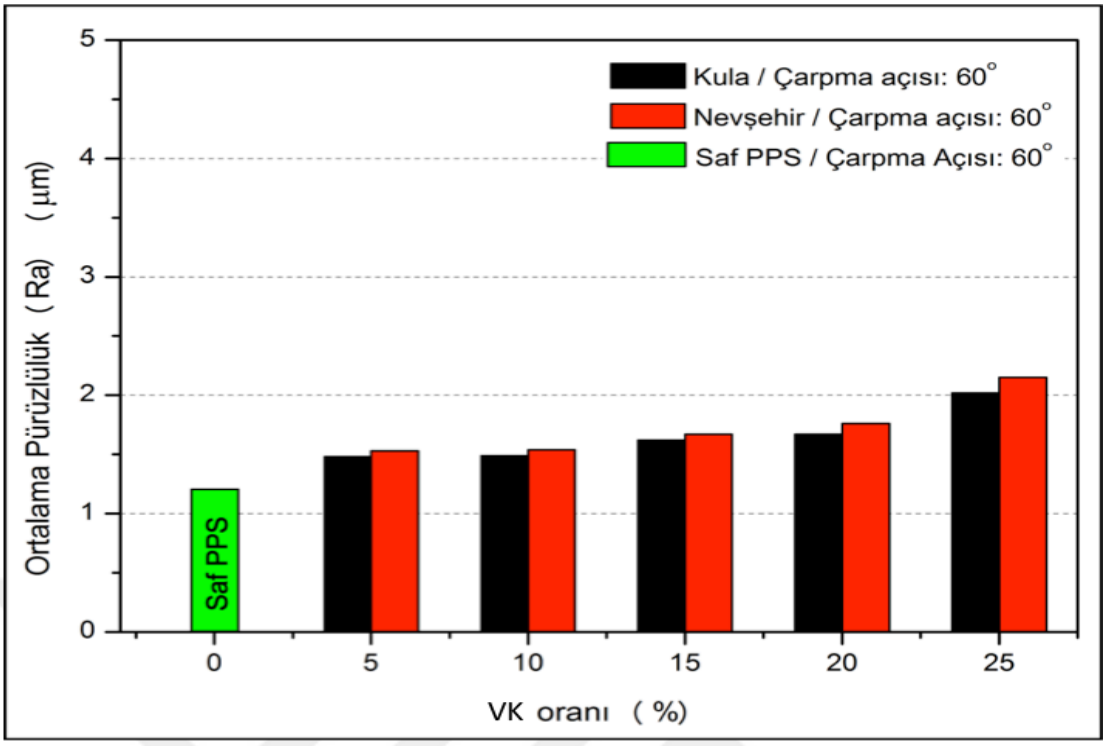
Şekil 3.20. 15° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi



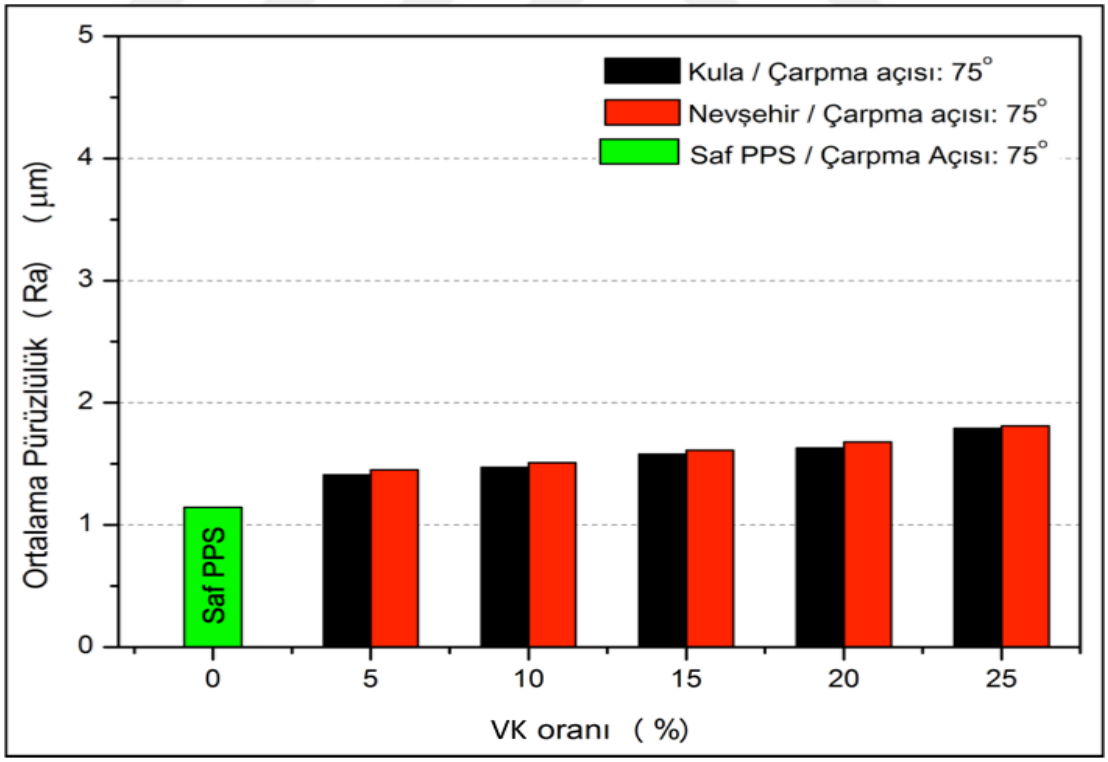
Şekil 3.21. 30° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi



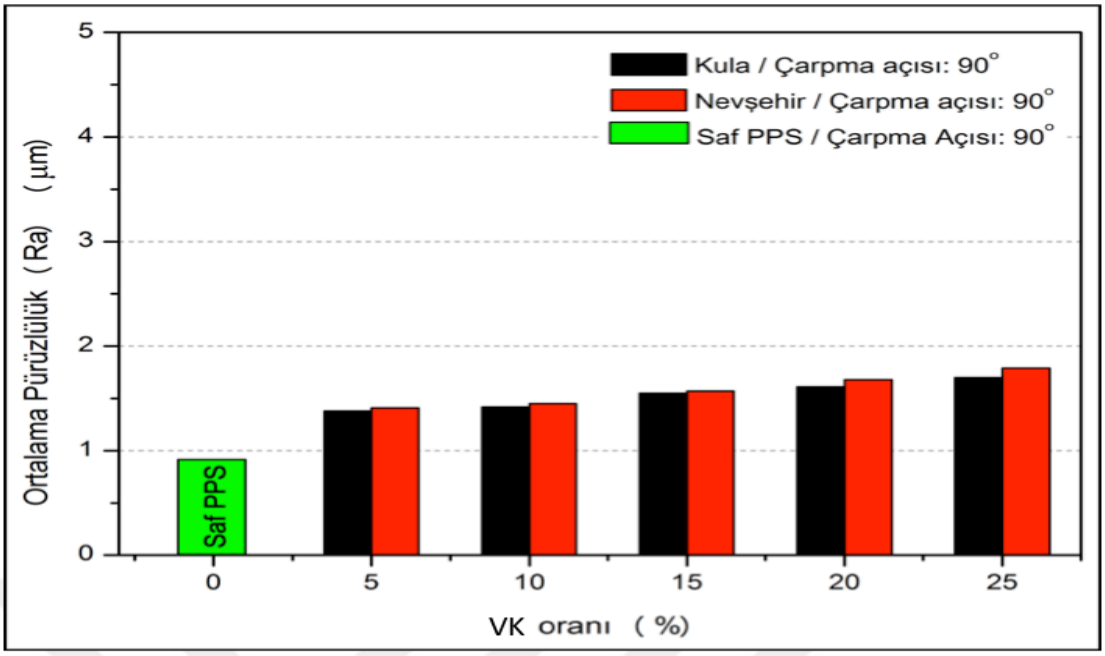
Şekil 3.22. 45° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi



Şekil 3.23. 60° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi



Şekil 3.24. 75° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozit erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi



Şekil 3.25. 90° çarpma açısında Kula ve Nevşehir VK takviyeli PPS kompozitin erozyon krateri profili ortalama pürüzlülük değerinin %VK oranına göre değişimi

3.2.5. Saf PPS'ye göre termal özellikler açısından optimum VK takviye oranının belirlenmesi

PPS polimeri ve farklı oranlardaki VK takviyeleri saf PPS polimerinin DSC ve DMTA testlerinde elde edilen optimum proses parametrelerine göre karıştırılıp enjeksiyonda basılarak üretimler gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.22). Üretilen VK/PPS numuneleri erime ve kristallenme davranışları için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazında dinamik mekanik termal analizleri için ise DMTA cihazında test edilmiştir.

Tablo 3.22. Farklı oranlara sahip Kula ve Nevşehir VK/PPS kompozitlerinin DSC ve DMTA testleri için proses parametreleri

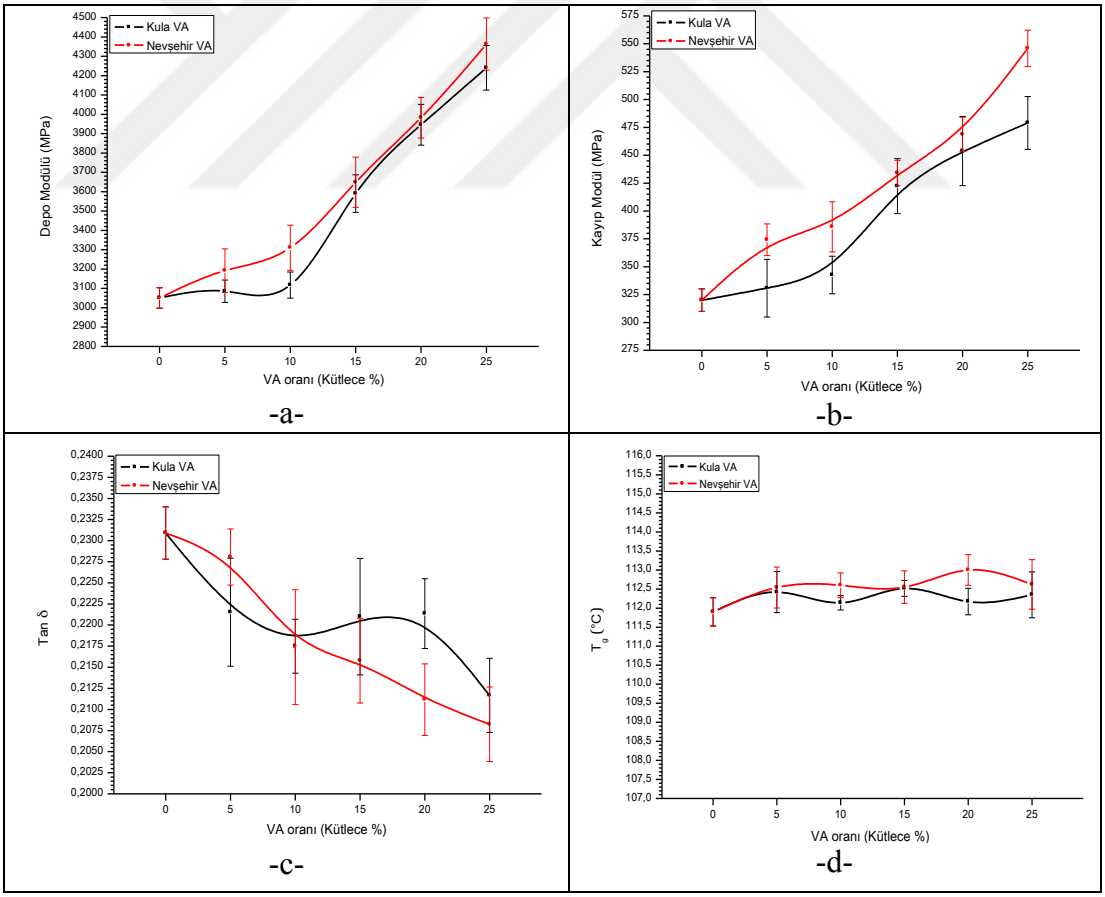
Üretim Cihazı	Üretim Parametreleri	Birim	DSC Testi	DMTA Testi
Ekstrüder	Karıştırma sıcaklığı	(°C)	340	340
Ekstrüder	Karıştırma devri	(d/dk)	75	75
Ekstrüder	Karıştırma süresi	(dk)	5	5
Enjeksiyonla kalıplama	Kalıp sıcaklığı	(°C)	150	145
Enjeksiyonla kalıplama	Enjeksiyon basıncı	(bar)	12	12
Enjeksiyonla kalıplama	Ütüleme basıncı	(bar)	12	10
Enjeksiyonla kalıplama	Ütüleme süresi	(s)	10	5

İş paketinin ilk kısmında PPS'ye takviye edilecek hem Kula hem de Nevşehir VK partiküllerinin dinamik mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Kütlece %25 oranına kadar PPS'ye yüklenen VK partiküllerinin en iyi dinamik mekanik özellikler açısından optimum takviye oranı belirlenecektir. Öncelikle proses optimizasyonu gerçekleştirilen saf PPS'nin dinamik mekanik özellikleri Tablo 3.23'de verilmiştir.

Tablo 3.23. Saf PPS'nin optimize edilen prosese göre elde edilen DMTA test sonuçları

Depolama Modülü (MPa)	Kayıp Modül (MPa)	tanδ	T_g (°C)
3050±53	320±10	0,2309±0,0031	111,90±0,37

VK takviyesinin etkilerini incelemek için bu veriler referans değer olarak ele alınacaktır. Bu sonuçlara kıyasla VK takviyesi sonucu bu özelliklerdeki değişimler Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



Şekil 3.26. VK/PPS kompozitlerinin dinamik mekanik termal özellikleri

Şekil 3.26-a'da incelendiğinde her iki tipteki VK takviye oranı arttıkça oda sıcaklığındaki camsı depolama modülü değerlerinin de sürekli arttığını görmekteyiz. Bu olay, rijit partiküller ile takviye edilmeye çalışılan polimer kompozitler için zaten beklenen bir sonuçtur [44]. Bu türlü bir takviye kompoziti oluşturan bileşenlerin ara yüzeyinde daha büyük bir gerilme iletimine olanak sağlar ki bu da rijitliğin artmasına yol açar [45].Herhangi bir takviye oranı için Nevşehir VK partikülleri Kula VK partiküllerinden daha iyi depolama modülü değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Bu sonuç da Nevşehir VK partiküllerin Kula VK olanlardan daha rijit olduğunun bir göstergesidir. Şekil 3.26-b VK takviyesine bağlı olarak kayıp modül kıyaslamasını göstermektedir. Açıkça görülmektedir ki takviye oranı arttıkça kayıp modül değerleri de sürekli artış göstermektedir. Kayıp modülün ısıya dönüşen mekanik enerji ölçütü olduğu daha önce belirtilmişti. Buna göre VK miktarı arttıkça her iki tür için de ısıya dönüşen mekanik enerji miktarının arttığını söyleyebiliriz. Bu da sistem içinde daha fazla fiziksel etkileşim anlamına gelmektedir. VK türleri kıyaslandığında ise herhangi bir takviye oranı için Nevşehir VK partiküller ile daha yüksek kayıp modül değerleri ortaya çıkmıştır. Ancak kayıp modülün depo modüle kıyasla daha yüksek olması malzeme içinde daha fazla mekanik kayıp anlamına gelmektedir [46]. Kayıplar genelde "sönümleme" (damping) ifadesi ile anlatılmaya çalışılır ki harmonik salınım hareketinde salınım şiddetinin düşmesidir. Bu nedenle dinamik yükleme altında malzemenin rijitliği ile ilişkili olan sönümleme performansını tanımlamak için kayıp faktör "tanδ" ifadesi daha uygun olacaktır. VK takviyesinin PPS'nin sönümleme performansı üzerine olan etkisi Şekil 3.26-c'de verilmiştir. Sönümleme performansında rijitlik için tanδ'nın düşmesi ile açıklanabilirken bazı endüstriyel uygulamalar için sönümleme kabiliyeti arzu edilebilir. Bu durumda da tanδ'nın yüksek çıkması beklenir. VK takviye oranı arttıkça tanδ'nın da düştüğü görülmektedir. %10 takviye oranına kadar Kula VK partiküller daha rijit bir malzeme sergiletirken daha fazla takviye oranlarında Nevşehir VK partiküller daha rijit bir malzeme ortaya koymuşlardır. Sürekli düşüş gösteren tanδ değeri sönümleme performansının azalması bunun yanında rijitliğin de arttığını göstermektedir. %25 Nevşehir VK takviyesi ile %10 oranında dinamik rijitlik artışı kaydedilmiştir. Bu durum VK takviyesi ile PPS'nin amorf bölgelerindeki zincir parçalarının hareketliliğinin kısıtlanması ile açıklanabilir. Camsı geçiş sıcaklığı T_g, test esnasında tanδ'nın en yüksek değerini gördüğü sıcaklık değeri olarak kaydedilmiştir. VK

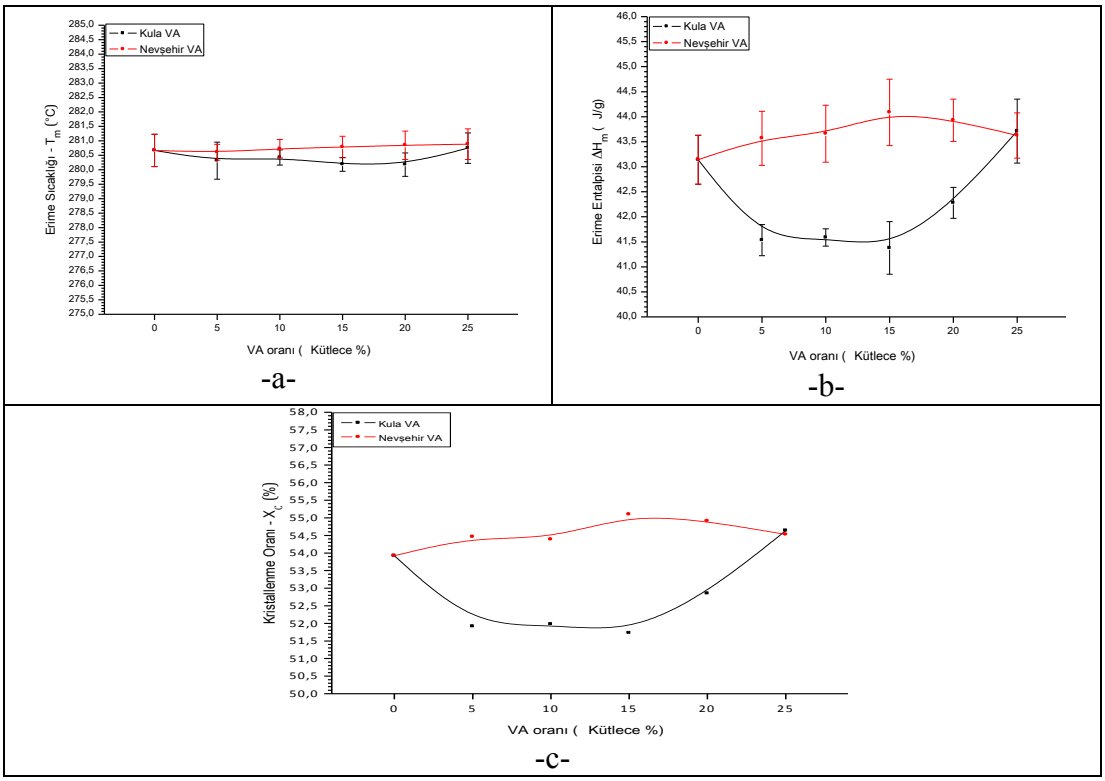
takviyesine bağlı olarak değişen T_g değerleri Şekil 3.26-d'de gösterilmiştir. Saf PPS'nin 111,90°C çıkan T_g değeri VK takviyesi ile kayda değer bir değişim göstermemiştir. Bu sebeple VK/PPS kompozitinin T_g değerinin takviye malzemesi olan VK partiküllerine değil özellikle matris malzemesi olan PPS'ye bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Bu nedenle VK/PPS kompozitlerinin T_g değerlerinde bir artış arzu ediliyorsa matris malzemesi üzerinde çalışmalar örnekse ısıl işlem gibi prosesler denenmelidir.

VK takviyesinin PPS'nin termal özelliklerinden erime sıcaklığı, erime entalpisi ve kristallik oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Diferansiyel taramalı kalorimetri cihazında yapılan testlerde endotermik eğrinin maksimum değeri aldığı sıcaklık değeri erime sıcaklığı olarak kaydedilmiştir. VK takviyesi ile PPS'nin erime sıcaklığı değişimi sonuçları Şekil 3.27'de verilmiştir. VK oranına bağlı olarak PPS'nin T_m değerlerindeki değişim Şekil 3.27-a'da verilmiştir. Şekildeki grafiklere bakıldığında VK takviyesi ile T_m'de önemli bir değişim gözlenmemiştir. Buna karşın Nevşehir partiküller ile VK/PPS kompozitleri az da olsa daha yüksek T_m değerlerine sahip olmuştur. Polimerlerin erime sıcaklıkları kristallerinin oluşum dereceleri ile ilişkilidir [47].Bu nedenle VK ilavesinden etkilenmeyen T_m değerleri kristallerin lamel kalınlığının ve sferulit boyutunun da etkilenmediğini göstermektedir. Şekil 3.27-b'de verilen erime entalpisi grafikleri incelendiğinde Kula ve Nevşehir partiküllerin birbirinden çok farklı etkisi olduğu görülmektedir. Nevşehir VK takviyesi ile %15 takviye oranına kadar standart sapma dahilinde az da olsa bir artış görülen erime entalpisi takviye oranının daha da artması ile düşmeye başlamıştır. Ancak %25 Nevşehir VK takviye oranında dahi hala saf PPS'nin erime entalpisi kadarlık bir değer korunmuştur. Bunun yanında Kula VK ilavesinde tam tersine %15 seviyesine kadar erime entalpisi değerlerinde düşüş görülürken daha sonraki takviye oranlarında erime entalpisi artışa geçip ancak %25 takviye oranında saf PPS ile yaklaşık aynı erime entalpisi elde edilmiştir.

Erime entalpisine bağlı olarak elde edilen kristallik oranı (X_c) aşağıdaki 3.1'deki formül ile hesaplanmıştır;

$$X_c = \frac{\Delta H_m x 100}{\Delta H_m^0 x \omega} \qquad (3.1)$$

Burada "ΔH_m" numunelerin erime entalpisini, "ΔH_m^o" %100 kristalin PPS için erime entalpisi değerini (ΔH_m^o=80 J/g)ve "w" de VK/PPS kompozitleri içindeki PPS oranını göstermektedir [46]. Kristallik oranı grafikleri incelendiğinde erime entalpisi ile aynı sonuçların olduğu açıkça görülmektedir. Saf PPS'nin proses optimizasyonu sonucu elde edilen kristallik oranı %53,9 olarak kaydedilmiştir. VK takviyesine bağlı olarak %15 Nevşehir VK partikülleri ile az da olsa kristallik oranında bir artış kaydedilmiştir ancak daha sonraki ilaveler ile kristallik oranı ilk değerine yaklaşmıştır. Kula VK takviyesinde ise %15 oranına kadar %52 kristallik oranına kadar düşüş görülmüştür; daha sonraki oranlarda artışa geçen kristallik oranı özellikle %25 takviye oranında tekrar ilk değerini almıştır. Bilindiği üzere dolgu takviyeli-polimer kompozitlerin kristallenme davranışını etkileyen iki ana faktör vardır: heterojen çekirdeklenme ve zincir parçalarının hareketliliğinin kısıtlanması. Her iki türdeki VK partikülleri için %25 takviye oranında neredeyse değişmeyen kristallenme durumunu VK partiküllerinin birbirini dengeleyen etkileri ile açıklamak gerekirse; VK ilavesi ile kristallenmeyi negatif yönde etkileyen polimer zincir hareketliliğin kısıtlanması partiküller sayesinde heterojen çekirdeklenmenin kristallenme üzerine pozitif etkisi ile dengelenmiştir.

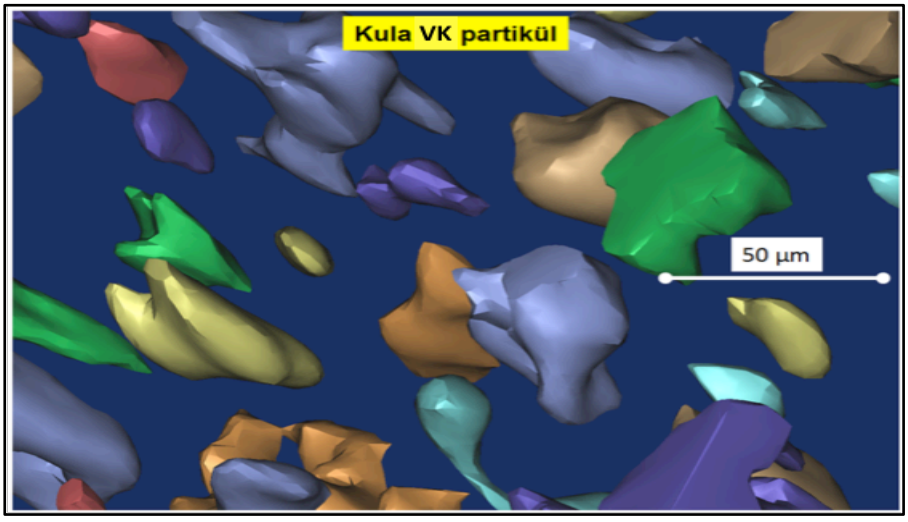


Şekil 3.27. VK/PPS kompozitlerinin erime ve kristallenme özellikleri

3.2.6. VK/PPS kompozit yapı içerisinde VK partiküllerinin dağılımının bilgisayarlı mikro tomografi yöntemi (mikro-CT) ile analizi

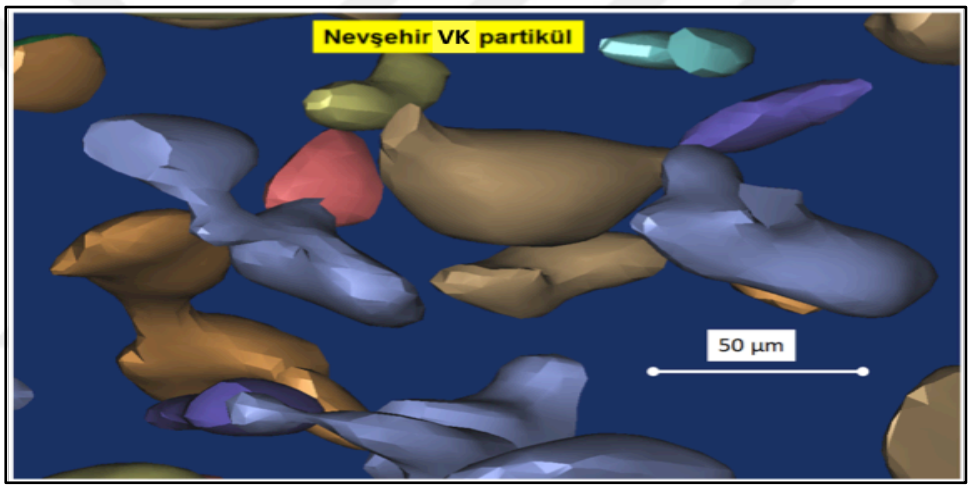
VK/PPS kompozit numunelerden elde edilen mikro-CT taramalarına ait görüntü dilimleri, VK partiküllerinin yalın halde Kula ve Nevşehir VK olmak üzere tanecik halinde görüntüleri ile Kula VK/PPS ve Nevşehir VK/PPS şeklinde %25 takviyeli kompozit numunelerden elde edilmiştir. Tomografik taramalar sonucu her bir tarama başına 2439 adet görüntü dilimi elde edilmiştir. Elde edilen görüntü dilimleri üç boyutlu görüntü işleme programları yardımıyla özel algoritmalar kullanılarak işlenmiş ve incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Kula VK partikülleri elekten geçirildikten sonra toz olarak bir süspansiyon içine konularak mikro-CT taramalarının yapılabilmesi olanaklı kılınmıştır. Şekil 3.28'de mikro-CT taramaları sonrası elde edilen Kula VK partiküllerin görüntü işleme programı ile işlendikten sonra elde edilmiş 3 boyutlu görüntüleri görülmektedir. Mikro-CT taramalarının yüksek çözünürlükteki görüntüleri Kula VK partiküllerinin X-ışını geçirgenliğine bağlı olarak partiküllerin tespit edilmesine olanak sunmuş, efektif 3 boyutlu görüntüler elde edilebilmiştir. Kula VK partikülleri yüzey poroziteleri net şekilde görülebilmektedir. Eleme işlemi sonrası görüntü alanında incelenen partiküllerde 3 µm'den başlayıp değişen büyüklüklerde Kula VK partikülleri tespit edilmiştir.



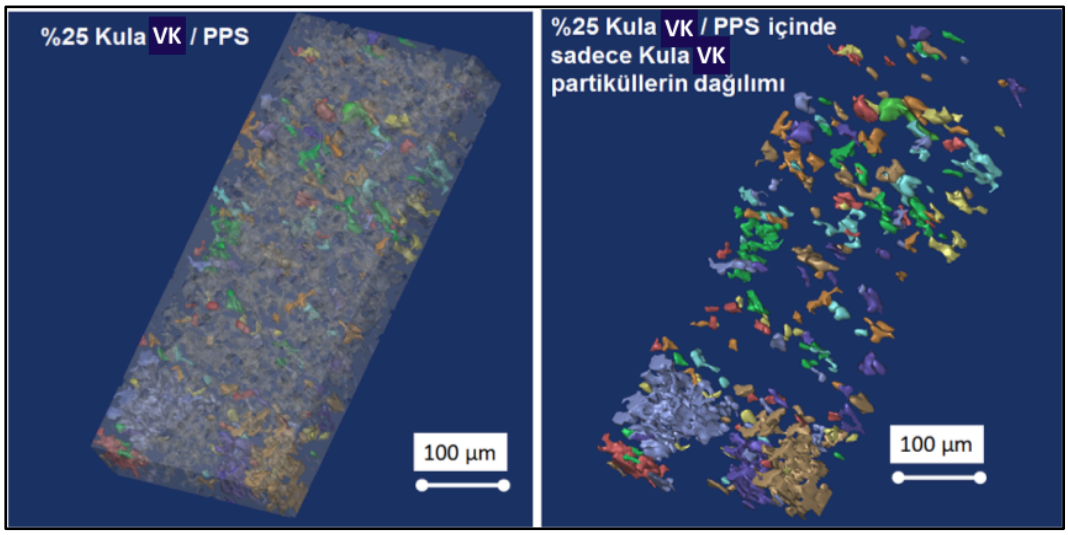
Şekil 3.28. Kula VK partiküllerinin 3 boyutlu mikro-CT görüntüleri

Nevşehir VK partikülleri öğütülmüş halde toz olarak bir süspansiyon içine konularak mikro-CT taramalarının yapılabilmesi olanaklı kılınmıştır. Mikro-CT taramalarının yüksek çözünürlükte görüntüleri Nevşehir VK partiküllerinin X-ışını geçirgenliğine bağlı olarak partiküllerin tespit edilmesine olanak sunmuş, efektif 3 boyutlu görüntüler elde edilebilmiştir. Şekil 3.29'da mikro-CT taramaları sonrası elde edilen Nevşehir VK partiküllerin görüntü işleme programı ile işlendikten sonra elde edilmiş 3 boyutlu görüntüleri görülmektedir. Nevşehir VK partikülleri yüzey poroziteleri öğütme işlemi sonrası büyük oranda ortadan kalkmıştır. Öğütme işlemi sonrası görüntü alanında incelenen partiküllerde 5 µm'den başlayıp değişen büyüklüklerde Nevşehir VK partikülleri tespit edilmiştir.



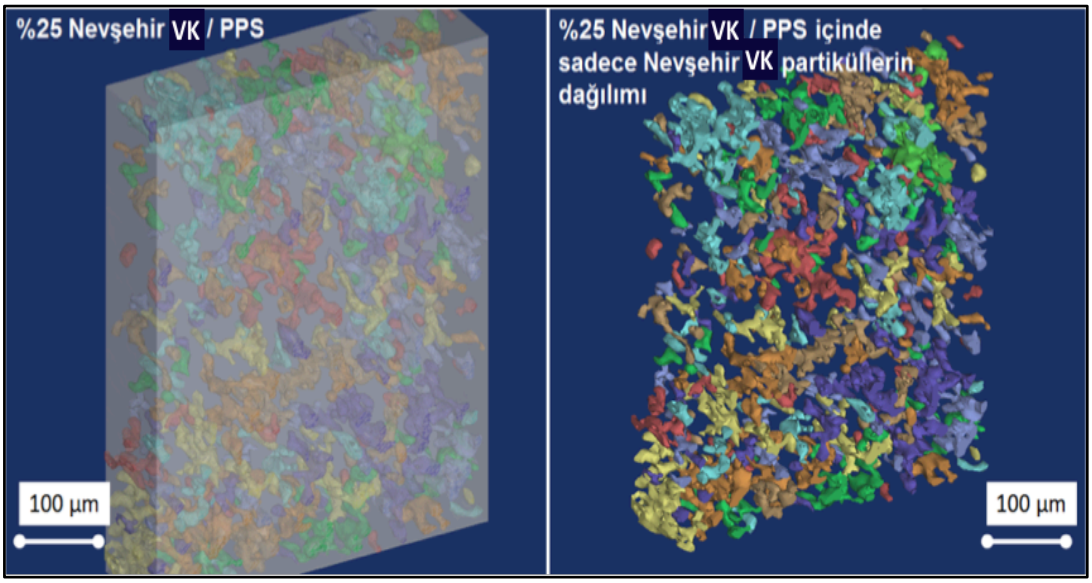
Şekil 3.29. Nevşehir VK partiküllerinin 3 boyutlu mikro-CT görüntüleri

Şekil 3.30'da %25 takviyeli Kula VK/PPS kompozitinin mikro-CT taramaları sonrası elde edilmiş 3 boyutlu görüntüsü görülmektedir. 71 µm'un altında boyutları olan Kula VK partiküllerinin ağırlıkça %25 oranında PPS'ye katılması sonucu hemen hemen homojen bir dağılım sergiledikleri görülmektedir. Hemen hemen homojen olmalarının nedeni yüzde miktarının yeterli olması sonucu partikül yakınlaşmaları ve temasları ortaya çıkmıştır. Bu nedenle %25 Kula VK takviyesi için homojen dağılım görülmekle birlikte limit bir oran olduğu söylenebilir.



Şekil 3.30. %25 Kula VK/PPS kompozitinin 3 boyutlu mikro-CT görüntüleri

Şekil 3.31'de %25 takviyeli Nevşehir VK/PPS kompozitin elde edilmiş 3 boyutlu görüntüsü görülmektedir. Nevşehir VK partikülleri öğütme işlemi sonrası tane boyutlarında küçülmeye uğrayarak parçalanmıştır. Eleme sonrası 71 µm altı boyutlarında olan Nevşehir VK partiküllerinin PPS polimeri içinde hemen hemen homojen dağıldığı görülmektedir. Ağırlıkça %25 oranı Nevşehir partikülleri için de kritik takviye oranı olarak görülmektedir. Çünkü Kula VK partiküllerinde olduğu gibi Nevşehir partiküllerinde birbirlerine çok yaklaştıkları, bazı bölgelerde temas halinde oldukları açıktır.



Şekil 3.31. %25 Nevşehir VK/PPS kompozitinin 3 boyutlu mikro-CT görüntüleri

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Saf PPS Malzemesinin Proses Optimizasyonu

4.1.1. Saf PPS'nin termal açıdan erime ve kristallenme özellikleri için proses optimizasyonu

- Saf PPS'nin ekstrüder ve enjeksiyon kalıplama prosesi ile üretilmesinde erime sıcaklığı ve erime entalpisi özelliklerinin en yüksek seviyelerinin elde edilmesi için Taguchi deney tasarımı ile proses optimizasyonu yapılmıştır.
- Optimizasyon sonucu, her iki özellik için karıştırma sıcaklığı parametresi ve 340 °C seviyesi en etkin parametre ve seviyesi olarak tespit edilmiştir.
- Optimize edilen proses ile üretilen saf PPS'nin erime sıcaklığı 280,67°C erime entalpisi ise 43,14 J/g olarak elde edilmiştir.
- Bu sonuçlar volkanik kül takviyesinin arzu edilen özellikler üzerindeki etkisini incelemek üzere referans değerler olarak kaydedilmiştir.

4.1.2. Saf PPS'nin dinamik mekanik termal özellikleri için proses optimizasyonu

- Saf PPS'nin ekstrüder ve enjeksiyon kalıplama prosesi ile üretilmesinde tanδ özelliğinin en düşük ve T_g özelliklerinin en yüksek seviyelerinin elde edilmesi için Taguchi deney tasarımı ile proses optimizasyonu yapılmıştır.
- Optimizasyon sonucu, her iki özellik için karıştırma sıcaklığı parametresi ve 340°C seviyesi en etkin parametre ve seviyesi olarak tespit edilmiştir.
- Optimize edilen proses ile üretilen saf PPS'nin tanδ değeri 0,2309 ve T_g değeri ise 111,90°C olarak elde edilmiştir.
- Bu sonuçlar volkanik kül takviyesinin arzu edilen özellikler üzerindeki etkisini incelemek üzere referans değerler olarak kaydedilmiştir.

4.1.3. Saf PPS'nin mekanik açıdan eğilme özellikleri için proses optimizasyonu

- Saf PPS'nin ekstrüder ve enjeksiyon kalıplama prosesi ile üretilmesinde eğilme dayanımı ve modülü özelliklerinin en yüksek seviyelerinin elde edilmesi için

Taguchi deney tasarımı ile proses optimizasyonu yapılmıştır.

- Taguchi metoduna sonuçlarına göre karıştırma sıcaklığı parametresi ve 340°C seviyesi en iyi eğilme özelliklerinin sağlanması için en etkin parametre ve seviyesi olarak tespit edilmiştir.
- Taguchi deney tasarımı metodu ile yapılan optimize edilmiş ortak (hem eğilme dayanımı hem de modülüne göre) prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin eğilme dayanımı ve modülü değerleri sırasıyla 117,82±0,9 MPa ve 3368±38 MPa olarak elde edilmiştir.
- Optimize edilmiş ortak (hem eğilme dayanımı hem de modülü) prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin eğilme dayanımı ve eğilme modulü değerlerinin literatürde belirtilen çalışmalardaki deneysel sonuçlara göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

4.1.4. Saf PPS'nin mekanik açıdan çekme özellikleri için proses optimizasyonu

- Saf PPS'nin ekstrüder ve enjeksiyon kalıplama prosesi ile üretilmesinde çekme dayanımı ve modülü özelliklerinin en yüksek seviyelerinin elde edilmesi için Taguchi deney tasarımı ile proses optimizasyonu yapılmıştır.
- Taguchi metoduna sonuçlarına göre karıştırma sıcaklığı parametresi ve 340°C seviyesi en iyi çekme özelliklerinin sağlanması için en etkin parametre ve seviyesi olarak tespit edilmiştir.
- Taguchi deney tasarımı metodu ile yapılan optimize edilmiş ortak (hem eğilme dayanımı hem de modülüne göre) prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin çekme dayanımı ve modülü değerleri sırasıyla 79,35±0,9 MPa ve 3519±48 MPa olarak elde edilmiştir.
- Optimize edilmiş ortak (hem eğilme dayanımı hem de modülü) prosese göre üretilen saf PPS numunelerinin çekme dayanımı ve eğilme modulü değerlerinin literatürde belirtilen çalışmalardaki deneysel sonuçlara göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

4.1.5. Saf PPS'nin tribolojik açıdan eroziv aşınma özellikleri için proses optimizasyonu

- Saf PPS'nin eroziv aşınma davranışları açısından kritik görülen 15°, 30° ve 90°

çarpma açılarında en düşük kütle kaybı yani eroziv aşınma elde etmek amacıyla proses optimizasyonu Taguchi metodu ile yapılmıştır.

- 15° çarpma açısı için yapılan Taguchi analizi sonuçlarına göre; en düşük aşınma miktarının elde edilmesi için en etkin parametre olan "karıştırma sıcaklığının" 300°C olarak ayarlanması yeterli olacağı görülmüştür.
- En fazla kütle kaybının yaşandığı 30° için Taguchi yardımıyla yapılan proses optimizasyonunda en düşük aşınma miktarını sağlayabilecek en etkin parametrenin sırasıyla karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve kalıp sıcaklığı olduğu görülmüştür. Eroziv aşınmada minimum kütle kaybının; karıştırma sıcaklığının 340°C, karıştırma süresinin 3 dk ve kalıp sıcaklığının 140°C seviyelerinin seçilerek PPS'nin üretilmesi halinde ortaya çıktığı gözlenmiştir.
- 90°'de yapılan eroziv aşınma davranışında aşındırıcıların malzeme yüzeyine gömülerek hedef malzemede kütle artışına sebep olduğundan proses optimizasyonu uygulanırken Taguchi metodu "en yüksek en iyi" karakteristiğine göre yapılmıştır. Yapılan analiz sonrası, 90° çarpma açısında yapılacak eroziv aşındırma için hiçbir parametrenin gömülme ve aşınma davranışı üzerine baskın bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Taguchi analizi yapılarak belirlenen en uygun proses parametrelerine göre üretilen PPS için 15˚, 30˚ ve 90˚ doğrulama testlerinde etkiler açıkça görülmüş, bu üç açıda ortaya çıkan minimum eroziv aşınma oranından daha düşük eroziv aşınma oranları Taguchi analizi yardımıyla elde edilerek optimum prosesler teyit edilmiştir.

4.2. Optimize Edilmiş PPS Polimerine Kula ve Nevşehir Bölgelerinden Temin Edilen VK Takviyesinin Yapılarak Kompozit Üretiminin Gerçekleştirilmesi

4.2.1. Saf PPS'ye göre mekanik özellikler açısından optimum VK takviyesinin belirlenmesi

- Taguchi deneysel tasarımı metodu ile optimize edilmiş saf PPS numunelerin ekstrüder-enjeksiyon kalıplama cihazları ile üretiminden sonra Kula ve Nevşehir VK partikül takviyeleri kütlece %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında PPS'ye katılmış ve bu şekilde üretimler gerçekleştirilmiştir.

- Gerçekleştirilen çekme testlerinden, hem Kula hem de Nevşehir VK takviyeli/PPS kompozitlerinde çekme modülü değerlerinin kütlece VK oranı ile sırasıyla yaklaşık olarak %38 ve %42 oranında arttığı tespit edilmiştir.
- Gerçekleştirilen çekme testlerinden, çekme dayanımı değerlerinin kütlece %15 Nevşehir VK takviyesinde saf PPS polimerinin çekme dayanımı değerine göre yaklaşık olarak %4,5 arttığı belirlenmiştir. Farklı kütle oranlarında Kula VK partiküllerinin saf PPS polimerine eklenmesinin ise dayanım değerlerinde düşüşe sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu düşüşün maksimum olduğu takviye oranı %25 Kula VK partikül takviyesinde yaklaşık olarak %9 olarak saptanmıştır. Bunun sebebi ise, partikül malzemelerinin bazı bölgelerde topaklanması sonucu gerilmenin tüm yapıya iletilememesi olduğu düşünülmektedir.
- Çekme testleri sonrasında yapılan TEM analizlerinden, Nevşehir VK partiküllerinin Kula VK partiküllerine göre PPS matris malzemesi ile daha iyi ara yüzey oluşturduğu, PPS matrisin Nevşehir VK partiküllerini daha iyi sardığı, kesit yüzeylerinde daha az sayıda yerinden çıkmış Nevşehir VK partiküllerinin saptandığı gözlenmiştir. Bununla birlikte Nevşehir VK partikül takviyelerinde az da olsa partikül/matris arayüzeyinde mikro çatlaklar gözlenmiştir.
- Gerçekleştirilen eğilme testlerinden, kütlece %25 Nevşehir ve Kula VK takviye oranlarında saf PPS polimerinin eğilme modülüne göre sırasıyla %42 ve %35 oranında artış tespit edilmiştir.
- Gerçekleştirilen eğilme testlerinden, her iki VK türünde de kütlece %15 orana sahip PPS kompozitlerinin eğilme dayanımlarının en yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir. Kütlece %15 oranlarındaki Nevşehir ve Kula VK takviyeli PPS kompozitlerinin eğilme dayanımları değerlerinin sırasıyla 128,45 MPa ve 122,22 MPa olduğu saptanmıştır. Saptanan değerlerin saf PPS polimerinin eğilme dayanımı değerine göre yaklaşık olarak %9 ve %4'lük bir artışa karşılık geldiği belirlenmiştir.
- Üç nokta eğilme testleri sonrasında yapılan TEM analizlerinden ise, özellikle Kula VK partikül takviyelerinde partiküllerin yerinden çıkması, bununla birlikte Nevşehir VK partikül takviyelerinde ise partikül/matris ara yüzeyinde mikro çatlakların miktarında artış gözlemlenmiştir.

4.2.2. Saf PPS'ye göre tribolojik özellikler açısından optimum VK takviye oranının belirlenmesi

- Farklı oranlarda Kula ve Nevşehir VK partikül takviyesi; sünek karakteristik gösteren saf PPS'nin davranışını değiştirmemiştir. Maksimum eroziv aşınma hem Kula hemde Nevşehir VK/PPS kompozitte sünek karakteristik göstermeye devam ederek 30° çarpma açısında gözlenmiştir.
- Kula VK/PPS kompozitte maksimum eroziv aşınma 30° çarpma açısında, minimum eroziv aşınma 90° çarpma açısında meydana gelmiştir.
- Saf PPS ile karşılaştırıldığında, Kula VK takviyesi eroziv aşınma davranışını kötüleştirmiştir. Kütle kaybı artmıştır.
- Nevşehir VK/PPS kompozitte maksimum eroziv aşınma 30° çarpma açısında, minimum eroziv aşınma 90° çarpma açısında meydana gelmiştir.
- Saf PPS ile karşılaştırıldığında, Nevşehir VK takviyesi eroziv aşınma davranışını kötüleştirmiştir. Kütle kaybı artmıştır.
- Nevşehir VK takviyesinde eroziv aşınmaya bağlı kütle kaybı Kula VK takviyesine göre daha fazla olmuştur. Bir diğer deyişle, Nevşehir VK/PPS kompozitin eroziv aşınma dayanımı Kula VK/PPS kompozite göre daha düşüktür.
- Kütle kayıplarının fazla olması, malzemeden koparak ayrılan aynı hacim oranları için VK/PPS kompozitin yoğunluğunun saf PPS'nin yoğunluğundan daha fazla olması nedeniyle olduğu söylenebilir. Çünkü saf PPS'de aşınarak yüzeyden ayrılan malzemenin yoğunluğu VK takviyesi ile artmıştır.
- Hem Kula hem Nevşehir VK/PPS kompozitlerde takviye elemanı oranı arttıkça yüzey pürüzlülük değeri artmıştır.

4.2.3. Saf PPS'ye göre termal özellikler açısından optimum VK takviye oranının belirlenmesi

- Optimize edilmiş PPS'nin dinamik mekanik termal özelliklerinin VK takviyesi ile değişimi incelenmiştir.
- Depolama modülü ve kayıp modül değerleri artan VK oranı ile sürekli artış göstermektedir.
- Tanδ değeri artan VK oranı ile arzu edildiği gibi düşüş göstermiştir.

- T_g değerleri ise VK oranından önemli derecede etkilenmemiştir.
- Nevşehir VK partikülleri dinamik mekanik özellikler açısından Kula VK partiküllerine kıyasla daha iyi sonuçlar sergilemiştir.
- Optimize edilmiş PPS'nin erime sıcaklığı, erime entalpisi ve kristallenme oranı özelliklerinin VK takviyesi ile değişimi incelenmiştir.
- Her iki tür VK takviyesinde erime sıcaklığı değerlerinde önemli bir değişim tespit edilmemiştir.
- Nevşehir VK takviyesi erime entalpisi ve kristallenme oranını az da olsa artırmıştır.
- Kula VK takviyesi ise erime entalpisi ve kristallenme oranını önce düşürmüş ardından %25 oranında tekrar normal seviye elde edilmiştir.

4.2.4. VK/PPS kompozitlerin mekanik testler (çekme ve eğme) sonrası TEM ile hasar analizleri

- VK/PPS kompozit numunelerin çekme ve üç nokta eğilme yüklemeleri nedeniyle oluşan kırılma yüzeyleri TEM analizleri ile görüntülenmiştir. Bu bağlamda, 250x ve 1000x büyütmelerde numunelerin kırılma yüzeylerinden görüntüler alınmış ve Kula-Nevşehir VK partikülllerinin kütlece oranına bağlı olarak PPS polimeri içerisindeki dağılımları, partikül/matris ara yüzey durumu, matrisin partikülleri sarması gibi durumlar incelenmiştir.
- Çekme testleri sonrasında yapılan TEM analizlerinden, Kula VK partikül takviyelerinde yerinden çıkmış partiküller, partikül-partikül etkileşimi ve partikül/matris arayüzeyinde mikro çatlaklar saptanmıştır.
- Üç nokta eğilme testleri sonrasında yapılan TEM analizlerinden ise, çekme testleri sonrasında elde edilen TEM görüntülerinden farklı olarak özellikle Kula VK partikül takviyelerinde partiküllerin yerinden çıkması ve partikül-partikül etkileşimi mekanizmalarının arttığı, bununla birlikte Nevşehir VK partikül takviyelerinde ise partikül/matris ara yüzeyinde mikro çatlakların miktarının arttığı gözlemlenmiştir.

4.2.5. VK/PPS kompozitlerin eroziv aşınma testleri sonrası yüzeylerinin lazer 3D profilometre ile analizi

- Eroziv aşınma testleri sonrası gerçekleştirilen yüzey pürüzlülük incelemelerinde VK takviyesi kullanımının pürüzlülük değerini saf PPS'ye göre artırdığı görülmüştür.
- Kula VK/PPS kompozitlerde maksimum yüzey pürüzlülüğü 30° çarpma açısında, minimum yüzey pürüzlülüğü ise 90° çarpma açısında gözlenmiştir. Bu sonuçlar eroziv aşınma testleri sonrası elde edilen kütle kayıplarıyla uyum göstermiştir.
- Nevşehir VK/PPS kompozitlerde maksimum yüzey pürüzlülüğü 30° çarpma açısında, minimum yüzey pürüzlülüğü ise 90° çarpma açısında gözlenmiştir. Bu sonuçlar eroziv aşınma testleri sonrası elde edilen kütle kayıplarıyla uyum göstermiştir.
- Nevşehir VK/PPS kompozitlerde her partikül oranında Kula VK/PPS kompozitlere gore eroziv aşınma testleri sonrası daha fazla yüzey pürüzlülük değerleri gözlenmiştir.

Tüm sonuçlar göstermiştir ki dünya rezervinin önemli bir kısmını ülkemizde barındırdığımız inorganik "volkanik kül" partikülleri PPS gibi uçak sanayisinde yaygın kullanımı olan polimerler için alternatif takviye malzemesi olabilir. Mekanik, termal ve tribolojik özellikler açısından önemli gelişmeler kaydedilmesini sağlayan volkanik küller ayrıca düşük maliyetleri sayesinde üretim maliyetlerinin düşmesini sağlamaktadır. Tez çalışması sonuçları dikkate alındığında ülkemizde bolca bulunan bu önemli inorganik rezervin başta havacılık ve otomotiv olmak üzere önemli endüstrilerde takviye elemanı olarak kullanılabileceği önerilmektedir. Polimer esaslı kompozit veya kompozit üretici ve/veya ar-ge firmaları tez kapsamında elde edilen sonuçları değerlendirip kullanarak gerek ürünlerinin özelliklerinin iyileştirilmesinde gerekse maliyetin düşürülmesinde önemli kazanımlar elde edebileceklerdir.

Ülkemizde belirli boyutlarda toz partikülden 10mm çapında parçacıklara kadar geniş ebatlarda temini olabilen volkanik ürünlerin polimer kompozitlerle harmanlanıp ürün haline gelebilmesi için ön hazırlıkların yapılması gerektiği tez çalışmasında ortaya konulmuştur. Bu amaçla volkanik partiküllerin yarı mamul olarak kullanılabileceği forma getirilmesini sağlayacak firmaların var olduğu ve konunun kendilerine

anlatılarak ülke ekonomisine önemli katkısı olabilecek bir yarı mamul ürünün kazandırılması önerilecektir.

Tez çalışmasının sonuçlarının uluslararası akademik camiada yaygınlığının sağlanması için sonuçların ilk kısmı “Thermal, viscoelastic and mechanical properties' optimization of polyphenylene sulfide via optimal processing parameters using the Taguchi method” başlıklı yayın olarak “Journal of Applied Statistics” dergisinde yayınlanmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Kaw A., *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., CRC Press, Florida, 2006.

[2] Çoban O., Polimer Kompozitlerde Çevresel Etkenlerin Darbe Yüklemeleri Altındaki Davranışlarına ve Kırılma Morfolojisine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2007, 232711.

[3] http://sinankoksal.cbu.edu.tr / dosyalar/ konu_ekleri / kompozit - malzemeler-72.pdf (Ziyaret tarihi: 20 Şubat 2017)

[4] Sönmez F. C., Performance Analysis of Repaired Carbon Fiber Composite Materials Which Have Been Manufactured in Aerospace Industry, Master Thesis, University of Turkish Aeronautical Association, Institute of Science and Technology, Ankara, 2016, 438727.

[5] İpek M. Y., Isı Değiştiricilerinde Ashby Yaklaşımı ile Malzeme Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2015, 410025.

[6] Offringa A., New Thermoplastic Composite Design Concept and Their Automated Manufacture, *JEC Composite Magazine*, 2010, **58**, 45-48.

[7] Jones R. M., *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., Taylor & Francis, Philadelphia, 1999.

[8] Güler K., Uçak Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Özelliklerinin İncelenmesi, Lisans Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul, 2003.

[9] Çoban O., Polimer Matrisli Kompozitlerde Partikül Takviyesinin Malzeme İç Yapısına, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 301643.

[10] http://www.yalitimli-aluminyum.com/p/termoplastik.html (Ziyaret tarihi: 10 Mart 2017)

[11] Radden P., Take-off with Fortron PPS: First Ever Primary Structural Components Made of Composites, *Success Story*, 2009, **04**, 1063.

[12] DeArmitt C., Hancock M., Filled Thermoplastics, Editor: Rothon R. N., *Particulate- Filled Polymer Composites*, 2nd ed., Rapra Technology Limited, Shrewsbury, 357-413, 2003.

[13] Sabancı Ş., Fiber Takviyeli Polimer Matriksli Kompozitlerin Enjeksiyon Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 198966.

[14] Zhang K., Zhang G., Liu B., Wang X., Long S., Yang J., Effect of Aminated Polyphenylene Sulfide on The Mechanical Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Polyphenylene Sulfide Composites, *Composites Science and Technology*, 2014, **98**, 57–63.

[15] Duan Y., Cong P., Liu X., Li T., Comparative Study of Tribological Properties of Polyphenylene Sulphide (PPS), Polyethersulfone (PES) and Polysulfone (PSU), *Journal of Macromolecular Science*, 2009, **48**(2), 269-281.

[16] Liang J., Reinforcement and Quantitative Description of İnorganic Particulate-Filled Polymer Composites, *Composites: Part B*, 2013, **51**, 224-232.

[17] Boey F.Y.C., Lee T.H., Yue C.Y., Annealing Effects on the Dynamic Mechanical Properties of Aromatic Polyphenylene Sulphide Fibre Reinforced Composite, *Polymer Testing*, 1991, **10**, 221-228.

[18] Lee T.H., Boey Y.C., Khor K.A., On the Determination of Polymer Crystallinity for a Thermoplastic PPS Composite by Thermal Analysis, *Composites Science and Technology*, 1995, **53**, 259-274.

[19] Goyal R. K., Kambale K. R., Nene S. S., Selukar B. S., Arbuj S., Mulik U. P., Fabrication, Thermal and Electrical Properties of Polyphenylene Sulphide/Copper Composites, *Materials Chemistry and Physics*, 2011, **128**, 114-120.

[20] Şahin A., Karslı N. G., Sınmazçelik T., Comparison of the Mechanical, Thermomechanical, Thermal and Morphological Properties of Pumice and Calcium Carbonate-Filled Poly(phenylene Sulphide) Composites, *Polymer Composites*, DOI: 10.1002/pc.

[21] Küll H., Long Fiber Reinforced Thermoplastics (LFT), *Ticona*, 2000, **341**, 49.

[22] http://www.matweb.com/search/DataSheet (Ziyaret tarihi: 25 Nisan 2017)

[23] Franke J., Baur M., Plastic Used In Aerospace Technology, *Ensinger*, 2014, **22**, 5.

[24] Franke J., Baur M., Plastic Used In Semiconductor Technology, *Ensinger*, 2013, **19**, 6.

[25] Zhang R.C., Lu A., Xu Y., Min M., Xia J.Q., Zhou J.H., Huang Y.G., Li Z.M., Equilibrium Melting Temperature and Spherulitic Growth Rate of Poly(phenylene Sulfide), *European Polymer Journal*, 2009, **45**, 2867–2872.

[26] Nohara L.B., Nohara E.L., Moura A., Gonçalves J.M.R.P., Costa M.L., Rezende M.C., Study of crystallization behavior of poly (phenylene sulfide), *Polimeros: Ciencia e Tecnologia*, 2006, **16**, 104-110.

[27] http://plastics.ulprospector.com/datasheet/ (Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2017)

[28] Collet T., High Performance Compounds for Aviation Market, *Lehmann and Voss Cooperation*, 2015, **5**, 1.

[29] Vite-Torres J., Vite-Torres M., Laguna-Camacho J.R., Escalante-Martínez J.E., Gallardo- Hernández E.A., Vera-Cardenas E.E., Wet Abrasive Behavior of Composite Materials Obtained from Solid Residuals Mixed with Polymer and Ceramic Matrix, *Ceramics International*, 2014, **40**, 9345–9353.

[30] http://www.plasticstoday.com / content / volcanic –ash –coconut-fiber-debut-plastic - automotive-applications/74411408416565 (Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2017)

[31] Chen C.P., Chuang M.T., Hsiao Y.H., Yang Y.K., Tsai C.H., Simulation and Experimental Study in Determining Injection Molding Process Parameters for Thin-Shell Plastic Parts via Design of Experiments Analysis, *Expertise*, 2009, **36**, 10752–10759.

[32] Tewari U.S, Harsha A.P., Hager A.M., Friedrich K., Solid Particle Erosion of Carbon Fibre and Glass Fibre Epoxy Composites, *Composites Science and Technology*, 2003, **63** , 549-557.

[33] Caglar B., Fischer P., Kauranen P., Karttunen M., Elsner P., Development of Carbon Nanotube and Graphite Filled Polyphenylene Sulfide Based Bipolar Plates for All- Vanadium Redox Flow Batteries, *Journal of Power Sources*, 2014, **256**, 88-95.

[34] Lu S.X., Cebe P., Capel M., Effects of Molecular Weight on the Structure of Poly(phenylene sulfide) Crystallized at Low Temperatures, *Macromolecules*, 1997, **30**, 6243-6250.

[35] Chen Z., Li T., Yang Y., Liu X., Lv R., Mechanical and Tribological Properties of PA/PPS Blends, *Wear*, 2004, **257**, 696-707.

[36] Deng S., Cao L., Lin Z., Qiu W., Liang K., Li W., Nanodiamond as an Efficient Nucleating Agent for Polyphenylene Sulfide, *Thermochimica Acta*, 2014, **584**, 51–57.

[37] Gopakumar T .G., Ponrathnam S., Rajan C.R., Fradet A., Poly(phenylene sulphide)/Thermotropic Liquid Crystalline Polymer Blends: Comparative Study of Thermal Properties, Phase Behaviour and Morphology of Blends Generated by Different Techniques, *Polymer*, 1998, **39**, 2221-2226.

[38] Guevara-Morales A., Figueroa-Lo´pez U., Residual Stresses in Injection Molded Products, *J. Mater. Sci*., 2014, **49**, 4399–4415.

[39] Young R.T., Baird D.G., The influence of Processing Variables on Injection Molded in Situ Composites Based on Polyphenylene Sulfide and a Melt Processable Glass, *Composites Part B*, 2000, **31**, 209-221.

[40] Díez-Pascual, Ana M., Guan J., Simard B., Gómez-Fatou M.A., Poly(phenylene sulphide) and Poly(ether ether ketone) Composites Reinforced with Single-walled Carbon Nanotube Buckypaper: II – Mechanical Properties, Electrical and Thermal Conductivity, *Composites: Part A*, 2012, **43**, 1007-1015.

[41] Hussain M., Nakahira A., Nishijima S., Niihara K., Evaluation of Mechanical Behavior of CFRC Transverse to the Fiber Direction at Room and Cryogenic Temperature, *Composites: Part A,* 2000, **31**, 173–179.

[42] Rong M.Z., Zhang M.Q., Pan S.L., Friedrich K., Interfacial Effects in Polypropylene– Silica Nanocomposites, *J Appl Polym Sci*., 2004, **92**, 1771–1781.

[43] Hundiwale D.G., Kapadi U.R., Desai M.C., Patil A.G., Bidkar S.H., New Economical Filler for Elastomer Composites, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2004, **43**(3), 615- 630.

[44] Bloom P.D., Baikerikar K.G., Otaigbe J.U. and Sheares V.V., Development of Novel Polymer/Quasicrystal Composite Materials, *Mater. Sci. Eng*., 2000, **294**, 156-159.

[45] Bakar N.A., Chee C.Y., Abdullah L.C., Ratnam C.T., Ibrahim N.A., Thermal and Dynamic Mechanical Properties of Grafted Kenaf Filled Poly(vinyl chloride)/Ethylene Vinyl Acetate Composites, *Materials and Design*, 2015, **65**, 204-211.

[46] Montazeri A., Pourshamsian K., Riazian M., Viscoelastic Properties and Determination of Free Volume Fraction of Multi-walled Carbon Nanotube/Epoxy Composite Using Dynamic Mechanical Thermal Analysis, *Materials and Design*, 2012, **36**, 408-414.

[47] Yang Y., Duan H., Zhang S., Niu P., Zhang G., Long S., Wang X., Yang J., Morphology Control of Nanofillers in Poly(phenylene sulfide): A Novel Method to Realize the Exfoliation of Nanoclay by SiO_2 via Melt Shear Flow, *Composite Science and Technology*, 2013, **75**, 28-34.

[48] Tang L.C., Zhang H, Wu X.P., Zhang Z., A Novel Failure Analysis of Multi-walled Carbon Nanotubes in Epoxy Matrix, *Polymer*, 2011, **52**, 2070–2074.

[49] Huan Z., Xiaodong Z., Li F., Ai L., Study on Mechanical Properties of Powder Impregnated Glass Fiber Reinforced Poly(phenylene sulphide) by Injection Molding at Various Temperatures, *Journal of Applied Polymer Science*,2010,**115**,2019–2027.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Çoban O., **Kıvanç T.**, Bora M.Ö., Özcan B., Sınmazçelik T., Fidan S., Thermal, Viscoelastic and Mechanical Properties' Optimization of Polyphenylene Sulphide via Optimal Processing Parameters Using the Taguchi Method, *Journal of Applied Statistics*, 2016, **43**(14), 2661-2680.

[2] Yurduseven K., Fidan S., Tuna V., Bora M. Ö., Çoban O., **Kıvanç T.**, Low Velocity Impact Damage Evaluation of Quartz Fiber Reinforced Aircraft Radome Composite, *15. Uluslararası Malzeme Sempozyumu*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 15-17 Kasım 2014.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında İzmit'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini kocaeli'nde tamamladı. 2006 yılında girdiği Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Elektrik Elektronik Bölümü'nden 2011 yılında mezun oldu. 2011-2013 yılları arasında Türk Hava Yolları, 2013-2014 yılları arasında Onur Air'da Uçak Bakım Teknisyeni olarak görev yaptı. 2014 yılında başladığı Borajet Havayollarında 2017 yılına kadar Uçak Bakım Teknisyeni olarak çalıştı. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisans eğitimine halen devam etmektedir.