

**T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TİTANYUM KARBÜR (TİC) TAKVİYELİ EPOKSİ İLE
GÜÇLENDİRİLMİŞ HİBRİT KOMPOZİTLERİN ÇARPMA
DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

Mustafa TAŞLIDERE

**Danışman
Prof. Dr. M. Reşit USAL**

ISPARTA - 2019



© 2019 [Mustafa TAŞLIDERE]

TEZ ONAYI

**TİTANYUM KARBÜR (TİC) TAKVİYELİ EPOKSİ İLE
GÜÇLENDİRİLMİŞ HİBRİT KOMPOZİTLERİN ÇARPMA
DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

Mustafa TAŞLIDERE tarafından hazırlanan bu tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman Prof. Dr. M. Reşit USAL
Süleyman Demirel Üniversitesi

Üye Dr. Öğr. Üyesi Tansel KOYUN
Süleyman Demirel Üniversitesi

Üye Dr. Öğr. Üyesi Ergün KORKMAZ
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



Yukarıdaki Jüri kararı Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../.... tarih ve/..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof.Dr. Yusuf UÇAR
Enstitü Müdürü

ETİK BEYANI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezime ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

12/07/2019

Mustafa TAŞLIDERE



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Kompozit Malzemelerde Darbe	6
1.2. Tabakalı Kompozitlerde Darbe Sonucu Meydana Gelen Hasarlar	7
1.2.1. Matris hasarı.....	7
1.2.2. Delaminasyon.....	9
1.2.3. Fiber kopması.....	10
1.3. Düşük Hızda Darbe Test Metodları	10
1.3.1. Ağırlık düşürmeli test metodu.....	10
2. KAYNAK ÖZETLERİ	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM	18
3.1. Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	21
3.2. Çekme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	21
3.3. Bası Özelliklerinin Belirlenmesi	25
3.4. Kayma Özelliklerinin Belirlenmesi	26
3.5. Darbe Testleri.....	27
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	29
4.1. TİC Nanopartikül Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Kuvvet Çökme (F-d) Grafikleri.....	30
4.2. Maksimum Kuvvet Darbe Enerjisi Grafiği.....	36
4.3. TİC Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Kuvvet-Zaman (F-t) Grafikleri.....	37
4.4. TİC Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Çökme-Zaman (d-t) Grafikleri.....	39
4.5. Titanyum Karbür Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Absorbe Edilen Enerji - Zaman Grafikleri (Ea-t) Grafikleri	41
4.6. TİC Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Hız-Zaman (V-t) Grafikleri....	43
4.7. Maksimum Çökme Darbe Enerjisi Grafiklerinin İncelenmesi	46
4.8. Maksimum Kuvvet Maksimum Çökme Grafiklerinin İncelenmesi.....	47
4.9. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analiz	49
4.10. Explicit Dynamic Çözüm Stratejisi.....	49
4.11. Explicit Dynamic İçin Temel Formülasyon.....	50
4.12. Ansys Workbench Explicit Dynamics Uygulaması.....	53
4.12.1. Kompozit malzemenin özelliklerinin belirlenmesi	53
4.12.2. Kompozit malzemenin geometrisinin modellenmesi.....	54
4.12.3. Kompozit malzemenin elemanlara ayrılması.....	55
4.12.4. Kompozit malzemenin katmanlarının modellenmesi.....	56
4.13. Vurucu Ucun Modellenmesi Ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	60
4.13.1. Mekaniksel malzemenin özelliklerinin belirlenmesi	61
4.13.2. Mekaniksel vurucu ucun geometrisinin modellenmesi.....	61
4.13.3. Kompozit malzemenin elemanlara ayrılması.....	62

4.14. Expilicit Dynamics Modülünün Uygulanması.....	63
4.15. Darbe Deneylerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Sayısal Analizi.....	67
4.15.1. TİC takviyeli numunelerin 10j sayısal analizleri	68
4.15.3. TİC takviyeli numunelerin 30j sayısal analizleri	72
4.15.4.TİC takviyeli numunelerin çökme- darbe enerjisi deneysel ve sayısal karşılaştırılması.....	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	76
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	82



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TİTANYUM KARBÜR (TiC) TAKVİYELİ EPOKSI İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ HİBRİT KOMPOZİTLERİN ÇARPMA DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

Mustafa TAŞLIDERE

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Reşit USAL

Bu çalışmada, titanyum karbür (TiC) ile güçlendirilmiş ağırlıkça saf, %1, %3 ve %5 oranında TiC içeren epoksi reçineli cam/kevlar kumaş hibrit kompozit plakalar hazırlanmıştır. Tüm hazırlanan kompozit panellerin deneysel ve sayısal olarak mekanik özellikleri ve darbe davranış ölçümleri incelenmiştir. Polimer kompozit malzemeler elle yatırma yöntemi ile hazırlanmıştır. 207gr/m² yüzey alanına sahip düz aramid fiber (Kevlar 49), 300gr/m² yüzey alanına sahip cam fiber ve F-1564 epoksi reçineler sırası ile takviye edici ve matris malzeme olarak kullanılmıştır.

Kompozit panellerin mekanik özelliklerini belirlemek için elastisite modülü, kayma modülü ve poisson oranı universal çekme test cihazı ile elde edilmiştir. Kompozit paneller 100x100 mm boyutlarında kesilmiştir. 12 tabakalı plakaya sahip numuneler 3 sıra kevlar 1 sıra cam elyaf tabaka olmak üzere sıralanmıştır. Ansys workbench explicit dinamik programı ile elde edilen ölçüm verileri sayısal olarak kıyaslanmıştır.

Sonuç olarak, 10J, 20J ve 30J darbe enerjileri altında elde edilen kuvvet-çökme, kuvvet-zaman, absorbe edilen enerji-zaman ve hız-zaman grafikleri darbe testinde elde edilmiştir. Kompozit panellerdeki TiC kontrasyonuna bağlı olarak, %3 TiC güçlendirilmiş numunelerde %15 oranında elastisite modülünün iyileştiği ve darbe direncinde %6 oranlarında daha fazla enerji absorbe edildiği açıkça görülmüştür. Fiber dağılımları ve kırılması uygulanan yükler altında tüm numunelerde görülürken herhangi bir delinme olayı kompozit panellerin alt yüzeyinde görülmemiştir. Sayısal analizlerle elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Epoksi reçine, Titanyum karbür, Kevlar, Cam fiber, Kompozit, Ansys workbench explicit dynamics.

2019, 82 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF IMPACT BEHAVIOUR OF TiC ADDED EPOXY REINFORCED HYBRID COMPOSITES

Mustafa TAŞLIDERE

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Manufacturing Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. M. Reşit USAL

In this study, hybrid composite plates are prepared by titanium carbide (TiC) reinforced epoxy resin including bare, 1%, 3%, 5% wt. with mixture of kevlar/glass fabrics. For all prepared composite panels, their mechanical properties and impact behaviour measurements are investigated experimentally and numerically. Hand lay-up method was used to prepare polymer composite materials. Plain aramid fiber (Kevlar 49) with surface area of 207 g/m², E-glass fibers with 300 g/m², F-1564 epoxy resin is used as reinforcement fiber and matrix materials, respectively.

To determine the mechanical properties of the composite panels, modulus of elasticity, shear modulus and poisson ratio is obtained from universile tensile test equipment. The composite plates were cut into dimensions of 100 x 100 mm. Three layers of aramid fiber is set in type as one layer E-glass and totally prepared a 12-layer plate for each set sample. The data obtained from the measurements are compared with the numerical data calculated by Ansys-workbench explicit dynamic program.

As a result, impact test such as load-deflection, force-time, absorbed energy-time, velocity-time curves are performed under 10J, 20J and 30J impact energy. Depending on the concentration of TiC in the composite panel, it is clearly seen that 3% wt. of TiC addition gives the highest mechanical properties (increases %15 of elastisite modulus) and impact resistance (increases upto 6% of absorbed energy). Fiber segregations and breakage is observed for all applied loads while no perforation appeared on the bottom faces of composite panels. It was seen that the results obtained by numerical analyzes were compatible with the experimental results.

Key Words: Epoxy resin, Titanium carbide, Kevlar, Glass fiber, Composite, Ansys workbench explicit dynamics

2019, 82 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Mustafa Reşit USAL'a teőkürlerimi sunarım. Literatür araştırmalarımın yanı sıra deneysel aşamalarda da yardımcı olan değerli hocam Arş. Gör. Dr. Mehmet Fahri SARAÇ'a, teőkür ederim.

5061-YL-17 No`lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teőkür ederim.

Tezimin imalat aşamasındaki desteklerinde dolayı ERNES kompozit şirketine teőkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Mustafa TAŞLIDERE
ISPARTA, 2019

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Elyaf çeşitleri örnekleri.....	2
Şekil 1.2. Hibrit kompozit plakaların şematik katman dizilimi	6
Şekil 1.3. Çeşitli hasar kademelerine ait şematik bir resim	7
Şekil 1.4. Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı.....	8
Şekil 1.5. a) Çam ağacı (b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü hasar örnekleri.....	9
Şekil 1.6. Kompozit yapıda delaminasyon hasar görünümü.....	9
Şekil 1.7. Ağırlık düşürme test cihazının şematik bir resmi	11
Şekil 3.1. El yatırma yöntemi ile numunelerin üretimi.....	18
Şekil 3.2. Mekanik karıştırıcı ile reçine hazırlanışı.....	19
Şekil 3.3. Vakum uygulanan kompozit malzemeler	20
Şekil 3.4. Su jeti cnc makinası ile plakaların ASTM standartlarında kesilmesi.	20
Şekil 3.5. ASTM standartlarına göre üretilmiş numuneler	21
Şekil 3.6. ASTM D3039 Standardına göre numune geometrisi	22
Şekil 3.7. Gerinim ölçer bağlanmış numunenin şematik gösterimi	23
Şekil 3.8. Shimadzu çekme cihazı.....	24
Şekil 3.9. Bası testi bağlama aparatı	25
Şekil 3.10. Kayma testi numunesi ölçüleri.....	26
Şekil 3.11. CEAST Fractovis Plus darbe cihazı.....	27
Şekil 3.12. Numune sabitleme aparatı.....	28
Şekil 4.1. TİC takviyeli numunelerin 10J uygulanmış hasarlı numune fotoğrafları	31
Şekil 4.2. TİC takviyeli numunelerin 10J kuvvet-çökme (F-d) grafikleri	32
Şekil 4.3. TİC takviyeli numunelerin 20J uygulanmış hasarlı numune fotoğrafları	33
Şekil 4.4. TİC takviyeli numunelerin 20J kuvvet-çökme (F-d) grafikleri	34
Şekil 4.5. TİC takviyeli numunelerin 30J uygulanmış hasarlı numune fotoğrafları	35
Şekil 4.6. TİC takviyeli numunelerin 30J kuvvet-çökme (F-d) grafikleri	36
Şekil 4.7. TİC takviyeli numunelerin 10J-20J-30J maksimum kuvvet-darbe enerjisi grafikleri.....	37
Şekil 4.8. TİC takviyeli numunelerin 10J kuvvet-zaman (F-t) grafiği.....	38
Şekil 4.9. TİC takviyeli numunelerin 20J kuvvet-zaman (F-t) grafiği.....	38
Şekil 4.10. TİC takviyeli numunelerin 30J kuvvet-zaman (F-t) grafiği.....	39
Şekil 4.11. TİC takviyeli numunelerin 10J çökme-zaman (d-t) grafiği	40
Şekil 4.12. TİC Takviyeli numunelerin 20J çökme-zaman (d-t) grafiği.....	40
Şekil 4.13. TİC takviyeli numunelerin 30J çökme-zaman (d-t) grafiği	41
Şekil 4.14. TİC takviyeli numunelerin 10J enerji-zaman (Ea-t) grafiği	42
Şekil 4.15. TİC takviyeli numunelerin 20J enerji-zaman (Ea-t) grafiği	42
Şekil 4.16. TİC takviyeli numunelerin 30J enerji-zaman (Ea-t) grafiği	43
Şekil 4.17. TİC takviyeli numunelerin 10J hız-zaman (V-t) grafiği	44

Şekil 4.18. TİC takviyeli numunelerin 20J hız-zaman (V-t) grafiği.....	44
Şekil 4.19. TİC takviyeli numunelerin 30J hız-zaman (V-t) grafiği.....	45
Şekil 4.20. Darbe enerjisi uygulanan numunelerin darbe sonrası üst ve alt yüzey hasar fotoğrafları.....	46
Şekil 4.21. %0, %1, %3, %5 TİC takviyeli numunelerin 10J-20J-30J maksimum kuvvet-darbe enerjisi grafiği.....	47
Şekil 4.22. %0, %1, %3 ve %5 TİC takviyeli numunelerin 10J-20J-30J'de maksimum çökme-maksimum kuvvet grafiği.....	48
Şekil 4.23. Kompozit malzemenin modelleme modülünün belirlenmesi.....	53
Şekil 4.24. Kompozit malzemenin özelliklerinin belirlenmesi.....	54
Şekil 4.25. Kompozit malzemenin geometrisinin modellenmesi.....	55
Şekil 4.26. Kompozit malzemenin elemanlara ayrılması.....	56
Şekil 4.27. Kompozit malzemenin katman özelliklerinin belirlenmesi.....	57
Şekil 4.28. Kompozit malzemenin katman sayısı ve fiber açılarının belirlenmesi.....	57
Şekil 4.29. Kompozit malzemenin elemanlarının referans yönünün belirlenmesi.....	58
Şekil 4.30. Kompozit malzemenin katman yönünün belirlenmesi.....	58
Şekil 4.31. Kompozit malzemenin katmanlarının oluşturulması.....	59
Şekil 4.32. Kompozit malzeme katmanlarına reçine emdirilmesi.....	60
Şekil 4.33. Mekaniksel malzemenin modelleme modülünün belirlenmesi.....	61
Şekil 4.34. Mekaniksel vurucu ucun modellenmesi.....	62
Şekil 4.35. Mekaniksel vurucu ucun elemanlara ayrılması.....	62
Şekil 4.36. Kompozit ve mekaniksel modelin Explicit Dynamics'e import edilmesi.....	63
Şekil 4.37. Modellerin eleman (mesh) yapısının görünümü.....	64
Şekil 4.38. Hız parametrelerinin belirlenmesi.....	64
Şekil 4.39. Vurucu uç hız değerinin girilmesi.....	65
Şekil 4.40. Mesnet noktalarının belirlenmesi.....	65
Şekil 4.41. Analiz parametrelerinin belirlenmesi.....	66
Şekil 4.42. Analiz tipinin belirlenmesi.....	67
Şekil 4.43. %0 TİC takviyeli numunenin 10J sayısal analiz görünümü ve değerleri.....	68
Şekil 4.44. %1 TİC takviyeli numunenin 10J sayısal analiz görünümü ve değerleri.....	68
Şekil 4.45. %3 TİC takviyeli numunenin 10J sayısal analiz görünümü ve değerleri.....	69
Şekil 4.46. %5 TİC takviyeli numunenin 10J sayısal analiz görünümü ve değerleri.....	69
Şekil 4.47. %0 TİC takviyeli numunenin 20J sayısal analiz görünümü ve değerleri.....	70
Şekil 4.48. %1 TİC takviyeli numunenin 20J sayısal analiz görünümü ve değerleri.....	70

Şekil 4.49. %3 TİC takviyeli numunenin 20J sayısal analiz görünümü ve değerleri	71
Şekil 4.50. %5 TİC takviyeli numunenin 20J sayısal analiz görünümü ve değerleri	71
Şekil 4.51. %0 TİC takviyeli numunenin 30J sayısal analiz görünümü ve değerleri	72
Şekil 4.52. %1 TİC takviyeli numunenin 30J sayısal analiz görünümü ve değerleri	72
Şekil 4.53. %3 TİC takviyeli numunenin 30J sayısal analiz görünümü ve değerleri	73
Şekil 4.54. %5 TİC takviyeli numunenin 30J sayısal analiz görünümü ve değerleri	73
Şekil 4.55. TİC takviyeli numunelerin 10J çökme-darbe enerjisi deneysel ve sayısal karşılaştırılması	74
Şekil 4.56. TİC takviyeli numunelerin 20J çökme-darbe enerjisi deneysel ve sayısal karşılaştırılması	75
Şekil 4. 57. TİC takviyeli numunelerin 30J çökme-darbe enerjisi deneysel ve sayısal karşılaştırılması	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. E, S ve D camı elyaflarının özellikleri	3
Çizelge 1.2. Aramid malzemelere ait mekanik özellikler	4
Çizelge 3.1. Bir orthotropic malzemenin sabitleri ve tanımları	22
Çizelge 3.2. ASTM D3039 Standardına göre numune için boyut ölçüleri	22
Çizelge 4.1. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri	29
Çizelge 4.2. Kompozit numunelerin kodlama çizelgesi	30



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Kesit alanı
d-t	Çökme zaman eğrileri
d _{max}	Maksimum yükteki yer değiştirme
E _a	Absorbe edilen enerji
E ₁	Fiber Yönündeki Elastisite Modülü
E ₂	Fiber Dik Yönündeki Elastisite Modülü
F _{max}	Maksimum temas kuvveti
F-d	Kuvvet çökme eğrileri
F-t	Kuvvet zaman eğrileri
G ₁₂	Kayma modülü
S	Maksimum kayma gerilmesi
TiC	Titanyum karbür
t	Numune kalınlığı
V-t	Hız zaman eğrileri
X _c	Fiber Yönündeki Maksimum Basma Gerilmesi
Y _c	Fibere Dik Yönündeki Maksimum Basma Gerilmesi
Y _t	Fibere Dik Yönündeki Maksimum Çekme Gerilmesi
v ₁₂	Poisson Oranı
ρ	Yoğunluk

1. GİRİŞ

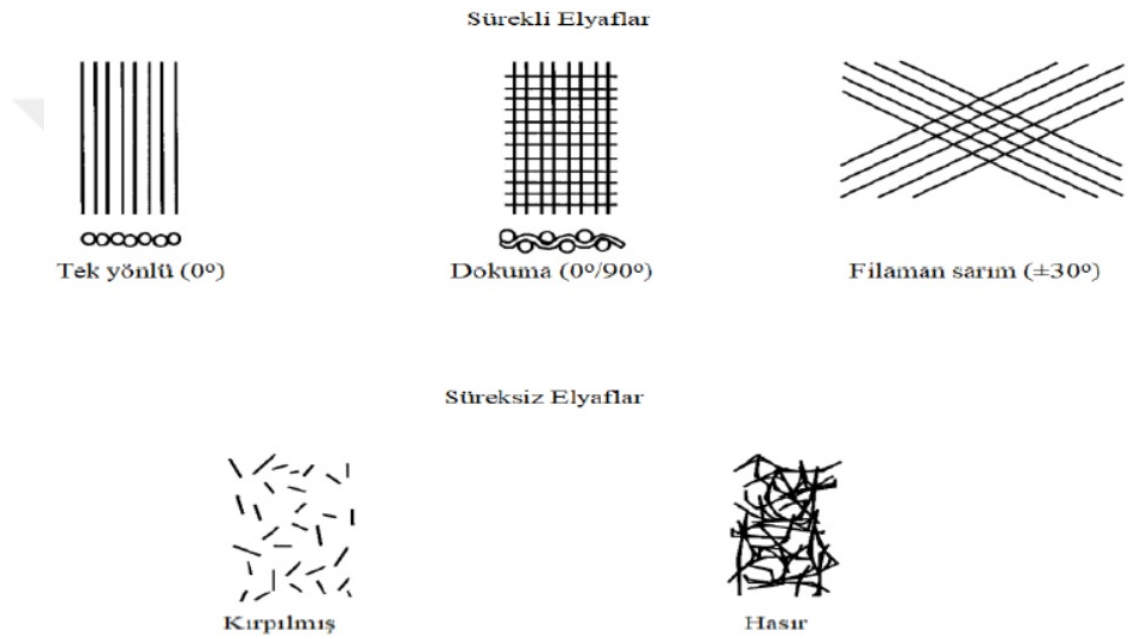
Malzemeler açısından ihtiyaçlar her geçen gün değişmektedir. İstenilen özelliklere uygun malzemeyi elde etmek için farklı yöntemler kullanılarak birçok malzeme türü geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Kompozit, dizayn amacına uygun olarak en az iki farklı malzemenin makro boyutlarda birleşerek oluşturduğu ve birbiri içinde çözünmeyen, istenilen özellikleri baskın, istenmeyen özelliklerinin çok aza indirilmesini sağlayan yapı malzemelerine verilen genel addır. Bileşenlerden birisi takviye fazı, diğeri ise matris olarak adlandırılır. Burada amaç, kullanılan malzemelerin birbirlerinin zayıf kalan yönlerini iyileştirmek ve istenilen yönde daha üstün özellik sağlayan bir malzeme elde etmektir (Soy, 2009).

Kompozit malzemeler üç ana fazdan oluşmaktadır. Bunlar matris, takviye ve ara yüz fazlarıdır. Matris fazı yapıyı bir arada tutan ve yükü homojen olarak dağıtan fazdır. Takviye fazı yükü taşıyan ve arayüz fazı ise matris fazı ile takviye fazının arasındaki birleşmeyi sağlayan fazdır. Günümüzde kompozit malzemeler inşaat, askeri, havacılık ve otomotiv sektörü gibi birçok alanda geleneksel malzemelerin yerini almıştır.

Kompozit malzemelerin avantajları öncelikle yüksek özgül sertlik (rijitlik) ve mukavemete sahip olmalarıdır. Bunların yanı sıra kullanıldıkları yapılarda ağırlıkta azalma sağlamakta ve ayrıca korozyona karşı dirençleri de yüksektir. Kompozit malzemelerin diğeri bir avantajı ise hem üretilirken hem de kullanılırken enerji tasarrufu sağlamasıdır. Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde yüksek sıcaklıklar gerekmediği için fazla enerji de harcamak gerekmez. Bunların yanı sıra elyaf takviyeli kompozitler üretilirken elyaflar yönlendirilerek istenilen yönde mekanik özelliklerin yüksek olması sağlanabilir (Balasubramanian, 2013).

Kompozit malzemeler matrise ve takviye elemanına göre iki ana sınıfa ayrılabilirler. Matrise göre, genel olarak polimer matris kompozitler, metal matris kompozitler ve seramik matris kompozitler olmak üzere üçe ayrılırlar. Takviye elemanına göre ise, elyaf takviyeli, parçacık takviyeli ve tabaka takviyeli olmak üzere yine üç sınıfta incelenirler. Parçacık kompozitler sürekli elyaf takviyeli kompozitlere göre daha zayıf ve daha az rijit olma eğilimindedirler ancak daha ucuzdurlar. Parçacık takviyeli kompozitler üretim zorlukları ve kırılmalardan dolayı daha az takviye içerir (hacimce

%40-%50'ye kadar). Elyaf uzunluğu çapına göre çok büyük olan bir yapıdır. Uzunluk – ap (l/d) oranı çok farklı değerler alabilir. Sürekli elyafların en-boy oranı sreksizlere göre daha büyüktür. Sürekli elyaflar belli bir düzende kullanılırken sreksizler rastgele olarak kullanılmaktadır (Campbell, 2010). Sürekli ve süreksiz elyaf rnekleri Şekil 1.1' de verilmiştir. Elyaf türleri olarak ise cam, karbon, aramid ve bazalt gibi seçenekler bulunmaktadır.



Şekil 1.1. Elyaf eşitleri örnekleri (zer, 2018)

Polimer matrisli kompozit yapımında kullanılan takviye elemanları cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaflın bazı avantaj ve dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

Cam elyafların sahip olduğu bazı avantajlar; yüksek çekme mukavemetine sahip olmaları, düşük fiyatlı olmaları, kimyasal malzemelere karşı dirençli olmaları, elektriği iletmemeleri ve ısıl dirençlerinin düşük olması olarak sıralayabiliriz. Cam elyafların özellikleri izelge 1.1' de gösterilmiştir. Düşük ekme elastisite modülüne sahip olmaları ve düşük yorulma direncine sahip olmalarını ise dezavantajları olarak görülmektedir.

Çizelge 1.1. E, S ve D camı elyaflarının özellikleri

Özellikler	E camı	S camı	D camı
Yoğunluk, ρ (g/cm ³)	2,6	2,5	2,16
Elastik modülü E (Gpa)	72	87	51,7
Çekme dayanımı σ (Gpa)	3,45	4,54	2,41
Çekme uzaması (%)	4	2,9	-----
Özgül modül E/ ρ (MN/m)	27,7	34,8	23,9
Özgül dayanım σ/ρ (MN/m/kg)	1,37	1,81	1,16
Boyuna termal genişleme katsayısı α ($\mu\text{m}/\text{C}^\circ \times 10^{-5}$)	5	5,6	3,06

Karbon (grafit) elyaflar, ağırlığına göre yüksek çekme ve basma mukavemetine sahip olmaları, kırılmada yüksek çekme şekil değiştirmesine sahip olmaları, yüksek aşınma ve yorulma mukavemetlerine sahip olmaları, düşük ısıl genişleme katsayısına sahip olmaları ve sürünme mukavemetlerinin yüksek olması olarak sıralayabiliriz. Yüksek elektrik iletkenliğine sahip olmaları, gevrek yapılarından dolayı düşük tokluğa sahip olmaları ve düşük darbe direncine sahip olması dezavantajları olarak bilinmektedir.

Aramid elyafların özelliklerini yüksek çekme mukavemetine sahip olmaları, düşük ağırlıklı olmaları, yüksek darbe direncine sahip olmaları, fiber doğrultusunda düşük ısıl genişleme katsayısına sahip olmaları, yüksek tokluğa ve esnek bir yapıya sahip olmaları şeklinde sıralayabiliriz. Çizelge 1.2' de aramid malzemelere ait mekanik özellikler gösterilmiştir. Dezavantajları ise düşük basma mukavemetine sahip olması ve zor kesilmeleri olarak sıralanabilir.

Çizelge 1.2. Aramid malzemelere ait mekanik özellikler (Mark, 1999)

MALZEME	YOĞUNLUK (g/cm³)	ELASTİSİTE MODÜLÜ (Gpa)	ÇEKME DAYANIMI (Mpa)	KOPMA UZAMASI (%)
ARAMİD				
Kevlar 29	1,44	70	2700-3000	3,5-4,2
Kevlar 49	1,44	112-135	2900-3400	2,4-2,8
Kevlar 129	1,44	88-99	3400-4200	3,3-3,5
Kevlar 149	1,44	143-175	2300-3400	1,5-1,8
Kevlar KM2	1,44	63-112	3000-3300	2,4-0,4
Texhnora	1,39	90	2800	4
Twaron	1,44	60	2600	3

Hibrit kompozitler ise, iki veya daha fazla farklı fiberin bir matris ile bir araya getirilerek, daha iyi özelliklere sahip bir kompozitin elde edilmesi amacıyla yapılır. Böylece yeni ve farklı tip kompozitler yapılabilir. Hibrit kompozitler yüksek mukavemet, düşük ağırlık, iyi hasar toleransı ve iyi bir darbe direnci, iyi bir yorulma ömrü ve iyi bir korozyon direnci sağlamalarından dolayı özellikle havacılık, otomotiv ve savunma sanayinde yaygın bir kullanıma sahiptir. Örnek olarak aramid elyaflar uçak yapımında düşük basma mukavemetleri nedeniyle, karbon elyaflarla birlikte hibrit kompozit olarak, kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadırlar (Sayer, 2009).

Fakat bu tür kompozitler üzerine herhangi bir cismin düşmesi veya çarpması durumunda bu malzemelerin darbe davranışı oldukça karmaşıktır ve farklılık gösterir. Yüksek hızlardaki darbe malzeme üzerinde gözle görülür hasarlar meydana getirir. Fakat düşük ve orta hızlardaki darbe daha az önemli gibi görünse de malzemenin içerisinde matris çatlakları ve delaminasyonlar gibi (tabakalar arası ayrılma) hasarlar meydana getirir. Önceden görülemeyen ve potansiyel tehlike arz eden bu hasarlar çalışma esnasında büyüyerek büyük felaketlere sebebiyet verebilir. Kompozit ve hibrit kompozit malzemeler üzerine darbe konusu ve bu malzemelerin darbe davranışları birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve günümüzde de çeşitli yönlerden araştırılmaktadır (Sayer, 2009).

Günümüzde fiberler ile güçlendirilmiş polimer esaslı kompozitler yüksek özgül sertlik ve mukavemetlerinin yanı sıra çevresel oluşları ile de çok çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu bağlamda güvenlik uygulamaları için cam ve aramid (Kevlar) lifleri, yüksek tokluk ve hasar toleransının bir sonucu olarak ileri kompozitlerin takviye elemanları olarak çok önemlidir.

Epoksi reçinelerinin darbe mukavemetini arttırmaya çalışan çeşitli yaklaşımlar vardır, bunlar arasında şunlar bulunmaktadır: (a) epoksi omurgasının daha esnek yapıya dönüştürülmesi için kimyasal olarak modifikasyonu; (b) epoksinin moleküler ağırlığının artırılması; (c) matrisin çapraz bağlantı yoğunluğunu düşürmek; (d) sertleştirilmiş polimer matrisine dağılmış kuvvetlendirici fazın dahil edilmesi; ve (e) inorganik parçacıkların veya elyafların saf reçineye dahil edilmesi. Örneğin metal partiküller, killer, cam, kauçuk parçacıklar gibi çeşitli güçlendirme maddeleri kompozit malzemenin mukavemetini, aşınma direncini ve termal özelliklerini iyileştirmek için kullanılmıştır. Epoksi reçine Kevlar ve cam elyaflar üzerine yapılan farklı çalışmalar sonrasında epoksi reçinenin iyileştirilmesi yönelik inorganik malzemelerin eklenmesi sonucu kompozit malzeme üzerinde değişen özellikler elde edilmiştir.

Bu çalışmada nanopartikül ilavesinin polimer matrisli aramid fiber - cam elyaf takviyeli hibrit kompozitin mekanik özelliklerine etkisini tespit etmek amaçlanmıştır. Matris malzemesi olarak el yatırma yöntemine uygun fiber mak tarafından üretilen F-1564 Epoksi Reçine kullanılmıştır. Nanopartikül olarak titanyum karbür kullanılmıştır. Elyaf takviyesi olarak örgü aramid fiber ve örgü cam elyaf 0o düzeninde üç kat aramid fiber tek kat cam elyaf üst üste gelecek düzende elyaf kumaşlar kullanılmıştır. Katmanların dizilimi şematik olarak Şekil 1.2' de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Hibrit kompozit plakaların şematik katman dizilimi

1.1. Kompozit Malzemelerde Darbe

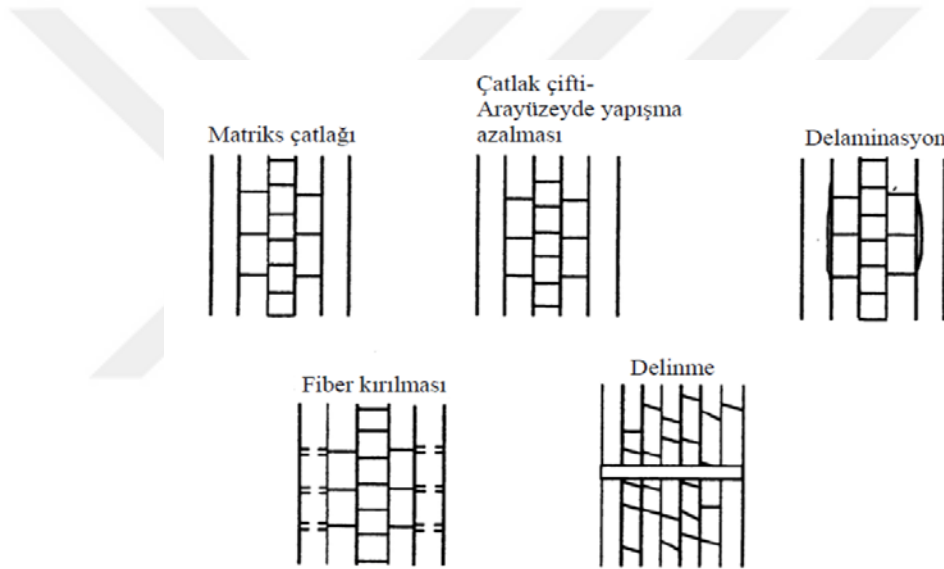
Fiber takviyeli kompozit malzemeler hafiflikleri ve yüksek dayanım parametreleri nedeniyle çeşitli alanlarda uygulamada yer almış malzemelerdir. Aksine karmaşık bir yapıya sahip olmaları ise kullanım oranlarını düşürücü rol oynamıştır. Bu ve bunun gibi yapısında karmaşıklık barındıran malzemeler içeriğindeki bileşenler sebebi ile birbirlerine olan etkileşimleri yüklere karşı dayanım sınırlarını etkilemektedir.

Darbe; düşük, orta veya yüksek hızlarda çok kısa bir süre içinde, bir malzeme veya yapı üzerine uygulanan anlık bir dış kuvvet olarak tanımlanabilir. Malzeme veya yapı üzerine gelen darbeleri başlıca düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırmak mümkündür. Düşük hızlı darbelerde darbe hızı 1 ila 10 m/s arasında değişmektedir (Mili ve Necip 2001).

Düşük hızlı darbeler düşük enerjili darbe olarak da nitelendirilmektedir. Düşük hızlı darbe için örnek olarak kompozit malzemelerin üretimi, tamiri veya bakımı esnasında bir aletin düşmesini veya çarpmasını örnek verebiliriz. Böyle bir darbede büyük bir ağırlığa sahip parçanın düşük hızla çarpması durumu söz konusudur. Bu düşme veya çarpma kompozitin iç tabakalarında hasar meydana getiren ve delaminasyonlara (tabakalar arası ayrılma) sebep olan darbelerdir (Sayer, 2009).

1.2. Tabakalı Kompozitlerde Darbe Sonucu Meydana Gelen Hasarlar

Genel olarak bir kompozitin darbeye maruz kalmasıyla meydana gelen darbe hasarı matris çatlakları, delaminasyonlar ve fiber hasarlarını içerir. Düşük hızlı darbede, matris çatlakları ile başlayan hasar, farklı fiber yönlendirme açılarında sahip tabaka arayüzlerinde delaminasyonların (tabakalar arası ayrılma) meydana gelmesine sebep olur. Kompozite uygulanan darbe enerjisinin artmaya devam etmesiyle delaminasyonlar ve en sonunda fiber hasarları meydana gelerek, vurucunun numuneye saplanması ve en sonunda da numunenin vurucu tarafından delinmesi meydana gelir. Şekil 1.3’ de, meydana gelen bu hasarların, çeşitli hasar kademelerine ait şematik bir resim görülmektedir (Sayer, 2009).

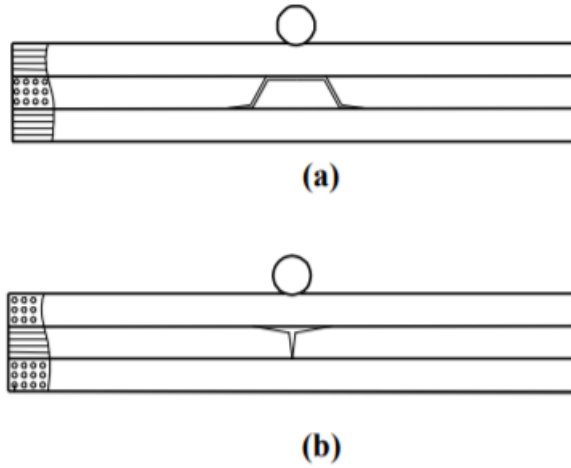


Şekil 1.3. Çeşitli hasar kademelerine ait şematik bir resim (Sierakowski ve Chaturvedi, 1997)

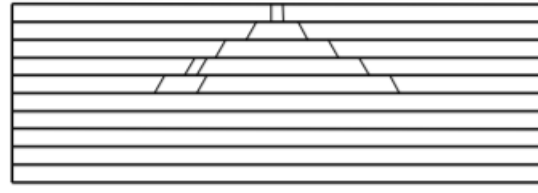
1.2.1. Matris hasarı

Literatürde rapor edilen darbe testlerinin çoğunluğu, düşük enerjili testleri içerir. Matris hasarı, düşük hızlı enine darbenin oluşturduğu hasarın ilk tipidir ve genellikle matris çatlama şeklinde meydana gelir. Matris hasarı ayrıca lif ve matris ara yüzeyi arasındaki bağın kopması şeklinde de oluşur. Matris çatlamları, tek yönlü liflerden oluşmuş tabakalarda genellikle lif doğrultusuna paralel düzlemlerde oluşur. Darbeden sonra, tahmin edilmesi çok zor olan ve karmaşık bir düzende bulunan matris çatlakları vardır. Tabakalı kompozitin darbe sonrası özelliklerinde matris çatlaklarının çok

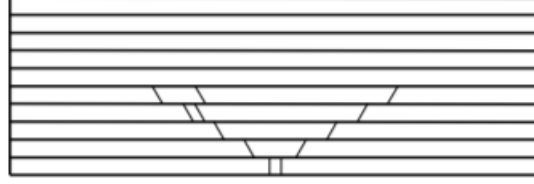
büyük etkisi olmadığından bunların belirlenmesi çok ta gerekli değildir. Ama, hasar süreci matris çatlakları ile başlar ve arkasından bu çatlaklar tabaka ara yüzlerinde tabaka ayrılmasına (delaminasyon) neden olur. İki tür matris çatlağı gözlenir: çekme çatlakları ve kayma çatlakları (Şekil 1.4). Çekme çatlakları, düzlem için normal gerilmelerin tabakacığın enine kayma mukavemetini aştığı zaman ortaya çıkar. Kayma çatlakları orta düzlemden belli bir açıda bulunurlar ki bu durum enine kayma gerilmelerin bu tür çatlakların oluşumunda önemli rolü oynadığını göstermektedir. Kalın tabakalı kompozitlerde yüksek yerel gerilmeler nedeniyle matris çatlakları darbe ucunun çarptığı ilk katmanda meydana gelir. Hasar, yukarıdan aşağıya doğru bir çam ağacı görüntüsü oluşturacak şekilde ilerler (Şekil 1.5.a). İnce tabakalı kompozitler için, kompozitin arka yüzündeki eğilme gerilmeleri en alt katmanda matris çatlağına neden olur. Bu da matris çatlakları ve delaminasyonları başlatarak ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde bir hasar görüntüsü verir (Şekil 1.5.b).



Şekil 1.4. Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı



(a)



(b)

Şekil 1.5. a) Çam ağacı (b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü hasar örnekleri

1.2.2. Delaminasyon

Delaminasyon, kompozit malzemenin her bir katmanının ayrılmasıdır. Tabakalı yapılarda en belirgin enerji absorblama mekanizması olan delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey bölgelerinde, aynı katman grubundaki tabakalar arasından daha ziyade, farklı fiber oryantasyonlarına sahip tabakalar arasında meydana gelen bir hasar tipidir (Grujicic vd., 2006). Şekil 1.6' de delaminasyon hasar şekli şematik olarak gösterilmiştir. Delaminasyonlar (tabakalar arası ayrılmalar), bitişik tabakalar arasında yapışmanın azalmasıyla meydana gelen ve tabakanın mukavemetini önemli derecede düşüren hasarlardır. Deneysel çalışmalar delaminasyonun sadece farklı fiber yönlendirme açılarındaki tabakalar arasında meydana geldiğini rapor etmektedir. Eğer iki bitişik tabaka aynı fiber yönlendirme açısına sahip ise bu iki tabaka arayüzeyinde delaminasyon meydana gelmemektedir (Sayer, 2009).



Şekil 1.6. Kompozit yapıda delaminasyon hasar görünümü

1.2.3. Fiber kopması

Hasar modlarından bir diğeri olan elyaf kopması, genellikle matris çatlaması ve delaminasyondan çok daha sonra meydana gelir. Elyaf kopmasına neden olan en önemli iki faktör:

1. Yüksek yerel gerilmeler ve nüfuziyetin neden olduğu etkilerdir (esas olarak kesme kuvvetleri tarafından idare edilen etkiler). Bu olay çarpan cismin hemen altında gerçekleşir.
2. Yüksek eğme gerilmeleridir. Bu olay ise, darbeye maruz kalmayan yüzde meydana gelir (Metin, 2008).

1.3. Düşük Hızda Darbe Test Metodları

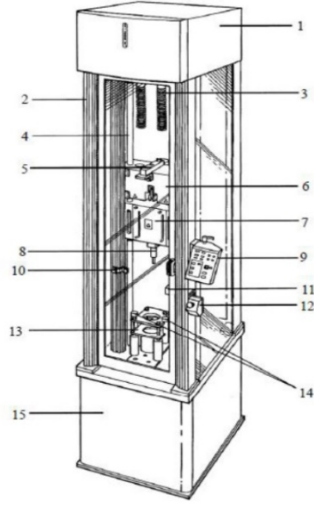
Malzemelerin darbe direncinin belirlenmesi için yapılan düşük hızlı darbe test metodları; Izod ve Charpy darbe test metodları, Pendulum darbe test metodu, Ankastre edilmiş kiriş darbe test metodu ve Ağırlık düşürmeli darbe test metodlarıdır.

1.3.1. Ağırlık düşürmeli test metodu

Ağırlık düşürmeli darbe test metodu Izod ve Charpy test metodları yerine malzemelerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir metottur. Izod ve Charpy test metodlarında darbenin limiti belli iken, Ağırlık düşürmeli darbe test metodunda numuneye çarpma hızı ve darbe enerjisi istenilen şekilde ayarlanabilir ve istenilen ağırlığın istenilen yükseklikten numune üzerine düşürülmesi sağlanabilir. Ayrıca bu metot ile numuneye saplanma, delinme ve tekrarlı darbe testleri de yapılabilmektedir (Sayer, 2009).

Şekil 1.7' de Ağırlık düşürmeli darbe test cihazının şematik bir resmi görülmektedir. Test cihazı, ağırlıklarıyla birlikte bir çapraz kafaya, pnömatrik bir sabitleyiciye, pnömatrik geri sekme frenlerine ve bir veri yazılım sistemine sahiptir. Ağırlık kaldırma ve tutma bloğu, altında bulunan ek ağırlıkların konulmasını sağlayan ağırlık kutusunu ve onunda altında bulunan çapraz kafa ve vurucuyu (tup) istenilen yüksekliğe

çıkartarak gerekirse yay desteğini de alarak bu ağırlıkların numune üzerine düşürülmesini sağlar. Böylece istenilen darbe enerjisinde veya istenilen hızda veya istenilen yükseklikten numuneye darbe uygulanmış olur. Vurucu uç yarıçapı olarak genelde 12,7 mm çapa sahip yarı küresel rijit bir uç kullanılır, fakat istenilirse farklı yarıçapta veya formda bir uçta vurucu olarak kullanılabilir (Sayer, 2009).



Şekil 1.7. Ağırlık düşürme test cihazının şematik bir resmi

1- Cihaz üst kısmı, 2- Köşe şasi, 3- Yay, 4- Mil, 5- Yük hücresi, 6- Ağırlık kaldırma ve tutma bloğu, 7- Ek ağırlık kutusu, 8- Vurucu (tüp), 9- Kontrol paneli, 10- Blok seviye ayar düğmesi, 11- Hız detektörü, 12- Acil stop düğmesi, 13- Pnömatik numune sabitleyici, 14- Pnömatik geri sekme frenleri, 15- Cihaz alt zemini

Numuneye darbenin uygulanmasından sonra vurucu, yük sinyallerinin üretilmesini sağlar ve bu yük sinyalleri yük verileri olarak bilgisayara bağlı olan bir veri toplama kartına aktarılır. Bu veri toplama kartı da verileri, veri elde etme yazılımına aktararak test sonuçlarına ait verilerin elde edilmesini sağlar (Sayer, 2009).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çekme, eğilme ve darbe mekanik özelliklerin incelendiği çalışmada düz kevlar elyaf ve düz kevlar/cam elyaf kompozitler ve epoksi (DGEBA) reçinesi matris olarak kullanılmıştır. Deneyler çözümlü yönüne paralel, çözümlünün dolgu yönünde ve 90° yönünde uygulanmıştır. Kevlar/cam elyaf hibrit yapısına sahip olan kompozitin incelemeler sonucunda bütün mekanik özelliklerde daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Kullanılan elyaflar Kevlar 49 ve S-Cam elyafıdır. Çekme testi ASTM D 3039 standardına göre 2 x 25 x 150 mm ölçülerinde üretilen kompozitlere 5 mm/dk hızında kuvvet uygulanarak yapılmıştır. Her grup için üçer adet kompozit numune kullanılmıştır. Izod darbe testi ASTM D4812 standardına göre 12.4 x 75 x 2 mm ölçülerinde olan beş adet numuneye 5,5 J enerjisindeki çekicinin düşürülmesi şeklinde uygulanmış ve mekanik davranış analiz edilmiştir. Eğilme testi için ise ASTM D790 standardına göre 2 x 12.4 x 75 mm ölçülerindeki tabakalı kompozit numunelerden beş adet kullanılmış ve yük 1 mm/dk hızında uygulanmıştır. Araştırmacılar bu çalışmada kullanılan elyaf yapılarının kombinasyonunun atkı ve çözümlülerin üçlü ipliklerinin en az tekrarını bulduklarını için seçildiğini ve bu yapının kompozite esneklik ile geri tepme mekanizması kazandırıp mekanik özelliklere etki edeceğini vurgulamışlardır Valenc vd. (2015).

Hosur vd. (2005), dört farklı kombinasyona sahip hibrit tabakaların, darbe test cihazıyla, düşük hız altındaki darbe davranışının belirlenmesi üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Hibrit tabakalar, SC-15 epoksi reçine sistemli, vakumlu reçine kalıp işlemi kullanılarak çapraz örgü karbon kumaş ve düz örgü S2-cam kumaş kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca, karbon/epoksi ve cam/epoksi tabakaların darbe davranışları hibrit numuneler ile de karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, hibrit kompozitlerin rijitliğindeki az bir azalma ile karbon/epoksi tabakalarla karşılaştırıldığında yük taşıma kabiliyetlerinde artma olduğu görülmüştür. Morais vd. (2005), cam, karbon veya aramid fiber takviyeli kompozitlerin tekrarlı düşük enerjili darbelere karşı, darbe direnci üzerine tabaka kalınlığı etkisini, iki darbe enerji seviyesi için araştırma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, belirli bir enerji seviyesi altında tabaka kesiti, darbe direncinin belirlenmesi ile ilgili en önemli değişkendir. Bu şartlar altında bütün test edilen tabakaların deneysel veri noktaları, kullanılan fibere bakılmaksızın bir tek eğri üzerine düşmektedir. Vurucunun enerji seviyesi

arttırıldığında fiber karakteristikleri de bununla ilgili olmakta ve cam kumaş takviyeli kompozit için, tabaka kalınlığının artmasıyla darbe direnci de daha dik bir artış göstermektedir.

Aramid (Kevlar) elyafın kullanıldığı çalışmada matris olarak termoplastik polipropilen kullanılmış ve NIJ-STD 0106.01 Type IIIA standardına göre balistik darbe tepkisine bakılmıştır. Düz 2D örgü, 3D ortogonal ve 3D açılı kilitli örgü kumaşlar kullanılmıştır. 2D kumaşın diğer kumaşlara göre balistik darbeye %2,4 –7 aralığında daha yatkın olduğu gözlemlenmiştir. 3D kompozitler 9mm'lik kurşunu karşılamada başarılı iken 2D kompozitler başarısız olmuştur. Ayrıca ANSYS AUTODYN v. 14.0 yazılımı ile kompozitlerin balistik limitleri incelenmiş ve 2D düz örgü tabakalı kompozitlerinden 3D ortogonal ve 3D açılı kilitli tabakalı kompozitlere balistik limitin artışı sırasıyla %16,44 ve %20 olmuştur (Bandaru vd. 2016a).

Park ve Jang (2001), aramid/cam kompozitler için, aramid fiberlerin darbe uygulanan yüzeyde veya darbe uygulanmayan yüzeyde bulunması durumlarına göre yaptıkları darbe deneylerinde fiberlerin bulunduğu yer ile ilgili olarak önemli tespitlerde bulunmuşlardır. Kalın kompozitlerde darbe hasarı, darbe yüzeyinde darbe noktasına yakın yerlerde lokal gerilmelerin meydana gelmesinden dolayı başlar. Bu durum, darbe yüzeyindeki tabakanın tam bir deformasyona maruz kalmadığını gösterir. Çünkü bu deformasyonu alttaki bitişik tabakalar sınırlamakta ve alt yüzeydeki tabakalar deformasyonun büyük bir kısmını karşılamaktadır. Kompozitin darbesinde darbe, darbe yüzeyinden alt yüzeye doğru yayılarak ilerler. Bundan dolayı aramid tabaka darbe uygulanmayan alt yüzeyde bulunduğu anda, kompozit; aramid tabakaların deformasyonu boyunca meydana gelen darbe enerjisinin büyük bir kısmını absorbe eder. Eğer aramid tabakalar darbe uygulanan yüzeyde olursa ve hemen altında da gevrek yapıdaki cam tabakalar bulunursa, bu cam tabakalar aramid tabakalar arasında yayılma eğiliminde olan deformasyonu sınırlayıcı bir etki yapar ve deformasyonun yayılmasını engeller.

Farklı yapılarda olan aramid elyafların kullanıldığı çalışmada matris olarak polipropilen kullanılmış ve düşük hızlı darbe direnci incelenmiştir. Düz örgü kumaş (2D), ortogonal örgü kumaş (3D-O) ve üç boyutlu açılı kilitli (3D-A) kumaş olmak üzere üç farklı mimaride olan kevlar kumaşlar kullanılmıştır. Deney esnasında çarpıcı 4 m/s

ve 6 m/s hızları ile kompozitlere darbe uygulanmıştır. Farklı mimari yapılara sahip kompozitlerin darbe sonrası davranışı da incelenmiştir. Sonuç olarak ise darbe tepkisinin genel olarak tabakaların düzlemler arası rijitliğine bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Enerji absorbe kabiliyetinin ağırlıklı olarak kalınlık yönünde elyaf topluluklarının bulunması ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. 3D kompozitlerin 2D kompozitlere göre %14-26 daha fazla enerji soğurduğunu ve özellikle açılı kilitli örgü kumaşa sahip kompozitin 3D - O ve 2D tabakalı kompozitleriyle karşılaştırıldığında daha çok enerji soğurduğunu (%12,7-26,2) ve kompozitlerin darbe görünmeyen yüzünde koni şeklinde alan oluşumunun daha ufak olduğunu (%25-39) belirtmişlerdir (Bandaru vd. 2016b).

Polimer matrisli partikül ilaveli kompozitlere partikül boyutunun, partikül/matris arayüz bağlantısının ve partikül yüklemenin rijitlik, mukavemet ve tokluk üzerine etkileri yapılan bir çalışmada incelenmiştir. Rijitlik ve Young modülü gibi değerlerin mikro ya da nano boyuttaki partikül ilavesi ile partiküllerin matristen daha rijit olması sayesinde geliştirilebildiğini ancak mukavemetin matristen partiküle kuvvet transferine bağlı olduğunu ve matrisi iyileştirme partikül/matris arayüzünün kuvvetli bir bağlantı üzerine kurulması üzerine gerçekleşirken aksi durumda olumsuz etkilerin ortaya çıktığı ifade edilmiştir Fu vd. (2008).

Valença vd. (2015), yaptıkları çalışmada epoksi reçine matrisli kompozit yapılarını ayrı ayrı olarak hem Kevlar tabaka hem de cam/Kevlar hibrit tabaka üzerinde mekaniksel özelliklerini incelemişlerdir. Epoksi ile güçlendirilmiş cam/Kevlar hibrit kompozitlerin epoksi ile güçlendirilmiş Kevlar kompozitlere nazaran çekme mukavemeti (341,06MPa), darbe enerji (211,02kJ/m²) ve eğme mukavemetlerinin (260,30MPa) %20-30 oranlarında yüksek çıktığı görülmüştür.

Kumar vd. (2010), epoksi ile güçlendirilmiş Kevlar kompozitleri 100 m/s ve 1000m/s hızlarında balistik özelliklerini sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal simülasyonlarda hazırlanan kalın tabakalı (9,5mm) Kevlar epoksi kompozitlerin 100m/s hızlarda bile çarpışma sonrası iç enerjisinin arttığı tespit edilmiş. Ayrıca ara yüzeylerde çatlak ve tabakalar arası açılmada hem teorik hem de deneysel olarak doğrulanmıştır.

Bittmann vd. (2009), epoksi reçine içerisine titanyum dioksit nanopartikülleri ultrasonik yöntemler ile homojen karışımı sağlanmıştır. Bu çalışmada ultrasonik titreşim genliği, dağılma süresi ve malzemenin hacminin homojen dağılıma olan etkisi incelenmiştir.

Kavitha vd. (2012), mikro (60-100nm) ve nano (2-4nm) boyuttaki TiC partiküllerin epoksi ile oluşturduğu kompozitin çarpışma davranışları incelenmiştir. Partikül boyutunun yanı sıra epoksi ile partiküllerin dağılımı ve yapışmasının çarpışma testlerini etkilediği gözlemlenmiş ve nanoboyutta homojen şekilde dağılmış TiC partiküllerin (70 kJ/m²) mikro boyutta homojen dağılmış TiC partiküllere (62 kJ/m²) göre darbe mukavemetinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Nakamura vd. (1991), sertleştirilmiş epoksi reçinenin darbe özelliklerine parçacık boyutunun etkisi incelenmiştir. Bu reçine, erimiş doğal ham kuvarları ezerek hazırlanmış açısız şekilli silika parçacıkları ile doludur. Bu parçacıklar, 2 ila 47 mm arasında değişen farklı ortalama boyutlarda darbe özelliklerine bakılmış olup emilen darbe enerjisinin silika parçacık boyutundaki azalmaya göre arttığı tespit edilmiştir.

Vasconcelos vd. (2005), epoksi reçine, alüminyum partikülleri ve öğütülmüş liflerden elde edilen üçlü faz malzemenin tek fazlı materyallere göre mekanik ve termal performansları incelenmiştir. Darbe direnci, ara yüzey özelliklerinin ve parçacıkların ve öğütülmüş liflerin kompleks stres konsantrasyonunun, bileşik kırığı kontrol etmede önemli bir rol oynadığı karmaşık enerji dağılım mekanizmalarına bağlıdır. Hibrit kompozitler, elyaf / epoksi arası ara kesme mukavemetleri arasındaki büyük farkların, liflerin etrafındaki kompleks stres konsantrasyonları tarafından engellenebildiğini göstermektedir. Daha iyi karbon elyaf / epoksi ara yüzey kesme mukavemetine rağmen Epoksi – Aluminium – Karbon fiber kompozitinin Epoksi – Aluminium – Cam fiber kompozitinden daha iyi mekanik davranış sergilememesinin nedeni budur.

Mohaparta vd. (2014), e-cam elyaf takviyeli epoksi reçine ve TiC parçacıklarından oluşan çok-fazlı bir kompozitin işlenmesi ve kompozitin katı parçacık erozyon davranışı incelenmiştir. TiC partikül yüzdesel (0-10-15-20 wt%) olarak artması ile sertlik değerini 29'dan 53 Hv'ye ve erozyon aşınma davranışlarında da ciddi bir oranda

iyileşme olduğu gözükmüş ve darbe hızının TiC oranına ve çarpışma açısına önemli oranda etkilediği gözlemlenmiştir.

Ali (2016), farklı oranlarda (0-5-10-15-20-25wt.%) güçlendirilmiş TiC partikülleri ile güçlendirilmiş epoksi matrix kompozitinin mekaniksel ve tribolojik davranışları incelenmiştir. Sertlik ve çekme mukavemetinin %15, aşınma direncinin %10 ve darbe mukavemetinde %20 wt. oranlarında en iyi sonuçları aldığı tespit edilmiştir.

Sudheer vd. (2014), kısa elyaf tek kristal yapıdaki potasyum titanat seramikler yüksek uzunluk-çap oranları ve kusursuz bir yapıda olması elastikiyet teorisinde beklenen maksimum teorik değere çok yakın bir direnç sunar. %15 wt. oranında potasyum titanat ile güçlendirilmiş epoksi matrisli kompozitleri düşük özgül aşınma oranı ve en yüksek sürtünme katsayısı göstermesine karşılık potasyum titanat içeriği arttıkça mukavemet özellikleri ve sünekliliğinde azalma görülmüştür. Potasyum titanatın yapısı ve epoksinin gevrek davranışı gibi iki baskın karakterin aynı yüzeyde olması çekme esnasında kırılmalara neden olmaktadır.

Ferreira vd. (2012), nanokil katkılı epoksi reçineler ile güçlendirilmiş Kevlar kompozitlerin yorulma davranışı incelenmiştir. Nanokilin epoksi içerisinde oransal artışı statik mukavemeti azaltmasına karşılık hem çekme hemde eğme yüklemesinin sertliğini arttırdı. Nanokil katkılına katkısız kompozit matrise göre %12 daha fazla gerilme yorulma mukavemeti göstermiştir. Fakat üç nokta eğme'de yorulma mukavemeti nanokil katkılı Kevlar kompozitte düşüktür.

Malek (2016), TiC seramik tozunun kompozit malzeme içerisinde kullanılma sebebi; oksit olmayan bir seramiktir. Bundan dolayı yüksek sertlik ve yüksek mukavemet sağlıyor. Bu tozun kullanışlı olma sebebi ise aşınma direncinin yüksek olmasından dolayıdır. Literatür araştırmamızda çeşitli oranlarda TiC takviyeli kompozitlerin bazı mekanik özelliklerinde örneğin; sertlik, gerilme mukavemeti, darbe ve aşınma direncinin arttığı gözlenmiştir.

Berk vd. (2016), cam-epoksi ve aramid (Kevlar)-epoksi kompozit tabakaları hem deneysel hemde sayısal (LS-DYNA) olarak düşük hızda (20, 30J) çarpışma davranışlarını incelemiştir. Darbe sonrası delinme eşiğine bakıldığında, cam-epoksi

kompoziti absorbe ettiği enerji aramid-epoksi kompozite göre fazladır. 30J'luk darbe enerjisinde, cam-epoksi numunesinde geri sıçrama meydana gelirken kevlar-epoksidedelinme görülmüştür.

Özer (2014), iki boyutlu geometrik olarak non-lineer bir sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Onlar yapıştırıcı tabakanın, kalınlık boyunca gerilme dağılımındaki değişiklikleri rapor etmişlerdir. Bu rapora göre, hem kabuk hem de kayma gerilmelerinin şiddeti, birleştirmenin merkez çizgisinden uzaklaştıkça artmakta ve yapıştırıcı-yapıştırılan ara yüzeyi civarında bir maksimumdan geçmektedir. Yapışkan bozulması için en muhtemel çatlak başlangıcı konumunun, birleştirmenin köşelerinde olacağı, uçlarda maksimum kabuk ve kayma gerilmelerinin yoğunlaştığı rapor edilmiştir. Aynı zamanda, ara yzeeye yakın ince yapıştırıcı tabakada çatlağın ilerlediği ve sonuç olarak birleştirme bozulmasını oluşturmak için, yapıştırıcı kalınlığı boyunca iki çatlağın çapraz bir şekilde ilerlediği belirtilmiştir.

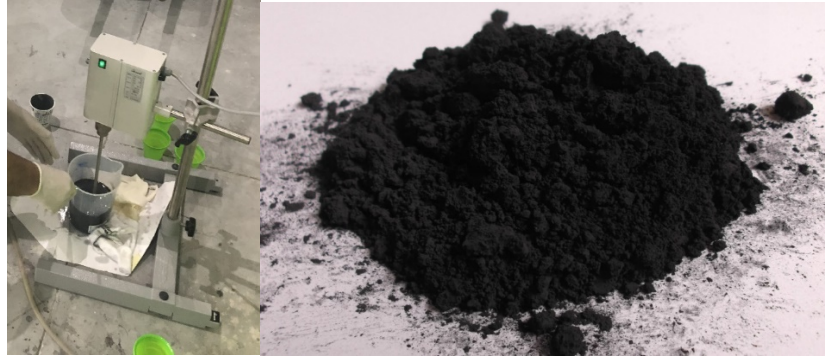
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılacak olan nanopartikül titanium karbür takviyeli hibrit kompozit malzemeler el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. El yatırma metodu ile üretilen kompozit malzeme yapımı Şekil 3.1' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. El yatırma yöntemi ile numunelerin üretimi

Takviye malzemesi olarak dupont firmasının ürettiği 207 g/m² yoğunluğa sahip örgü aramid elyaf kumaş (Kevlar-49) ile 300g/m² yoğunluğa sahip örgü cam fiber ve matris malzemesi olarak F-1564 el yatırma metoduna uygun epoksi sistemi ve reçine sertleştiricisi olarak F-3486 kullanılmıştır. Matris malzemesi epoksi, sertleştirici ve titanium karbür partikülleri olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Bu üç bileşenin karıştırma oranı epoksi ağırlığının %34 ü kadar sertleştirici, epoksi ve sertleştirici ağırlıkları toplamının %1-3-5 'i kadar titanium karbür nanopartikülü olacak şekilde ayarlanmıştır. Reçine hazırlanırken ilk olarak titanium karbür partikülleri epoksi içerisine eklenerek mekanik karıştırıcı ile 2000 rpm hızında 5 dakika karıştırılarak titanium karbür partiküllerinin epoksi içerisinde homojen olarak dağılması sağlanmıştır. İkinci işlem olarak sertleştirici ilave edilerek 1000rpm hızında 1 dakika karıştırılarak hazırlanmıştır. Reçine hazırlanışı Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Mekanik karıştırıcı ile reçine hazırlanışı

Bu çalışma için matris yapısına farklı oranlarda titanium karbür nanopartiküllerinin eklendiği hibrit kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini ve darbe karakteristiğini incelemek üzere kompozit plakalar üretilmiştir. Mekanik özellikleri belirlemek için kullanılacak plakalar 3-1-3-1-3-1 diziliminde ilk üç kat örgü aramid fiber bir kat örgü cam fiber olacak şekilde aynı açığa sahip dizilim takip edilerek 12 katmandan oluşan hibrit kompozitler üretilmiştir.

Üretim aşamasında öncelikle kompozit malzemelerin üretileceği zemin yüzeyine reçinenin yapışmasını engellemek için kalıp ayırıcı polivaks kullanılmıştır. Ayırıcı wax sürüldükten sonra 20 dk kuruması için beklenilmiştir. Hazırlanan epoksi reçine rulo ile yüzeye fiber kumaş boyutlarından 2 cm daha büyük ölçüde sürülmüştür. Yukarıda belirtilen diziliş formatı takip edilerek teker teker örgü aramid fiber ve örgü cam fiberler, örgü yönleri aynı doğrultuda olacak şekilde yatırılarak rulo ve fırça yardımı ile reçine emdirilmiştir. Katmanlar arasında hava boşluklarının kalmaması ve katmanlar arası bağın oluşması için her kattan sonra çelik rulo ile bastırma işlemi yapılmıştır. Hazırlanan plakalar epoksi reçinenin kurlenmesi için oda ortamında 2 saat kadar beklendikten sonra vakum işlemine geçilmiştir. Malzemelerin yapıldığı yüzeyin kenarlarına vakum poşetinin yapıştırılması ve sızdırmazlık sağlanması için çift taraflı bant yapıştırılmıştır. Vakum işlemi için vakum makinası hortumları iki taraftan zemin yüzeyine yerleştirilmiştir. Son olarak vakum poşeti sızdırma olmayacak şekilde kompozit plakaların üzerine çift taraflı bant ile yapıştırılmıştır. Vakum makinası çalıştırılarak sızdırma olup olmadığı kontrol edildikten sonra 12 saat vakum işlemi yapılmıştır. Şekil 3.3' de vakum işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Vakum uygulanan kompozit malzemeler

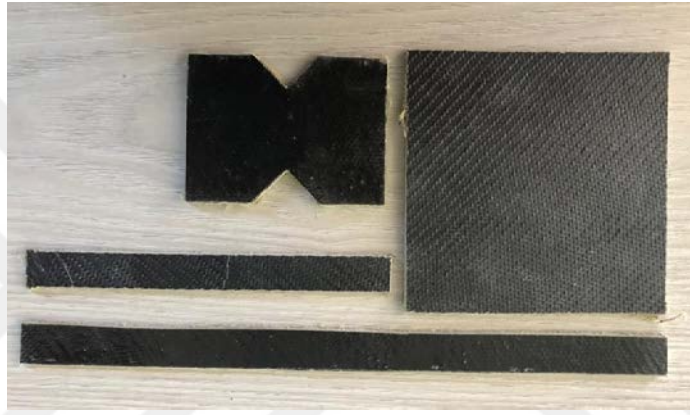
Hibrit kompozit plakalar 50X50 cm boyutlarında ERNES Kompozit firmasında üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen plakalardan ASTM standartlarına uygun ölçülerde su jeti makinasında hassas olarak kesilmiştir (Şekil 3.4). Farklı TİC konsantrasyonlarda üretilen hibrit kompozitlerin yoğunlukları Çizelge 4.1' de verilmiştir.



Şekil 3.4. Su jeti cnc makinası ile plakaların ASTM standartlarında kesilmesi

3.1. Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan geleneksel testler kompozit malzemelerin özelliklerini belirlemek için uygun olmadığından, ASTM (American Society for Testing and Materials) tarafından kabul edilen uygun testler geliştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemenin mekanik özellikleri bu testlerden elde edilen veriler ile belirlenir. Üretilen ortotropik tabakaya ait mekanik özellikler Çizelge 3.1’ de verilmiştir. Şekil 3.5’ de yukarıda anlatılan ASTM standartlarına göre hazırlanmış numuneler gösterilmiştir.



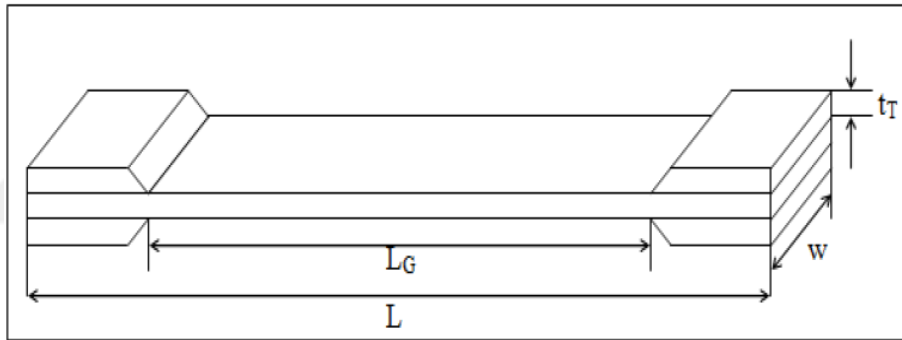
Şekil 3.5. ASTM standartlarına göre üretilmiş numuneler

3.2. Çekme Özelliklerinin Belirlenmesi

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde en temel test çekme testidir. Tasarım için en uygun özelliklerin belirlenmesinde çekme testi sonuçlarından yararlanılmaktadır. Çekme testi, elastisite modülünü, Poisson oranını, çekme mukavemetini ve maksimum şekil değiştirmeyi belirlemek için kullanılır. Bu test ASTM D3039 standart test metoduna göre yapılmış ve Şekil 3.6’ da, kompozit malzeme için kullanılan test malzeme geometrisi gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Bir orthotropic malzemenin sabitleri ve tanımları

Sembol	Tanımı
E_1	Fiber Yönündeki Elastisite Modülü
E_2	Fibere Yönündeki Elastisite Modülü
ν_{12}	Poisson Oranı
Y_t	Fibere Dik Yönündeki Maksimum Çekme Gerilmesi
X_c	Fiber Yönündeki Maksimum Basma Gerilmesi
Y_c	Fibere Dik Yönündeki Maksimum Basma Gerilmesi
S	Maksimum Kayma Gerilmesi
G_{12}	Kayma Modülü



Şekil 3.6. ASTM D3039 Standardına göre numune geometrisi

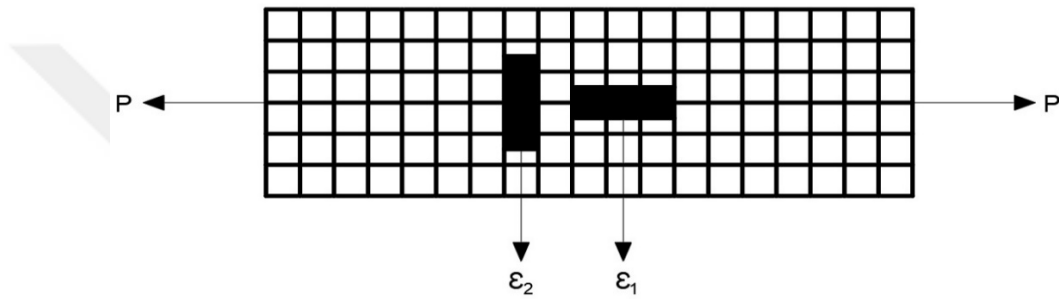
Çizelge 3.2. ASTM D3039 Standardına göre numune için boyut ölçüleri

Fiber Açısı	L (mm)	LG (mm)	tT (mm)	w
0°,90°	250	138	1,5	15

Çekme testleri Dokuz Eylül Üniversitesi makine mühendisliği bölümündeki kompozit araştırma test laboratuvarında bulunan 100 kN yük kapasitesine sahip Shimadzu AG-100 çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi hızı 1mm/dakika olarak seçilmiştir. Yük hasar oluşuncaya kadar adım adım artırılırken aynı anda video ekstansometre yardımı ile numunedeki uzama ölçülmüştür. Cihaza bağlı olarak çalışan Trapezium programına kesit alanı girerek aşağıdaki formüller yardımı ile elastisite modülü otomatik olarak program tarafından bulunmuştur. Aynı şekilde, Trapezium

programında okunan maksimum yük değerleri aşağıdaki formüllerde kullanılarak fiberdeki maksimum çekme mukavemetleri bulunmuştur (Doğan, 2014).

Poisson oranını bulmak için kompozit numuneye fibere 2 yönlü bir strain gauge bağlanmış ve çekme deneyi yapılmıştır. Şekil 3.7' de strain gauge bağlanmış bir kompozitin şematik gösterimi verilmiştir. Yük artarken aynı anda strain gaugeden bir veri toplama cihazı ile veriler toplanmıştır. Şekil 3.8' de çekme deneyi yapılan numunenin test düzeneği gösterilmiştir. Formül 3.4 yardımı ile Poisson oranı bulunmuştur.



Şekil 3.7. Gerinim ölçer bağlanmış numunenin şematik gösterimi



Şekil 3.8. Shimadzu çekme cihazı

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

$$X_t = \frac{F_{1max}}{A} \quad (3.2)$$

$$Y_t = \frac{F_{2max}}{A} \quad (3.3)$$

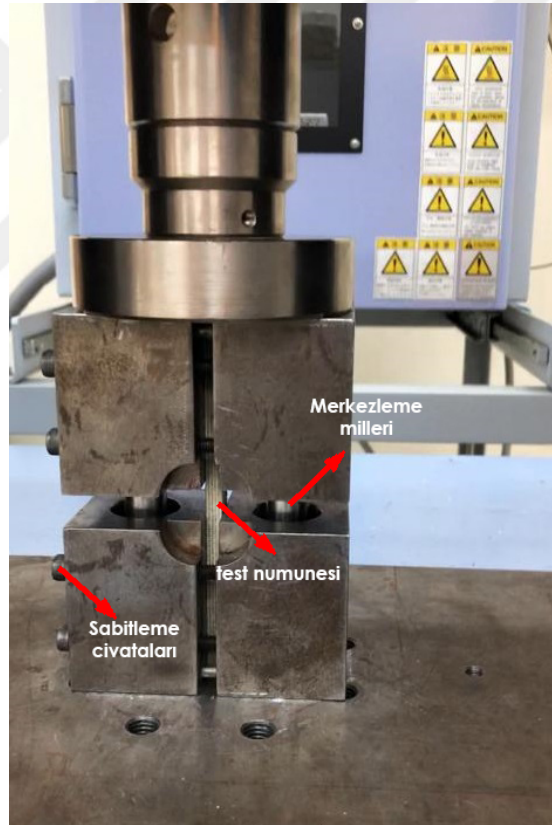
Formülde geçen F_{1max} fiber yönündeki maksimum kuvvettir. A ise numunenin kesit alanıdır. Numunelerimizin fiber yapısı örgü şeklinde olduğu için $F_{1max}=F_{2max}$ tır.

Numunenin kesit alanı aynı olduğu için fiber yönündeki maksimum çekme gerilmesi, fibere dik yöndeki maksimum çekme gerilmesi ($X_t = Y_t$) birbirlerine eşittir.

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (3.4)$$

3.3. Bası Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu test için ASTM D6641/D6641M-09 standartına göre belirlenen test metodu kullanılmıştır. Bu test yöntemiyle kompozit malzemenin bası özellikleri belirlenmektedir. Numuneyi test cihazına bağlamak için kullanılan test aparatı Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Bası testi bağlama aparatı

Kompozit numuneler standarda uygun olarak 140 mm uzunluğunda ve 13 mm genişliğinde üretilmiştir. Her bir destek arasına da standartlara uygun olarak 13 mm boşluk bırakılmıştır. Bası testi Shimadzu AG-100 çekme cihazında yapılmış, kuvvet

ve yer değiştirme değerleri elde edilmiş ve aşağıda verilen formül 3.5 yardımı ile maksimum bası gerilmeleri elde edilmiştir.

$$X_c = \frac{F_{1max}}{A} \quad (3.5)$$

3.4. Kayma Özelliklerinin Belirlenmesi

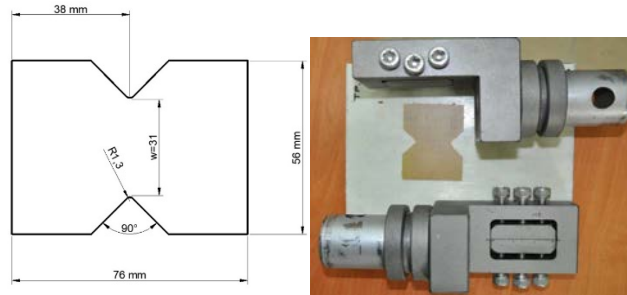
Kompozit numunelerin kayma özelliklerinin bulunması için ASTM D7078/D7078M V-çentik kayma testine (V-Notched Rail Shear Method) uygun numuneler hazırlanmıştır. Testler çekme ve basma testlerinin yapıldığı Shimadzu cihazında kayma testi bağlama aparatı ile takılarak yapılmış ve kuvvet değerleri cihazdan okunmuştur. Numuneye ait ölçüleri ve kayma test aparatı Şekil 3.10' da gösterilmiştir. Formül 3.6 yardımı ile maksimum kayma gerilmesi değeri bulunmuştur. Burada t numunenin kalınlığını, w çentikler arasındaki mesafeyi göstermektedir.

$$S = \frac{F_{maks}}{A} = \frac{F_{max}}{wt} \quad (3.6)$$

Kayma modülünü (G) bulmak için ise denklem 3.8 kullanılmıştır. Burada kayma birim şekil değiştirmesini bulmak için (γ_{12}) denklemi kullanılmıştır. Okunan strain-gage değeri kayma birim şekil değiştirme değerinin yarısına eşittir.

$$G = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} \quad (3.7)$$

$$\gamma_{12} = 2\varepsilon \quad (3.8)$$



Şekil 3.10. Kayma testi numunesi ölçüleri

Strain-gauge bir veri toplayıcıya bağlanarak, çekme test cihazı ile paralel olarak çok kısa aralıklarla kuvvete karşı gelen birim uzama değeri ölçülür. Daha sonra her kuvvet değeri alana bölünerek kayma gerilmesi değerleri ve strain-gauge'den okunan değerlerin iki katı alınarak γ değerleri bulunur. Daha sonra grafiği çizdirilir ve eğrinin eğimi kayma modülüne eşittir. Test hızı dakikada 0,25 mm olarak seçilmiştir.

3.5. Darbe Testleri

Darbe testleri, Dokuz Eylül Üniversitesi makine mühendisliği bölümündeki kompozit araştırma test laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.11' de gösterilen ağırlık düşürme prensibi ile çalışan CEAST Fractovis Plus darbe cihazı kullanılarak yapılmıştır. Darbe ucu olarak 12,7mm çapa sahip yarım küre şeklindeki ve 22,4 kN yük kapasitesine sahip kuvvet sensörü olan bir vurucu uç kullanılmıştır. Darbe cihazı iki yay sayesinde maksimum 1800 Joule darbe enerjisine kadar çıkabilmektedir. Vurucu ucun maksimum hızı 24m/s hıza ulaşabilmektedir. Darbe cihazı DAS 16000 isimli gelişmiş bir veri toplayıcı sisteme sahiptir. Bu veri toplama sistemi ile darbe testi sırasında 10 milisaniyede 20000 adet veri alınabilmektedir. Veri toplama cihazı bir bilgisayara bağlanmıştır. Böylece bilgisayardaki yazılım ile temas kuvveti, temas süresi, çökme, absorbe edilen enerji değerleri elde edilmektedir.



Şekil 3.11. CEAST Fractovis Plus darbe cihazı

Vurucu ucun numuneye çarpmadan önceki hızını ölçmek ve geri sekme sırasında tekrarlı darbenin olmamasını sağlayan anti-rebound sistemini çalıştıran optik bir sensör bulunmaktadır. Darbe cihazında ayrıca -100°C ile 150°C arasında ortam sunan bir kabin mevcuttur. Bu kabinde dışarıdan bağlanan bir tank yardımı ile sıvı azot

kullanılarak sıcaklığın dūřürölmesi sağlanır. Isıtma rezistansları yardımı ile de kabin ısıtılmaktadır.

Darbe testleri için 100 mmx100 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler darbe cihazının alt tarafında bulunan ve mekanik olarak çalışan 76 mm çapa sahip dairesel bir sıkma aparatı ile sabitlenmektedir. Bu aparat yardımı ile darbe sırasında numunelerin sabit kalması sağlanmıştır.



şekil 3.12. Numune sabitleme aparatı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Darbe testlerinin numuneler üzerine artan darbe enerjisi olarak uygulanmasıyla, darbe cihazından kompozit plakaların darbe davranışlarını gösteren birçok grafik ve sonuç elde edilebilmektedir. Bu grafikler, kompozitlerin darbe davranışına ait vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi (rebounding), vurucu ucunun numuneye saplanması (penetration) ve vurucunun numuneyi delip geçmesi (perforation) gibi üç özel durumun anlaşılmasını sağlamaktadır. Bunlardan kuvvet-çökme (F-d), kuvvet-zaman (F-t), çökme-zaman (d-t), absorbe edilen enerji-zaman (Ea-t) ve hız-zaman (V-t) eğrileri gibi kompozitin darbe karakteristiğini belirlemede kullanılan grafikler elde edilebilir. (Sayer, 2009)

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yaptığımız çekme ve kayma testlerinden elde edilen elastisite modülü, poisson oranı, kayma modülü ve yoğunlukları Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri

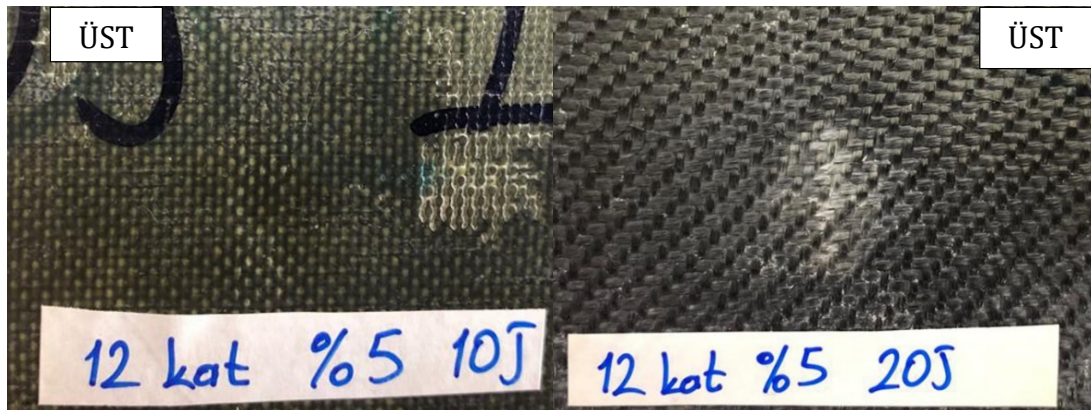
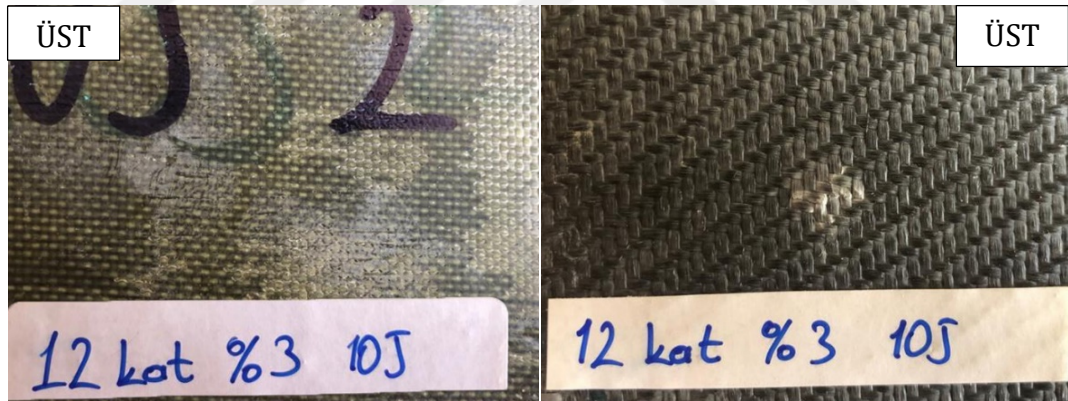
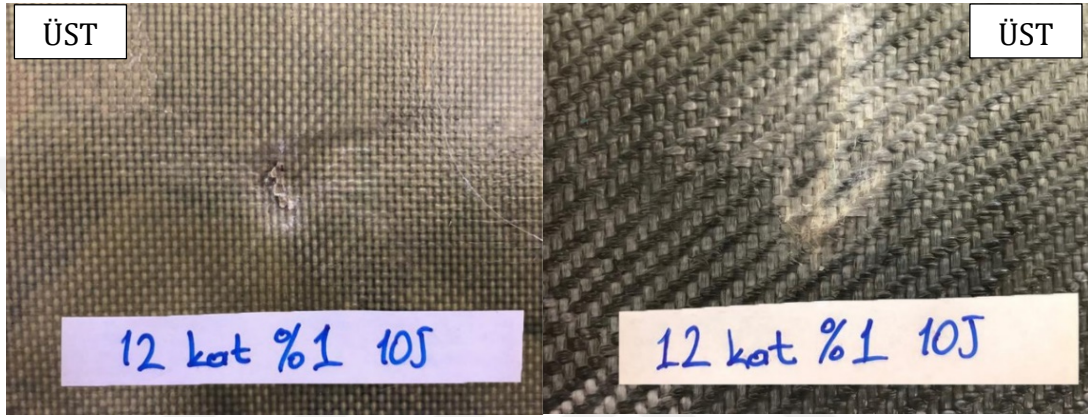
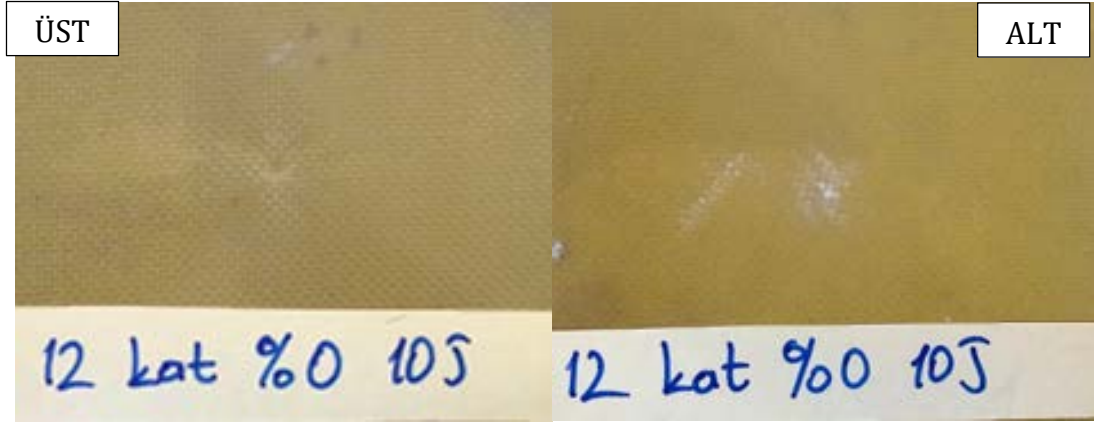
	Yoğunluk g/cm ³	MEKANİK ÖZELLİKLER		Kayma Modülü G12	Poisson Oranı
		Lif Doğrultusundaki Elastisite modülü E1 (Mpa)	Lif Doğrultusuna Dik Doğrultudaki Elastisite Modülü E2 (Mpa)		
%0 TİC takviyeli numune	1,208	6970	6970	260	0,27
%1 TİC takviyeli numune	1,252	7225	7225	269	0,29
%3 TİC takviyeli numune	1,263	7998	7998	298	0,31
%5 TİC takviyeli numune	1,277	6827	6827	254	0,25

Çizelge 4.2. Kompozit numunelerin kodlama çizelgesi

12_%0_10J	12 katmanlı %0 TİC takviyeli 10J darbe enerjisi
12_%0_20J	12 katmanlı %0 TİC takviyeli 20J darbe enerjisi
12_%0_30J	12 katmanlı %0 TİC takviyeli 30J darbe enerjisi
12_%1_10J	12 katmanlı %1 TİC takviyeli 10J darbe enerjisi
12_%1_20J	12 katmanlı %1 TİC takviyeli 20J darbe enerjisi
12_%1_30J	12 katmanlı %1 TİC takviyeli 30J darbe enerjisi
12_%3_10J	12 katmanlı %3 TİC takviyeli 10J darbe enerjisi
12_%3_20J	12 katmanlı %3 TİC takviyeli 20J darbe enerjisi
12_%3_30J	12 katmanlı %3 TİC takviyeli 30J darbe enerjisi
12_%5_10J	12 katmanlı %5 TİC takviyeli 10J darbe enerjisi
12_%5_20J	12 katmanlı %5 TİC takviyeli 20J darbe enerjisi
12_%5_30J	12 katmanlı %5 TİC takviyeli 30J darbe enerjisi

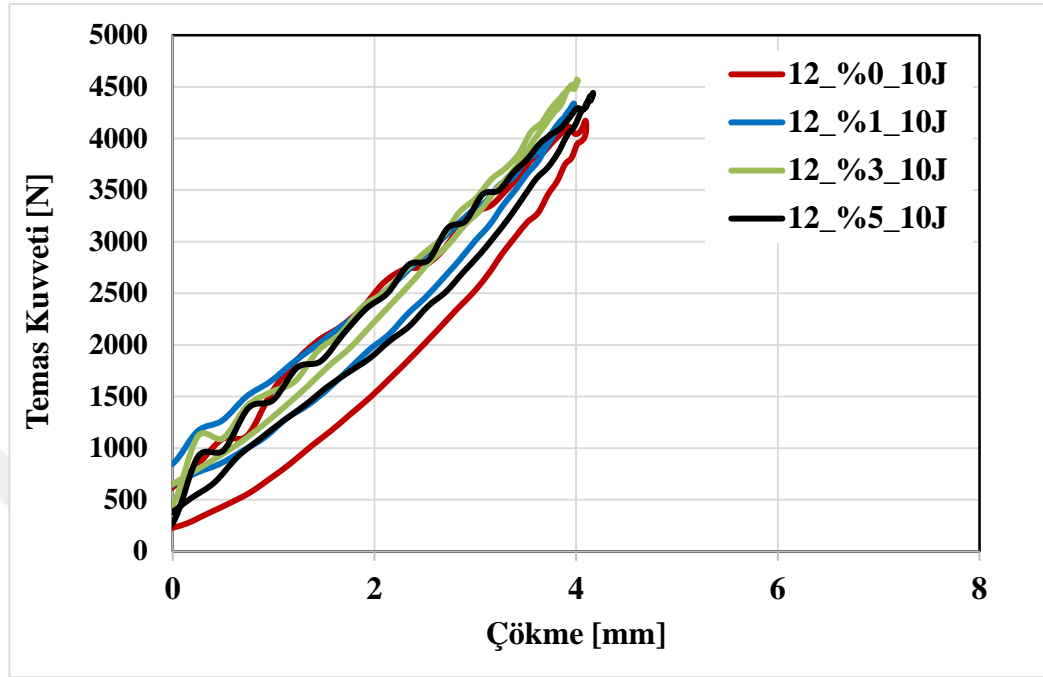
4.1. TİC Nanopartikül Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Kuvvet Çökme (F-d) Grafikleri

Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri darbe olayı esnasındaki kompozit plaklara ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden grafik çeşitidir. Bir F-d grafiği artan darbe enerjisi altında kuvvetin çökmeye karşı değişimini gösterir. Şekil 4.1' de 10joule uygulanmış hasarlı numunelerin resimleri gösterilmiştir. Şekil 4.2' de darbe uygulanmış numunelerin kuvvet çökme grafikleri verilmiştir.



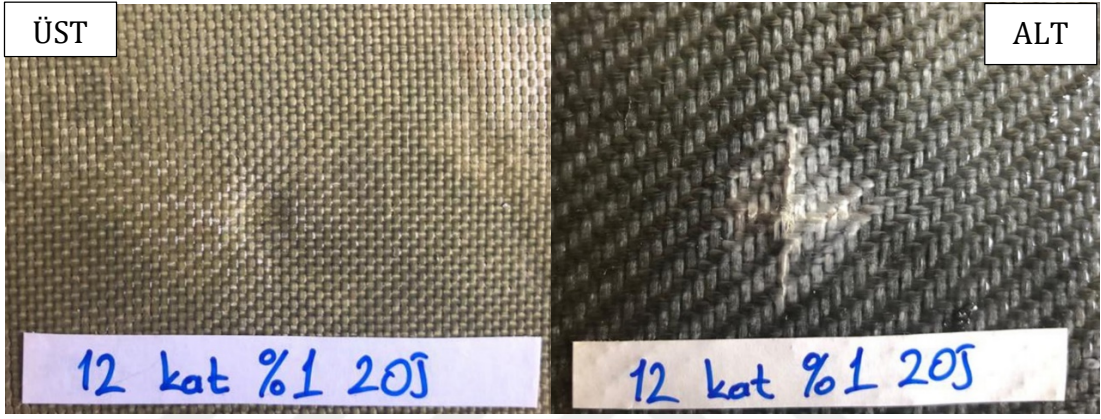
Şekil 4.1. TİC takviyeli numunelerin 10J uygulanmış hasarlı numune fotoğrafları

Darbeye maruz kalan üst yüzeyde delemasyon oluşumu gözlenmektedir. Alt yüzeylerde fiber kırılmalarının meydana geldiği görülmektedir.



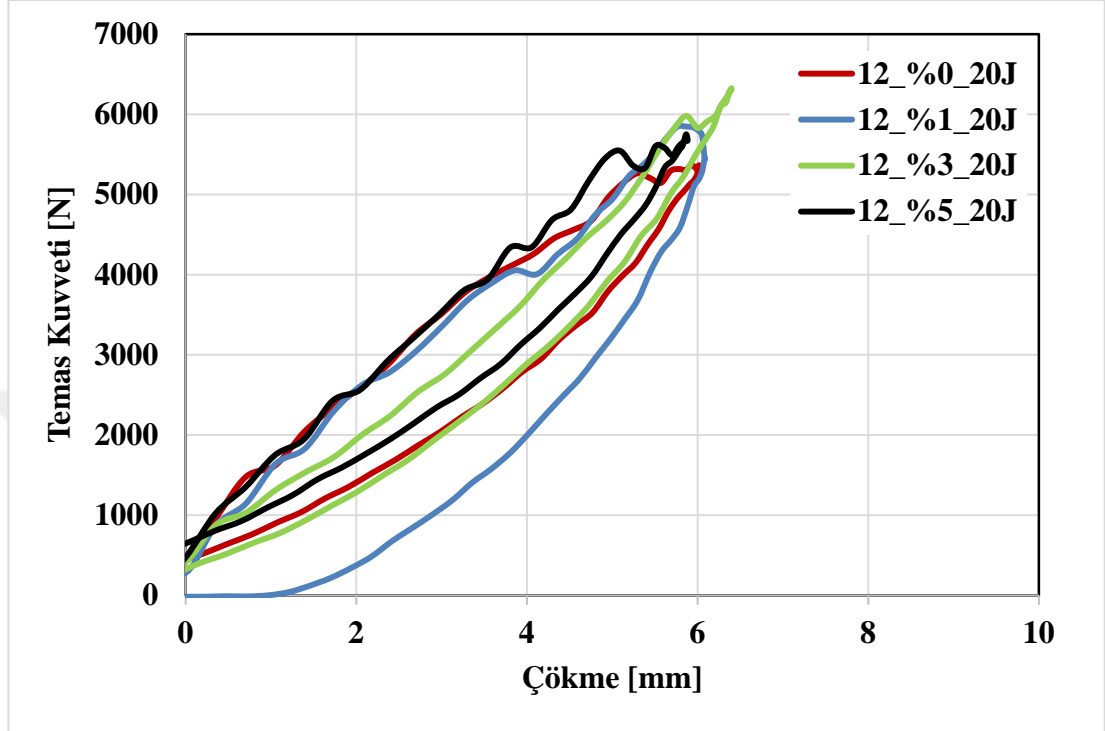
Şekil 4.2. TİC takviyeli numunelerin 10J kuvvet-çökme (F-d) grafikleri

Şekil 4.2' de ise karşılaştırma amacıyla 10J darbe enerjisinde her bir hibrit kompozite ait kuvvet-çökme eğrisi görülmektedir. Grafikte görüldüğü üzere kapalı eğriler oluşmuştur. Şekil 4.3' de 20J uygulanmış hasarlı numunelerin resimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.3. TiC takviyeli numunelerin 20J uygulanmış hasarlı numune fotoğrafları

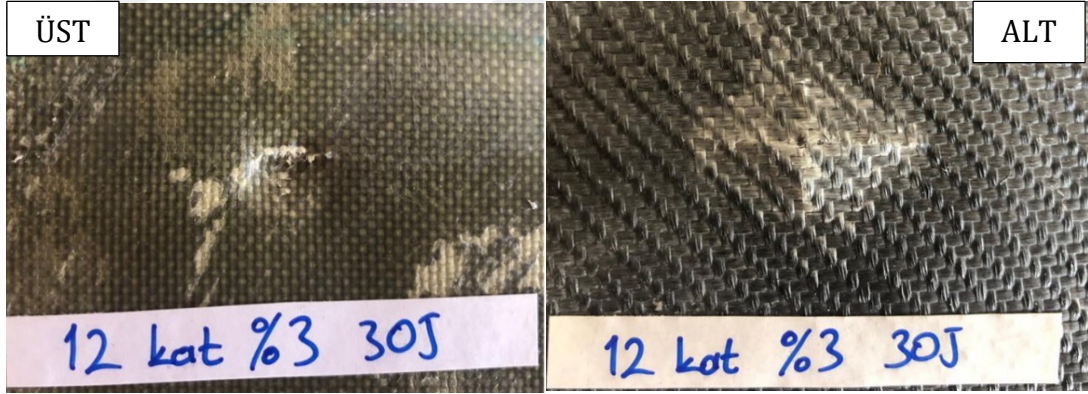
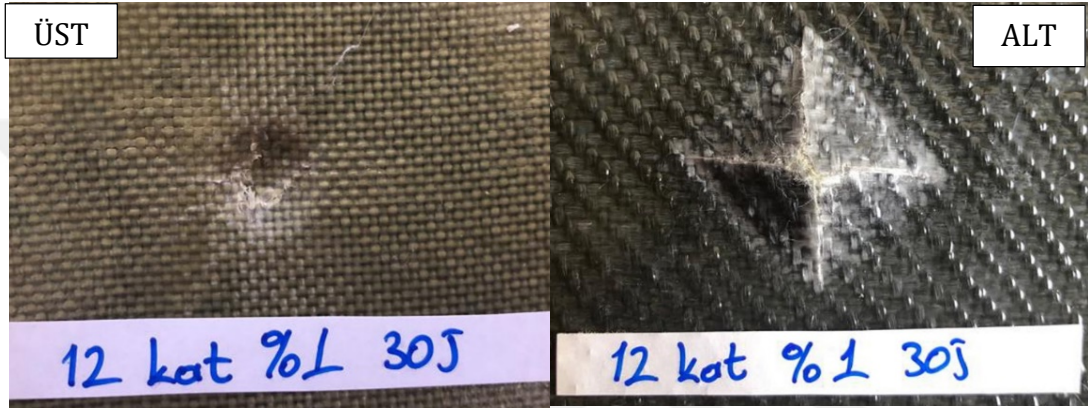
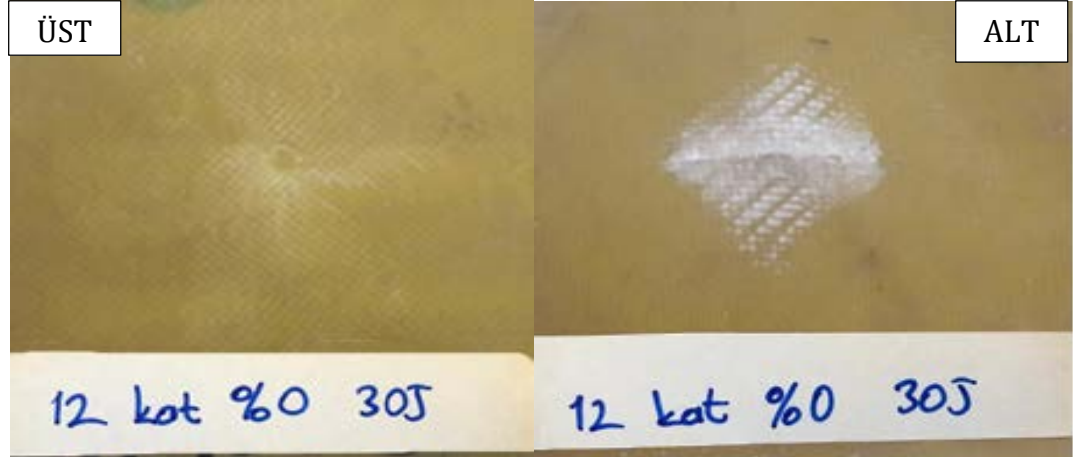
Uygulanan kuvvet arttığında darbeye maruz kalan üst yüzeyde delaminasyon hasarının arttığı gözlemlenmektedir. Alt yüzeyde meydana gelen hasarlar fiber çalması ve fiber ayrılması daha belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 4.4. TİC takviyeli numunelerin 20J kuvvet-çökme (F-d) grafikleri

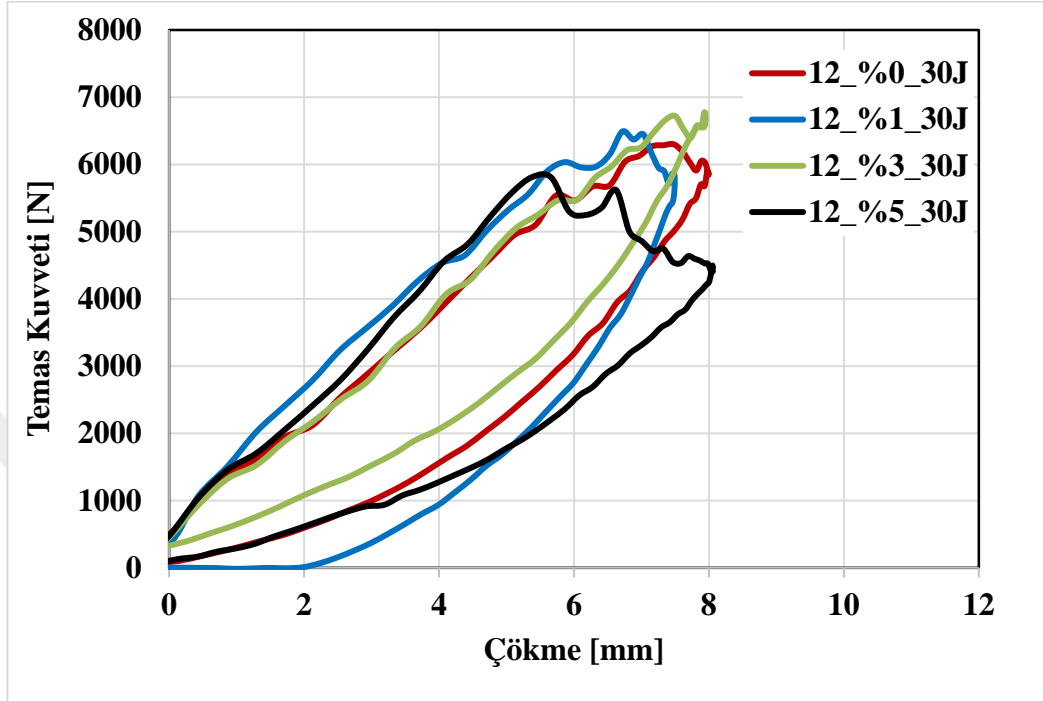
Şekil 4.4' de 20J darbe enerjisinde her bir hibrit kompozite ait kuvvet-çökme eğrisi görülmektedir. Uygulanan kuvvet arttığında grafikteki eğrilerde değişiklik meydana gelmemiştir. Grafikte görüldüğü gibi kapalı eğriler oluşmuştur.

Şekil 4.5' de 30j uygulanmış hasarlı numunelerin resimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.5. TİC takviyeli numunelerin 30j uygulanmış hasarlı numune fotoğrafları

Şekil 4.5’ de görülen numunelerin üst yüzeyinde matris ezilmesi, fiber kopması, delaminasyon hasarı görülürken alt yüzeyinde ise fiber hasarı, fiber ayrılması ve delaminasyon hasarı görülmektedir.

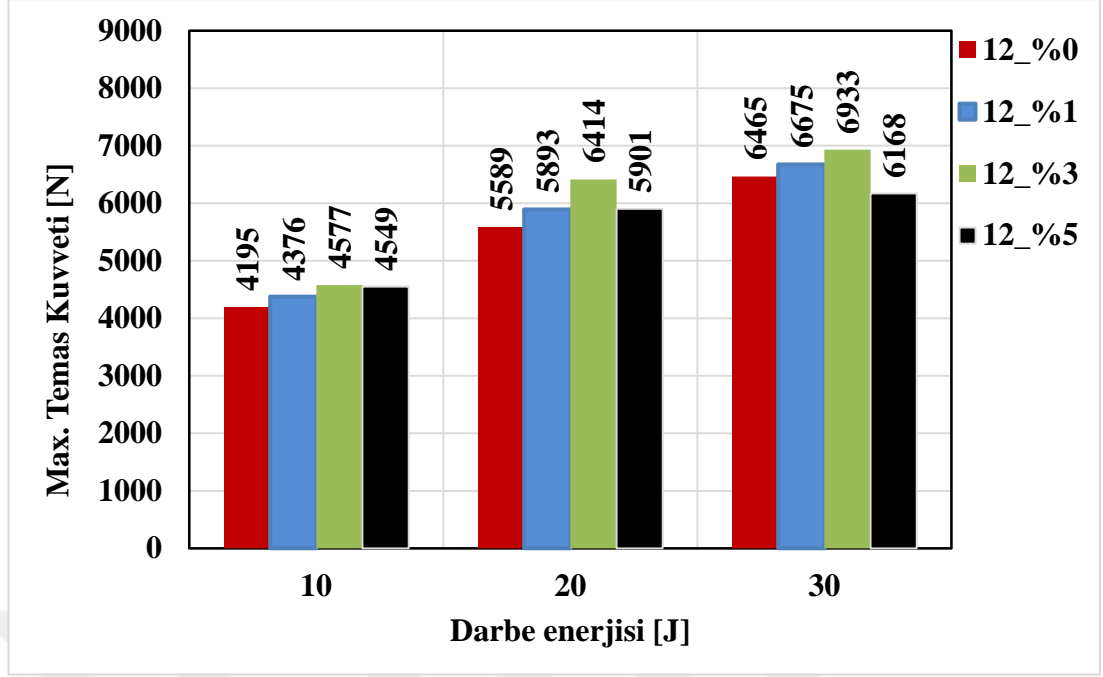


Şekil 4.6. TİC takviyeli numunelerin 30J kuvvet-çökme (F-d) grafikleri

Şekil 4.6’ da gösterilen grafikteki kapalı eğriler oluşmuştur. Numunelere uygulanan darbe kuvveti arttıkça meydana gelen hasarlar artığı görülmektedir. Bu hasarlar delaminasyonlar ve fiber kırılmalarının olarak ortaya çıkmaktadır. Darbeye maruz kalan yüzeye uygulanan kuvvet arttıkça eğri altında kalan alan artış göstermektedir. Uygulanan darbe enerjisi arttıkça %3 TİC takviyesinin diğer oranlara göre (%0-%1-%5) daha iyi sonuçlar verdiği grafikte görülmektedir.

4.2. Maksimum Kuvvet Darbe Enerjisi Grafiği

Şekil 4.7’ de %0, %1, %3, %5 TİC takviyeli numunelerin 10-20-30 Joule’de maksimum kuvvet-darbe enerjisi grafiği gösterilmektedir.

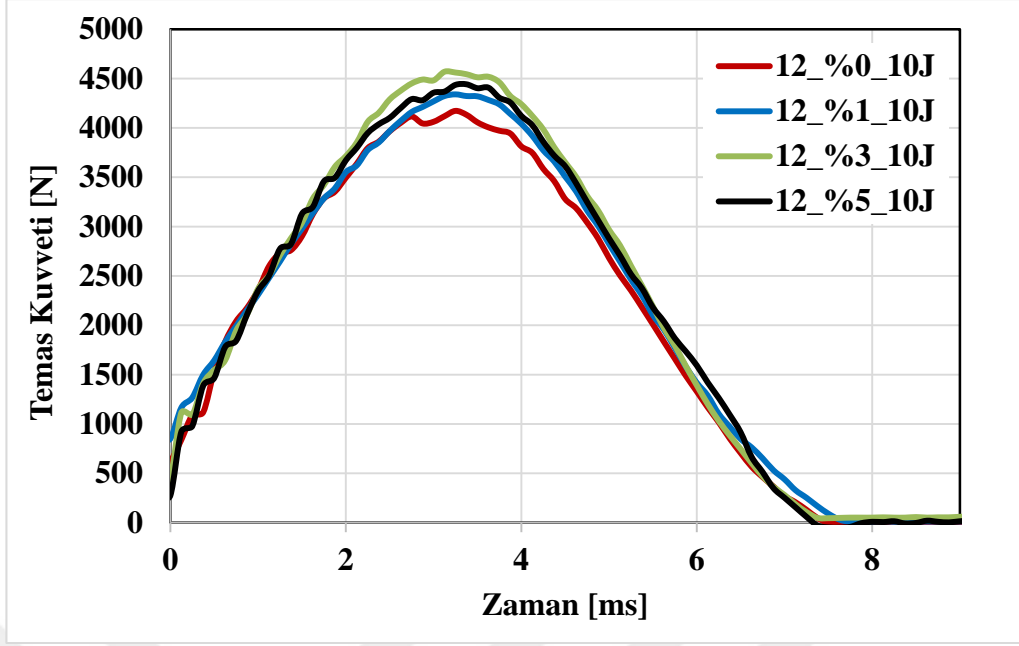


Şekil 4.7. TiC takviyeli numunelerin 10J-20J-30J maksimum kuvvet-darbe enerjisi grafikleri

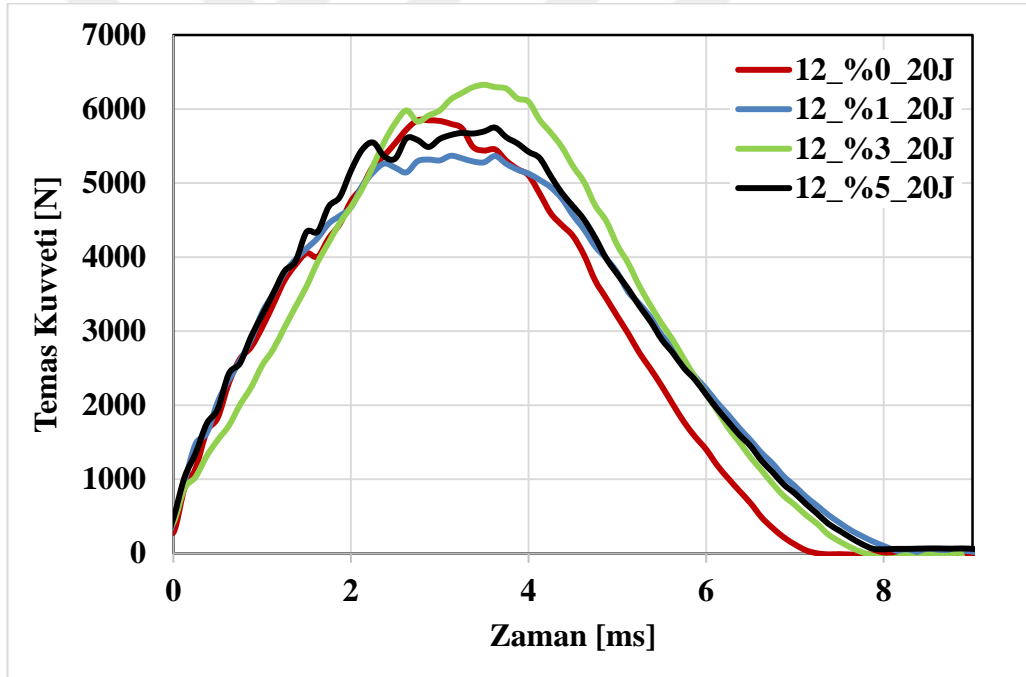
Şekil 4.7' de bakıldığında numuneler üzerine uygulanan darbe enerjisi arttıkça doğrusal olarak maksimum yükün arttığı görülmektedir. Aynı darbe enerjileri dikkate alınarak yapılacak değerlendirmede %3 TiC nanopartikül takviyeli numunelerin tüm darbe enerjilerinde (10-20-30 J) maksimum yükün en yüksek değerlerinin elde edildiği belirlenmiştir. %1 ve %5 TiC partikül takviyeli numunelerin %3'e göre daha düşük kuvvet değerleri elde edildiği belirlenmiştir.

4.3. TiC Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Kuvvet-Zaman (F-t) Grafikleri

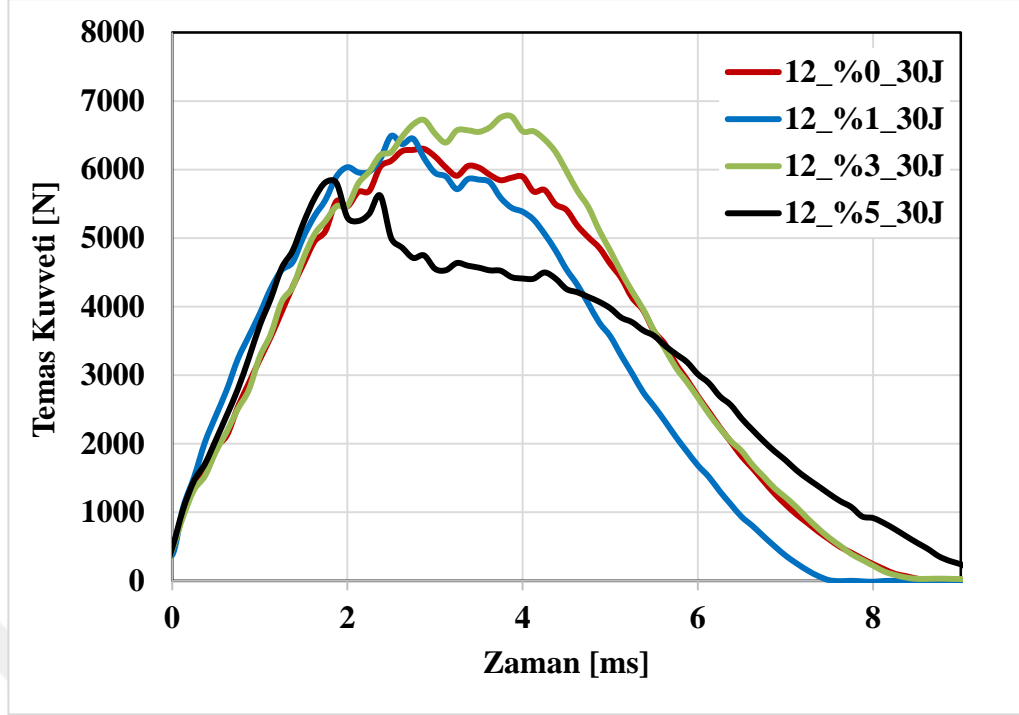
Kuvvet- zaman grafiği numune yüzeyinden geri sekme (rebounding), vurucu ucunun numuneye saplanması (penetration) ve vurucunun numuneyi delip geçmesi (perforation) gibi üç özel duruma ait eğrileri gösterir. Düşük enerjili darbelerde (örneğin geri sekme eğrisi gibi), eğri parabolik bir eğridir ve dağ'a benzeyen bir şekle sahiptir. Uygulanan darbe enerjisinin artmasıyla meydana gelen kuvvet de artmaktadır (Sayer, 2009).



Şekil 4.8. TiC takviyeli numunelerin 10J kuvvet-zaman (F-t) grafiği



Şekil 4.9. TiC takviyeli numunelerin 20J kuvvet-zaman (F-t) grafiği

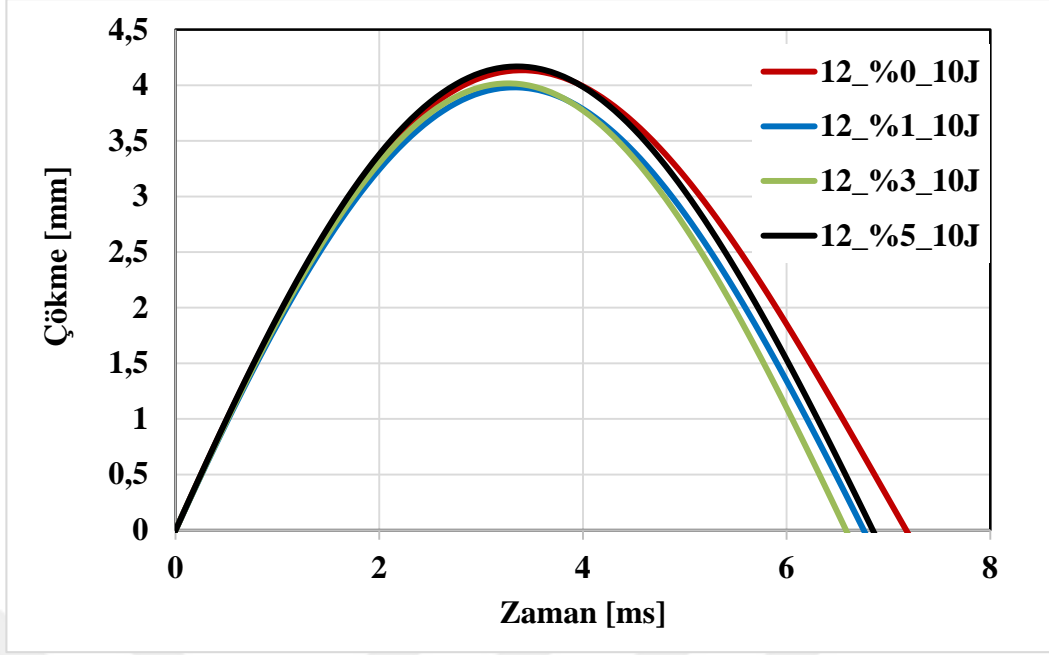


Şekil 4.10. TİC takviyeli numunelerin 30J kuvvet-zaman (F-t) grafiği

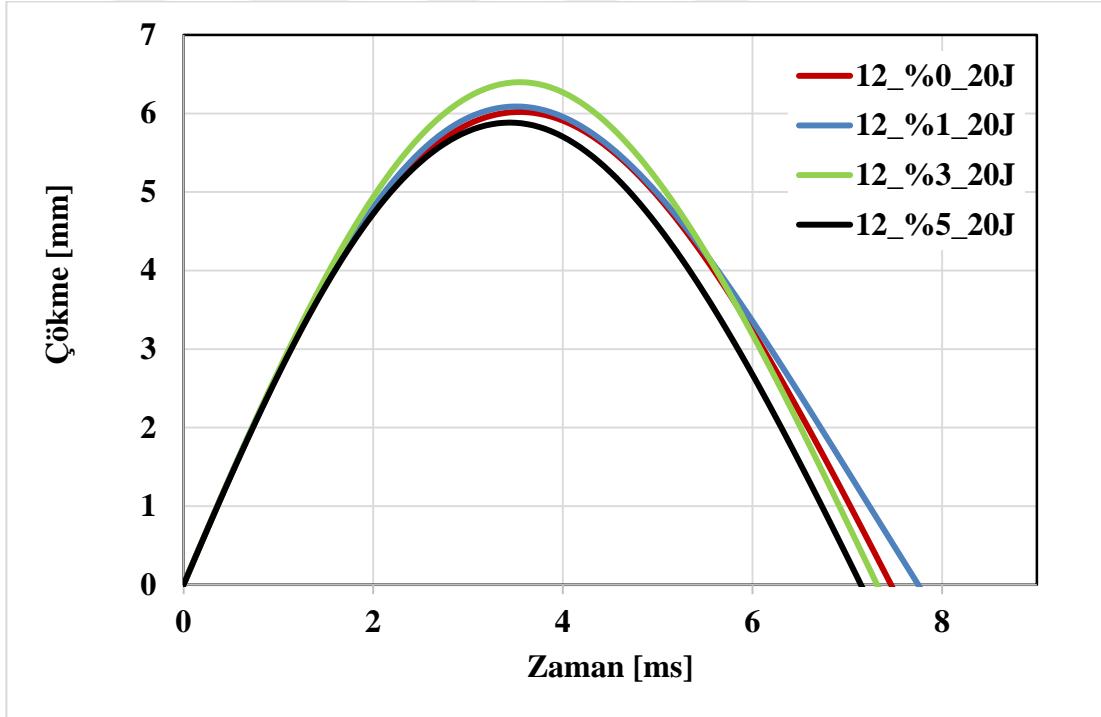
Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10' da görülen kuvvet zaman eğrileri incelendiğinde ağırlıkça %3 oranında TİC takviyeli numunelerin darbe dirençlerinin takviyesiz ve %1, %5 oranında TİC takviyeli numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

4.4. TİC Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Çökme-Zaman (d-t) Grafikleri

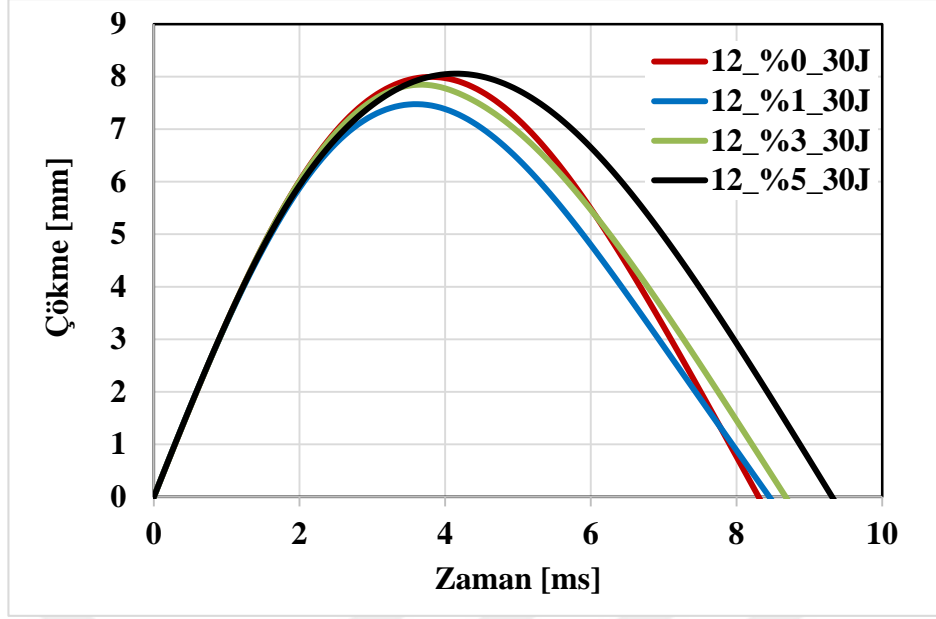
Bir çökme-zaman grafiği numune yüzeyinden geri sekme (rebounding), vurucu ucunun numuneye saplanması (penetration) ve vurucunun numuneyi delip geçmesi (perforation) gibi üç farklı duruma ait eğrileri gösterir. Artan darbe enerjisi altında yapılan darbe testlerinde, kuvvet maksimum değerine ulaştığında numunedeki çökme de maksimum değerine ulaşır. Yani darbe enerjisi arttıkça numunedeki çökme de artar. Numuneye saplanma durumunda vurucu hızı sıfıra ulaştığından numunedeki çökme sabit bir değerde kalır. Fakat numunenin delinmesi durumunda ise vurucu numuneyi delip geçtikten sonra vurucu ve numune arasındaki sürtünme vurucunun ilerlemesini engeller ama çökmede bu esnada artarak devam eder (Sayer, 2009).



Şekil 4.11. TİC takviyeli numunelerin 10J çökme-zaman (d-t) grafiği



Şekil 4.12. TİC Takviyeli numunelerin 20J çökme-zaman (d-t) grafiği



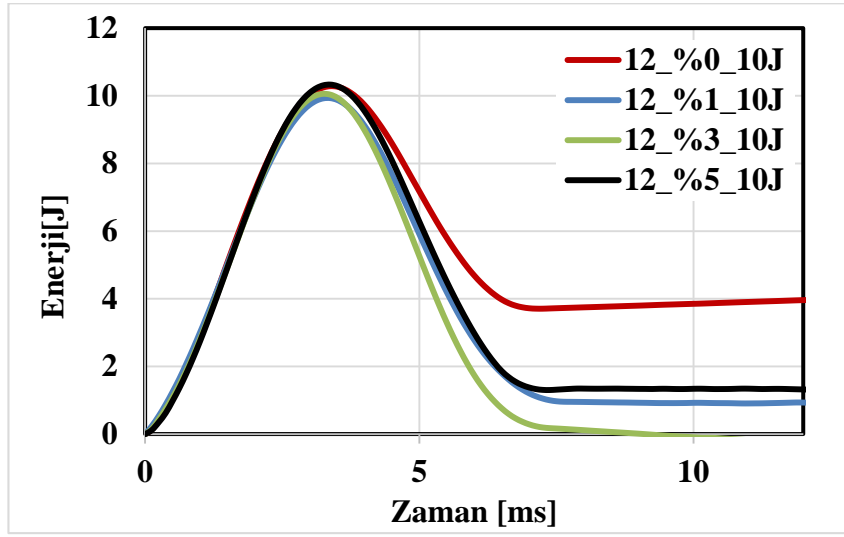
Şekil 4.13. TİC takviyeli numunelerin 30J çökme-zaman (d-t) grafiği

Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13' de yer alan grafikler incelendiğinde tüm grafiklerde eğriler parabolik şekil oluşturmuştur. Çökme zaman grafiklerinde eğriler parabolik şekil meydana getirdiğinde geri sekme yaptığı sonucuna ulaşılır. Darbe enerjisi arttıkça numunelerde çökme miktarı artmıştır fakat delinme hasarı oluşmadığı görülmektedir. Tüm darbe enerjilerinde vurucu uç numuneye çarptıktan sonra geri sekme yaptığı anlaşılmaktadır.

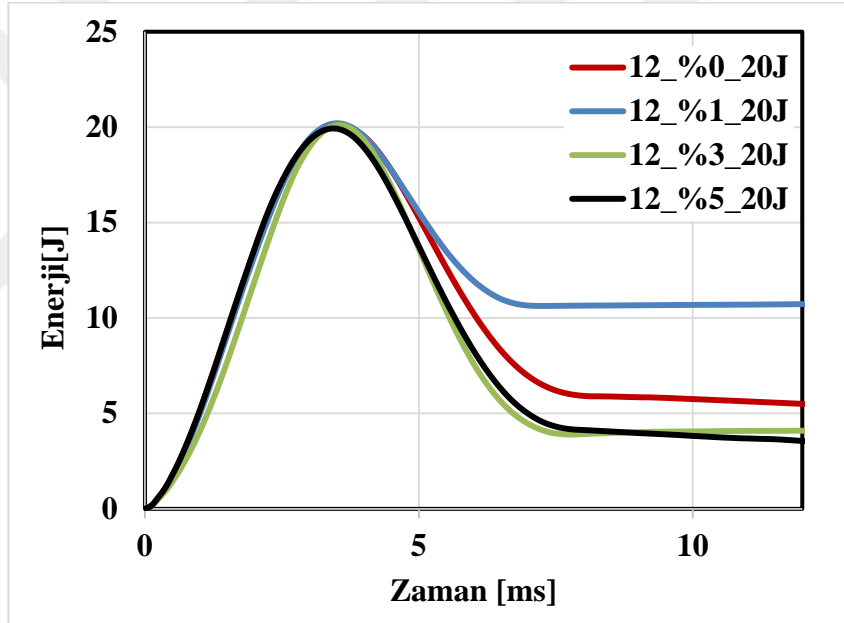
4.5. Titanyum Karbür Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Absorbe Edilen Enerji - Zaman Grafikleri (Ea-t) Grafikleri

Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda vurucunun sahip olduğu enerjinin hepsi numune tarafından absorbe edilemez ve absorbe edilemeyen darbe enerjisi de vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi için harcanır. Vurucunun numuneye saplanması durumunda ise vurucunun sahip olduğu darbe enerjisinin hepsi numune tarafından absorbe edilir.

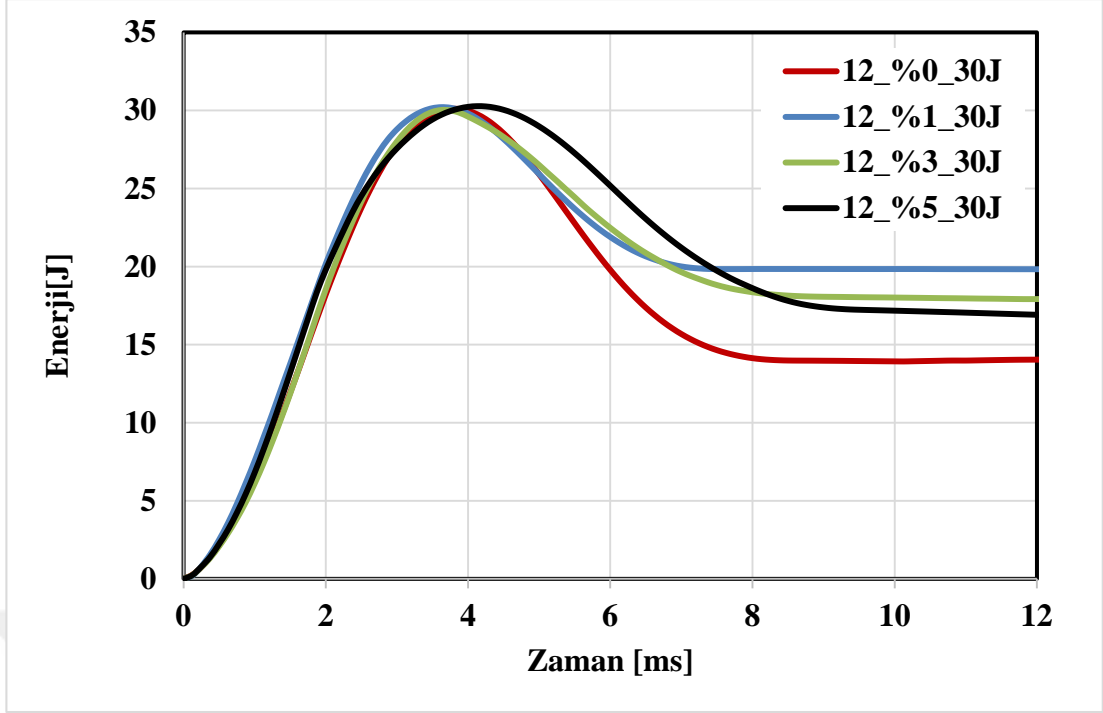
Vurucunun numuneyi delip geçmesi durumunda ise, vurucu ile numune arasındaki sürtünme kısmının altında kalan alanın da darbe cihazının programı tarafından hesaplanan absorbe edilen enerji miktarına katılmasından dolayı eğrinin yukarı doğru yönlendiği görülür. Bu sürtünme kısmının altında kalan alanın toplam absorbe edilen enerji miktarından çıkarılması gerekir (Sayer, 2009).



Şekil 4.14. T°C takviyeli numunelerin 10J enerji-zaman (Ea-t) grafiği



Şekil 4.15. T°C takviyeli numunelerin 20J enerji-zaman (Ea-t) grafiği

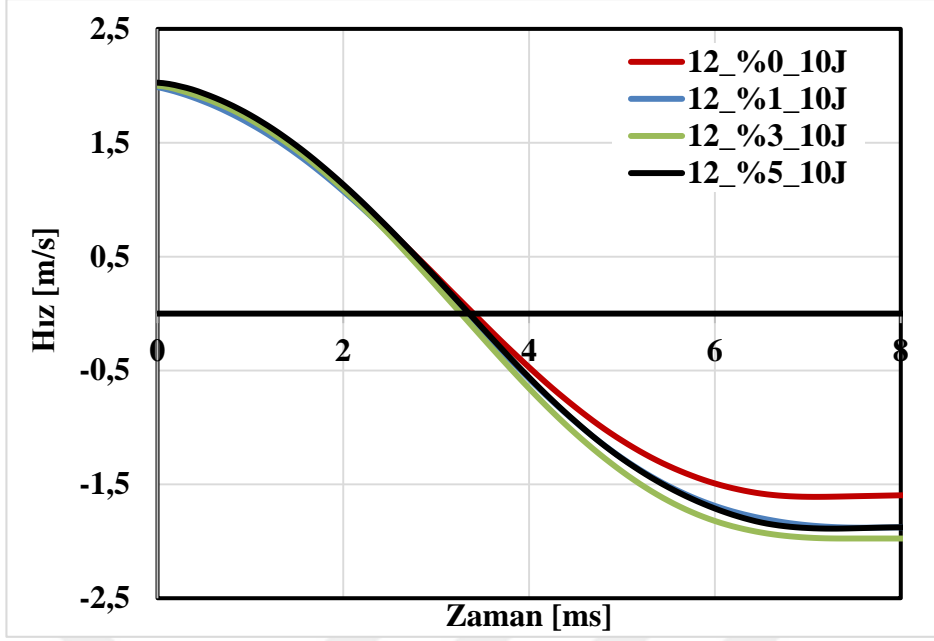


Şekil 4.16. TİC takviyeli numunelerin 30J enerji-zaman (Ea-t) grafiği

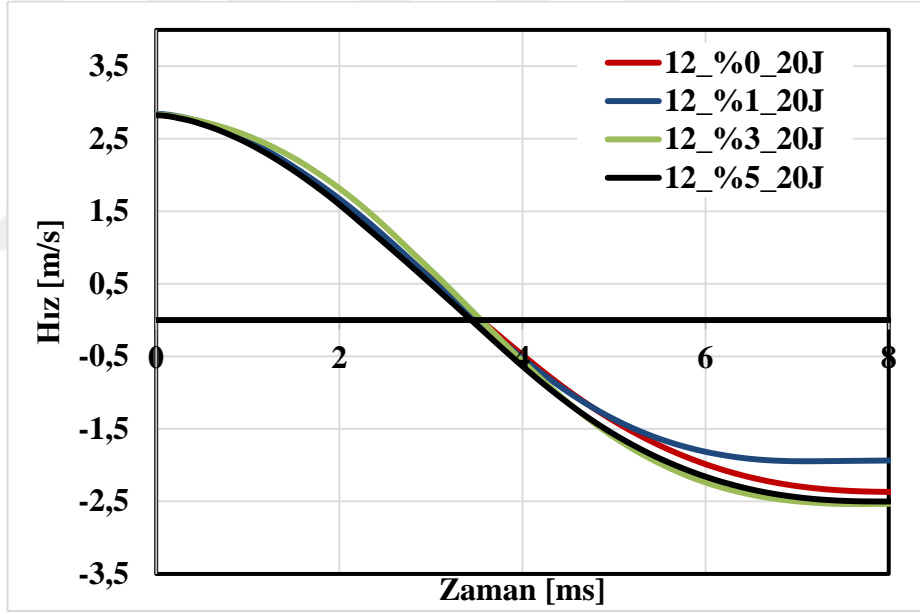
Şekil 4.13 - Şekil 4.14 - Şekil 4.15' de yer alan grafikler incelendiğinde bütün eğriler parabolik şekilde oluşmuştur. Enerji-Zaman grafiklerinde eğriler parabolik şekil meydana getirdiğinde numune yüzeyine çarpan vurucu ucun numuneye çarptıktan sonra geri sekme yaptığı görülmektedir. Vurucunun sahip olduğu enerjinin hepsi numune tarafından absorbe edilememiştir. Numunede delinme ve saplanma gibi bir sonucun oluşmadığı görülmektedir.

4.6. TİC Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Hız-Zaman (V-t) Grafikleri

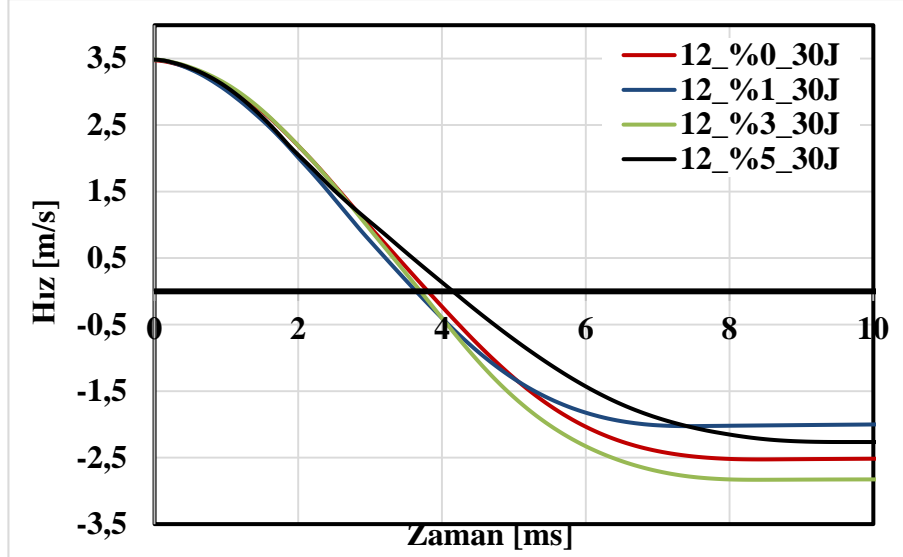
Artan darbe enerjisi altında yapılan darbe testlerinde, ilk başta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra vurucunun hızı azalır. Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda, yukarı doğru hareket eden vurucu negatif bir hıza sahip olur. Vurucunun numuneye saplanması durumunda geri sekme olmayacağı için vurucunun hızı sıfır olacaktır. Numunenin delinmesi durumunda ise vurucunun hızı numune ile yaptığı sürtünmeden dolayı yavaşlamaktadır.



Şekil 4.17. TİC takviyeli numunelerin 10J hız-zaman (V-t) grafiği



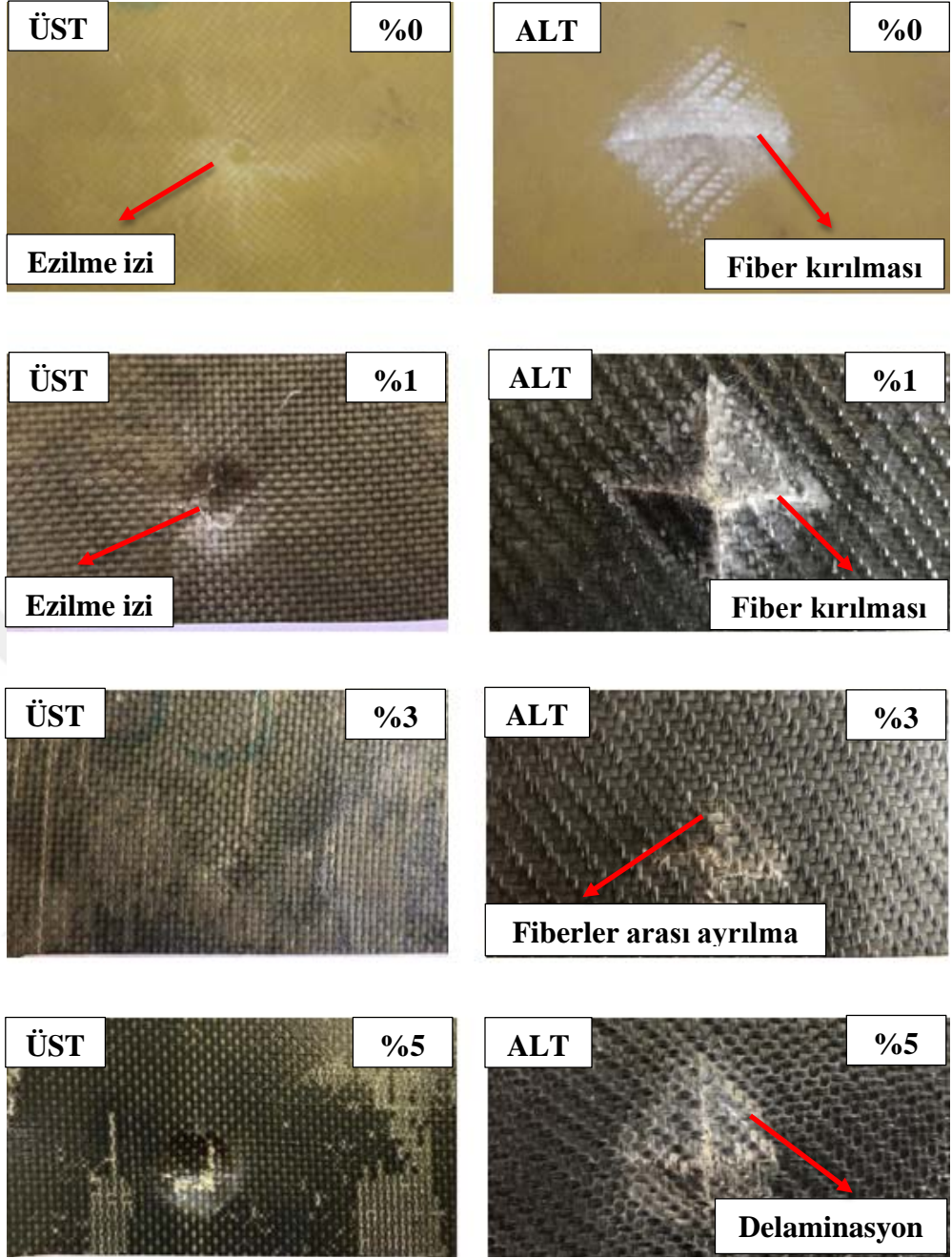
Şekil 4.18. TİC takviyeli numunelerin 20J hız-zaman (V-t) grafiği



Şekil 4.19. TİC takviyeli numunelerin 30J hız-zaman (V-t) grafiği

Şekil 4.17 - Şekil 4.18 - Şekil 4.19' da görüldüğü gibi darbe enerjileri için %0, %1, %3 ve %5 TİC karbür ilaveli hibrit kompozit numunelerin hız-zaman grafiğinde enerji değeri ve TİC oranlarında eğriler negatif bölgeye geçmişlerdir. Grafikte görüldüğü gibi vurucu ucun numunelerle temasından sonra hızında azalma ve ters yönde hızlanma olduğunu görülmektedir. Numuneler üzerine gelen vurucu ucun geri sekme hareketi yaptığını ve numunelerde delaminasyon oluştuğu görülmekte fakat delinme hasarının oluşmadığı görülmektedir. TİC takviyeli numunelerde, vurucu uca geri sekme olayının daha belirgin olduğu görülmektedir. Darbe enerjisi arttıkça %3 TİC takviyeli numunenin diğer numunelere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

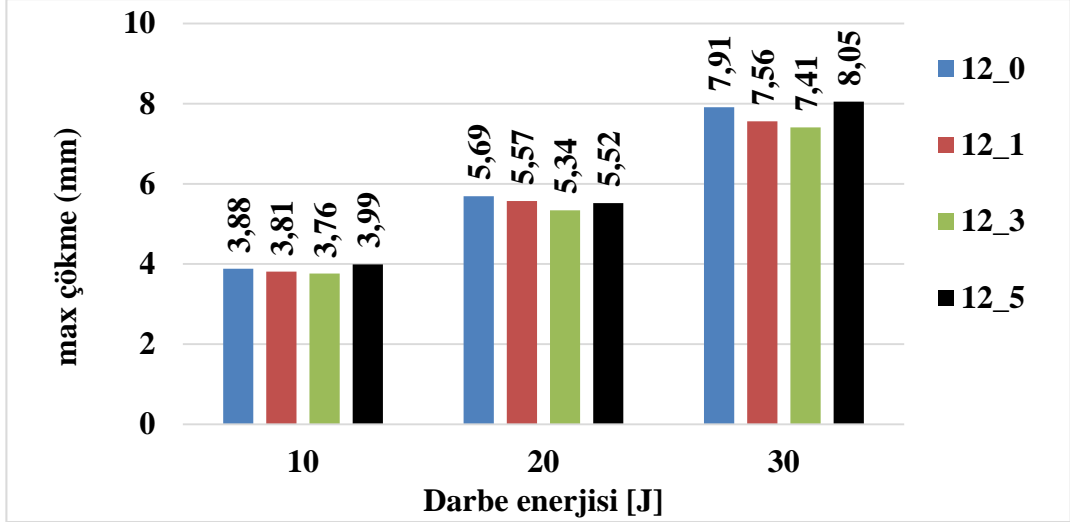
Şekil 4.20' de darbe enerjisi uygulanan numunelerin darbe sonrası üst ve alt yüzey hasar fotoğrafları gösterilmektedir.



Şekil 4.20. Darbe enerjisi uygulanan numunelerin darbe sonrası üst ve alt yüzey hasar fotoğrafları

4.7. Maksimum Çökme Darbe Enerjisi Grafiklerinin İncelenmesi

Şekil 4.21' de %0, %1, %3, %5 TiC nanopartikül takviyeli numunelerin 10-20-30J darbe enerjisinde maksimum çökme-darbe enerjisi grafikleri gösterilmektedir.

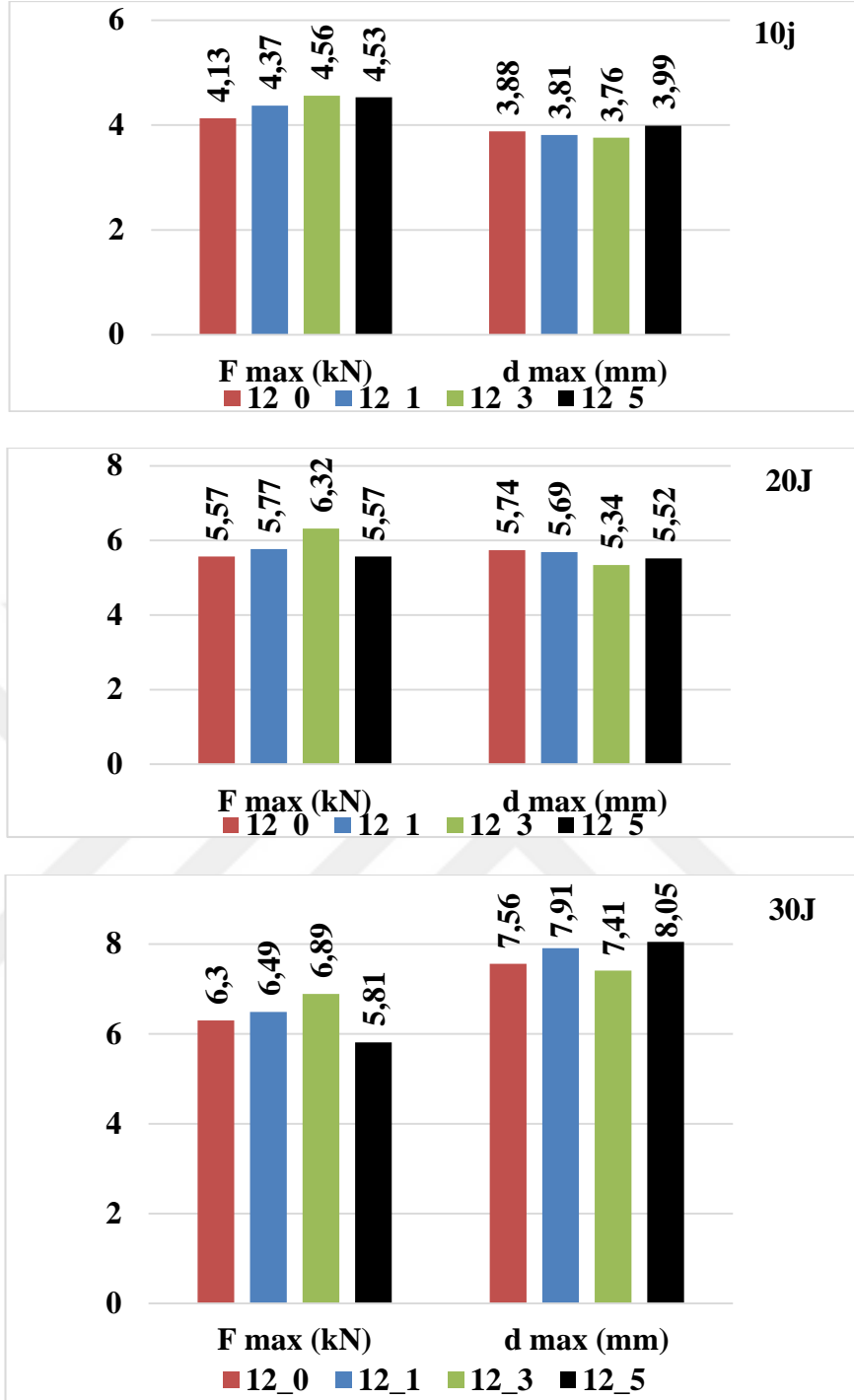


Şekil 4.21. %0, %1, %3, %5 TİC takviyeli numunelerin 10J-20J-30J maksimum kuvvet-darbe enerjisi grafiği

Şekil 4.21’ de görülen grafikte darbe enerjisi arttıkça numunelere gelen maksimum kuvvetin arttığı görülmüştür. Aynı darbe enerjisine maruz kalan numuneler karşılaştırılarak değerlendirme yapıldığında 10J, 20J, 30J, darbe enerjilerinde %3 TİC takviyeli numunelerin diğer TİC takviyeli ve takviyesiz (%0, %3, %5) numunelere göre daha fazla mukavemet gösterdiği ve diğer numunelerle karşılaştırıldığında darbe karşısında %6,32 daha az çökme oluştuğu görülmektedir.

4.8. Maksimum Kuvvet Maksimum Çökme Grafiklerinin İncelenmesi

Şekil 4.22’ de %0, %1, %3 ve %5 TİC takviyeli numunelerin 10J-20J-30J’ de maksimum çökme-maksimum kuvvet grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.22. %0, %1, %3 ve %5 TİC takviyeli numunelerin 10J-20J-30J'de maksimum çökme-maksimum kuvvet grafiği

Şekil 4. 22' deki grafiklerden görüldüğü üzere TİC takviyesi %3 olan numuneler diğer takviye oranlarına sahip numunelere göre daha fazla kuvvet karşıladığı görülmektedir. TİC takviye oranı %3'e kadar artış gösterdiği daha yüksek oranlarda takviye yapıldığında olumsuz etki yaptığı görülmektedir.

4.9. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analiz

Bu bölümde; ANSYS Workbench sonlu elemanlar paket programı kullanarak tabakalı kompozit plakaların darbe testleri simüle edilerek kuvvet-çökme değerleri hesaplanmıştır. Öncelikle ANSYS workbench Explicit Dynamics modülünde analiz yapabilmek için gerekli temel konular hakkında bilgi verilecektir.

Kısa zaman aralığı, büyük deformasyonlar (large strain), kırılma veya malzeme kopması (material failure) içeren durumları simüle ediyorsanız, ihtiyaçlarınızı karşılaması için ANSYS Explicit Dynamics tercih edilebilecek programlardan birisidir. Bir ürünün tepkisini analiz etmek ve üretilmeden potansiyel sorunlarını tanımlamak o ürünün başarısını etkiler. Çarpışma, içe geçme, patlama vb ciddi durumlarda ürünün vereceği cevabı görmek çok önemlidir. ANSYS explicit Dynamics mühendislik simülasyonlar çözümleri, kısa zaman aralığında gerçekleşen fiziksel durumlar için idealdir ve bu durumlar malzeme hasarı veya kopmasına sebep olabilir. Genelde bu tarz durumları deneysel olarak incelemek zor ve maliyetlidir. Simülasyon, içeride gelişen temel olayları detaylı olarak anlama imkanı sağlar. Ayrıca ürünü piyasaya çıkarmak, hatalı durumda pahalıya mal olabilecek iken, mühendislere gerekli değişiklikleri yapma imkanı verir (Anonim, 2019a).

4.10. Explicit Dynamic Çözüm Stratejisi

Her çözüm önceden belirlenmiş malzeme özellikleri, yükler, kısıtlamalar ve başlangıç koşullarına sahip bir mesh yapısı ile başlar. Zamana göre integrasyon işlemi düğüm noktalarının hareket etmesine sebep olur. Düğüm noktalarının hareketi elemanların deformasyonunu üretir. Elemanların deformasyonu her bir elemandaki malzemenin hacminde ve yoğunluğunda bir değişime neden olur. Değişik eleman formülasyonlarını kullanarak, deformasyon hızı gerinme hızlarını türetmek için kullanılır. Gerinme hızlarından bileşke gerilmeleri türetmek için bünye denklemleri kullanılır. Gerilmeler (değişik eleman formülasyonlarını kullanarak) tekrar düğüm noktalarındaki kuvvetlere dönüştürülür. Dış düğüm noktasındaki kuvvetler, sınır şartlarından, yüklerden ve temaslardan hesaplanır. Düğüm noktalarındaki ivmeleri üretmek için düğüm noktalarındaki toplam kuvvetler düğüm noktalarının kütlelerine bölünür. Düğüm noktalarındaki yeni hızları elde etmek için ivmeler explicit olarak

integre edilir. Dügüm noktalarının yeni konumlarını elde etmek için düğüm noktalarındaki hızlar explicit olarak integre edilir. Hesaplama zamanı tamamlanıncaya kadar çözüm prosesi tekrarlanır (Usal, 2016).

4.11. Explicit Dynamic İçin Temel Formülasyon

Bir explicit dinamik analiz ile çözülen temel denklemler Lagrange koordinatlarında kütle, momentum ve enerjinin korunum denklemlerinden oluşmaktadır. Bir maddesel model başlangıç ve sınır koşulları ile birlikte bir fiziksel problemin tam çözümünü tanımlar.

Lagrange formülasyonları için, ağ yapısı (mesh) modellediği malzeme ile birlikte hareket eder ve bozulur, böylece kütle korunumu otomatik olarak sağlanmış olur. Herhangi bir zamandaki yoğunluk bölgenin mevcut hacminden ve onun başlangıçtaki kütlelerinden belirlenebilir:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (4.1)$$

Momentum korunumunu ifade eden kısmi diferansiyel denklemler, ivme ile gerilme tansörü σ_{ij} arasındaki ilişkileri aşağıdaki gibi oluşturur.

$$\rho \ddot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (4.2)$$

$$\rho \ddot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (5.3)$$

$$\rho \ddot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (4.4)$$

Enerjinin korunumu ise aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} \left(\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx} \right) \quad (4.5)$$

Malzemenin deformasyonu iki bağımsız kısım halinde ifade edilmektedir. Bir kısmı hacimdeki değişikliği ifade eden hacimsel davranış (durum denklemi), diğer kısım ise modelin şeklindeki değişikliği temsil eden sapma (deviatorik) davranıştır. Kısacası hacim değişikliğinden kaynaklanan deformasyonlarla biçim değişikliğinden kaynaklanan deformasyonlar birbirinden ayrılmıştır (Usal, 2016).

Lineer elastisite için Hooke yasası ile belirlenen gerilmeler aşağıda verilmiştir;

$$\dot{\sigma}_i = \lambda \left(\frac{\dot{V}}{V} \right) + 2G \dot{\epsilon}_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.6)$$

Burada λ ve G Lamé sabitleri olup G kayma modülü olarak da bilinir. Asal gerilmeler hidrostatik ve deviatorik (sapma) bileşenlerine aşağıdaki gibi ayrılabilir:

$$\sigma_i = -P + s_i \quad (4.7)$$

$$P = -\frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4.8)$$

Burada P basıncı, s_i ise deviatorik gerilmeleri ifade etmektedir (Usal, 2016).

Burada kısaca özetlenen teorik formülasyon hem elastisite hem de plastisite için çok daha detaylı bir şekilde klasik ders kitaplarından temin edilebilir.

Bir önceki zaman adımının sonundaki değerleri girdi kabul ederek, her bir zaman adımı süresince bu denklemler, modeldeki her eleman için explicit olarak çözülür. Yalnızca kütle ve momentumun korunumu zorunlu olarak sağlanmalıdır. Ancak, iyi

tasarlanmış explicit simülasyonlarda kütle, momentum ve enerjinin korunması gerekir. Enerjinin korunumu çözümün kalitesi üzerinde bir geri besleme oluşturacak şekilde sürekli olarak izlenir (zamana bağlı implisit dinamik analizlerde yakınsama toleransları kullanılır).

Explicit dinamik çözücü, Leapfrog yöntemi olarak da bilinen merkezi fark zaman integrasyon şemasını kullanır. İç gerilmeler, temas veya sınır şartlarından kaynaklanan kuvvetler düğüm noktalarında hesaplandıktan sonra, düğüm noktalarındaki ivmeler kuvveti kütleyle bölerek türetilmektedir:

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i \quad (4.9)$$

Burada \ddot{x}_i düğüm noktalarındaki ivmenin bileşenlerini, F_i düğüm noktalarına etkiyen kuvvetleri, b_i cisim ivmesinin bileşenlerini ve m ise düğüm noktasının kütleini temsil etmektedir.

$n-1/2$ zamanındaki ivmeler belirlenmiş ve $n+1/2$ anındaki hızlar ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\dot{x}_i^{n+1/2} = \dot{x}_i^{n-1/2} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n \quad (4.10)$$

Sonuç olarak konumlar aşağıdaki gibi, hızların $n+1$ defa integrasyonu ile güncellenerek hesaplanmaktadır;

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (4.11)$$

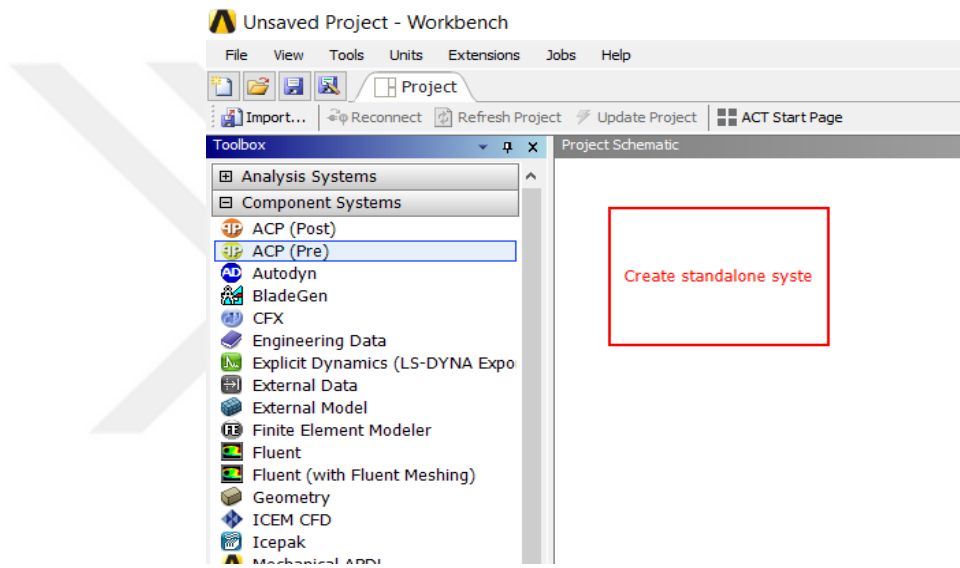
Lineer olmayan problemler için zaman integrasyon metodunu bu şekilde kullanmanın avantajlarını sıralayabiliriz:

Denklemler birleşik halden çıkarılmaktadır ve dolayısı ile doğrudan doğruya (explicit) olarak çözülebilir. Zaman integrasyonu esnasında iterasyon için herhangi bir gereksinim yoktur.

Denklemler birleşik halde (couple) olmadığı için yakınsamanın kontrol edilmesine ihtiyaç yoktur. Katılık matrisinin tersini almak gerekmez. Temas koşullarını da içeren bütün non-linear davranışlar iç kuvvet vektörüne dahil edilmiştir (Usal, 2016).

4.12. Ansys Workbench Explicit Dynamics Uygulaması

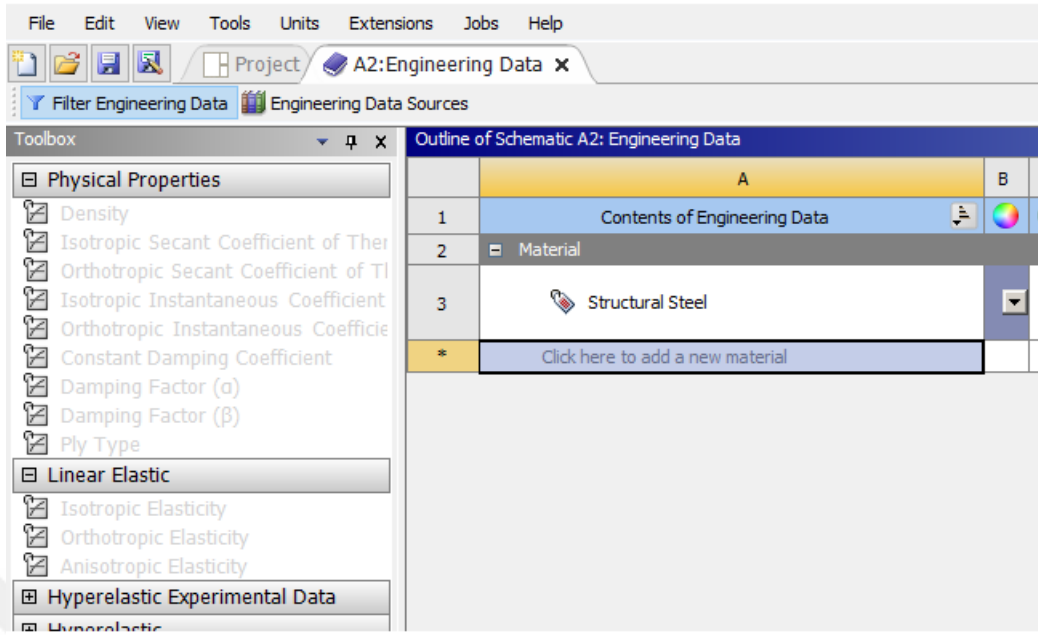
Ansys workbench programı açıldıktan sonra kompozit malzemelerin modellenmesi için kullanılan **toolbox>component>ACP (pre)** bulunur. Farenin sol tuşu ile basılı halindeyken “**create standalone system**” penceresine sürüklenerek bırakılır.



Şekil 4.23. Kompozit malzemenin modelleme modülünün belirlenmesi

4.12.1. Kompozit malzemenin özelliklerinin belirlenmesi

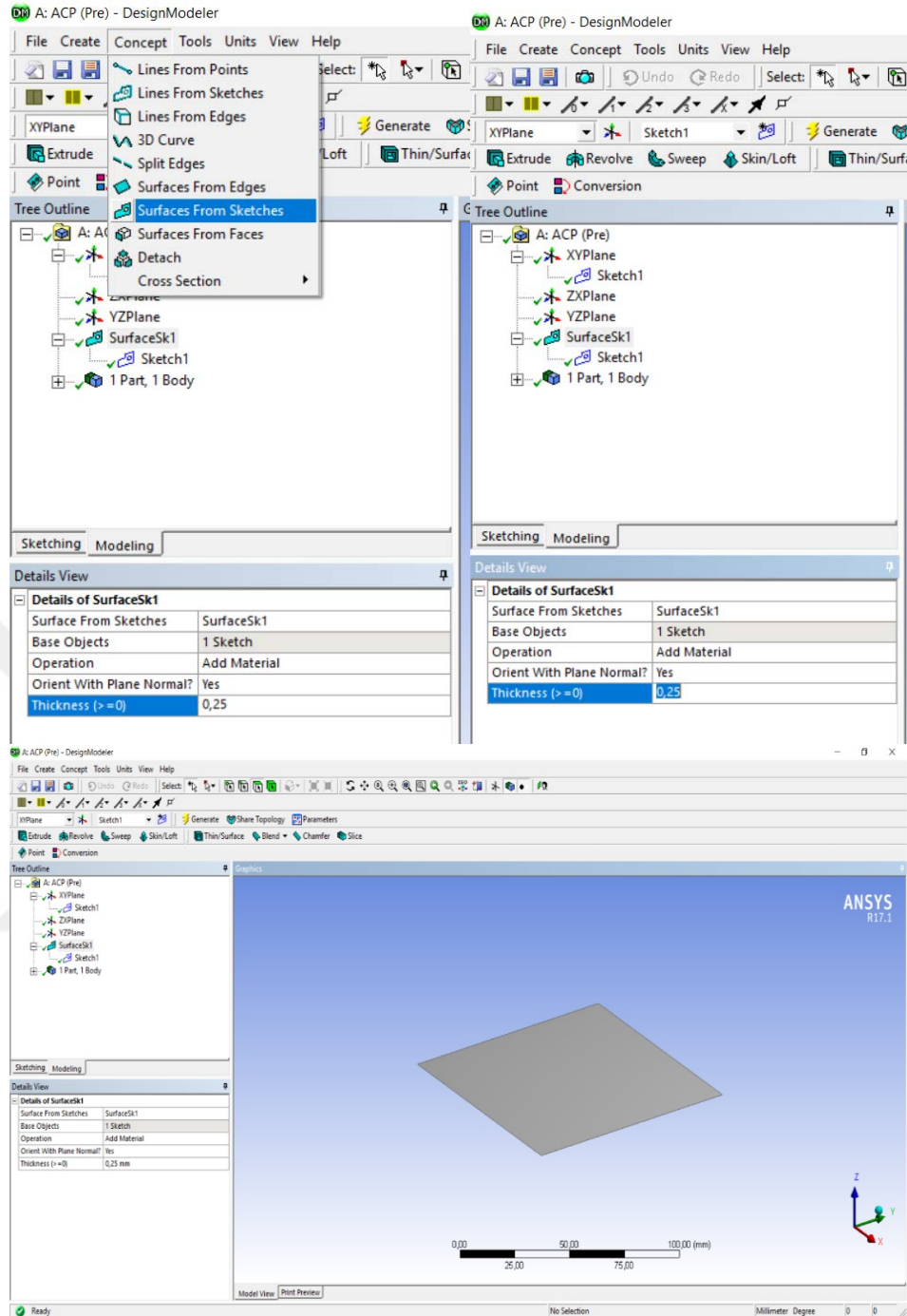
Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için **toolbox>component>ACP (pre)>Engineering Data** tıklanır. Açılan percerede bulunan hazır materyaller malzememizin özelliklerine uygun ise bu bölümden seçerek malzememize atayabiliriz. Kütüphanede bulunmayan bir malzeme özelliklerini programa eklemek için “**Structural steel**” altındaki kısma tıklanır ve malzemeye isim atanır. Yeni malzemenin özellikleri sol taraftaki “**Toolbox**” menüsü altındabulunan sekmelerden seçilerek malzeme özellikleri belirlenir.



Şekil 4.24. Kompozit malzemenin özelliklerinin belirlenmesi

4.12.2. Kompozit malzemenin geometrisinin modellenmesi

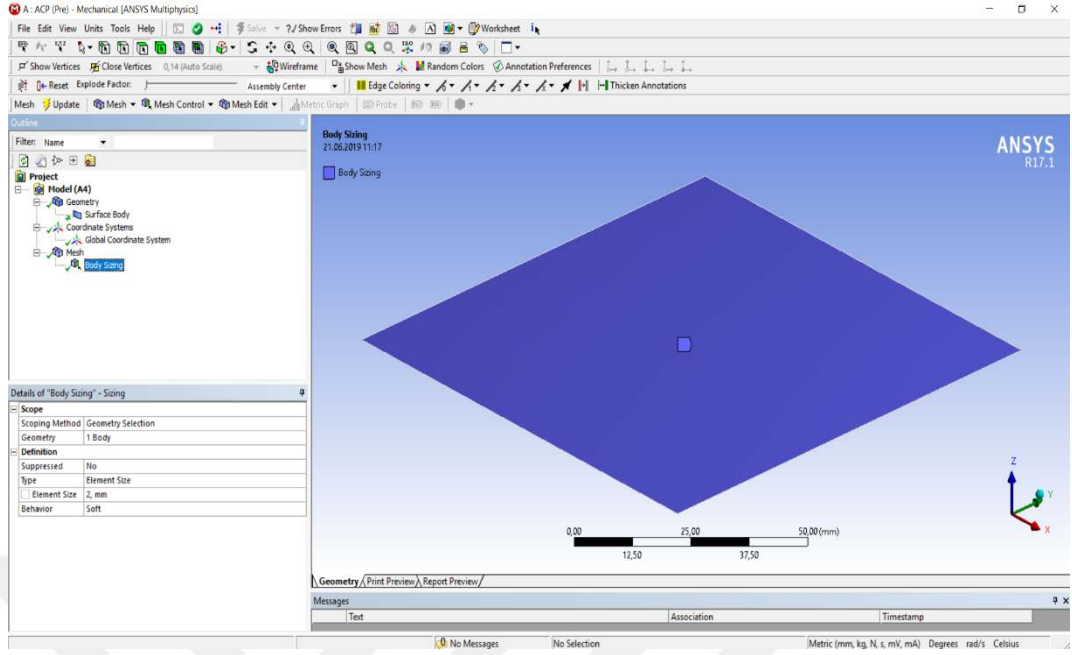
Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için **toolbox>component>ACP (pre)>Geometri** tıklanır. Açılan pencerede bulunan modelleme araçları kullanılarak malzemenin geometrik ölçüleri 2D çizilir. Daha sonra **Main menü>concept>surfaces from sketches** adımları takip edilerek sol tarafta açılan “**detail view**” penceresinden 2D model onaylanarak thickness değeri girilir.



Şekil 4.25. Kompozit malzemenin geometrisinin modellenmesi

4.12.3. Kompozit malzemenin elemanlara ayrılması

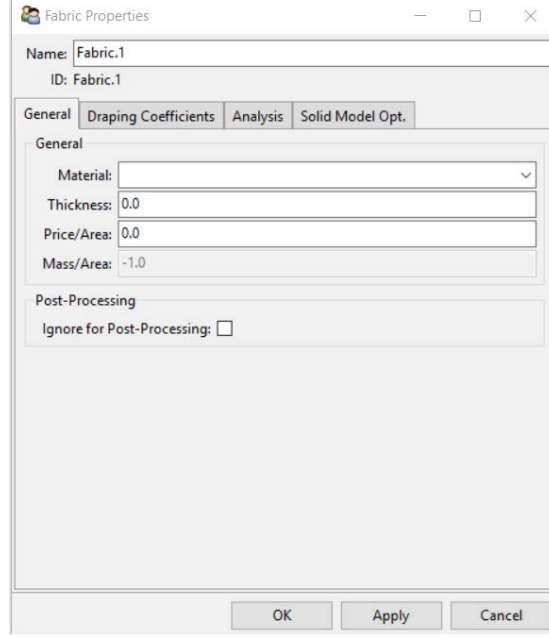
Kompozit malzemenin mesh yapısının modele uygulanması için **toolbox>component>ACP (pre)>model** tıklanır. Açılan percerede **outline >project>mesh** üzerinde sağ tıklayarak **insert>sizing** tıklanarak oluşturulur. Oluşturulan sizing seçilerek sol alt tarafta açılan **“detail of mesh”** penceresinden **“element size”** değeri atanarak mesh yapısı belirlenir.



Şekil 4.26. Kompozit malzemenin elemanlara ayrılması

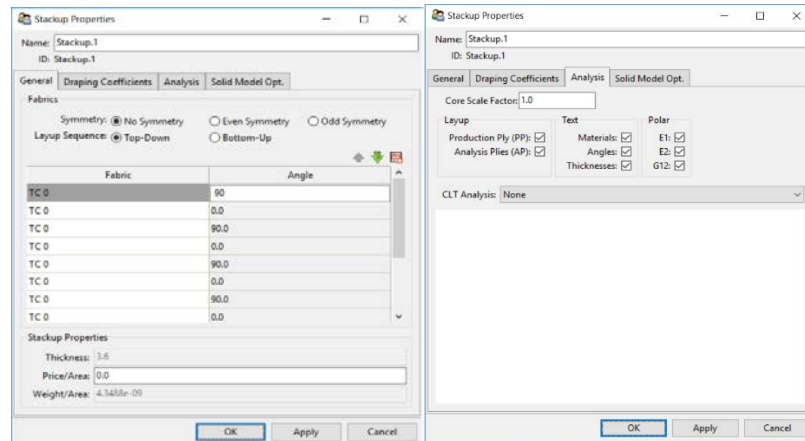
4.12.4. Kompozit malzemenin katmanlarının modellenmesi

Kompozit malzememizin tabaka sayısı, tabaka kalınlıkları ve tabaka açıları girilmesi için **toolbox>component>ACP (pre)>setup** tıklanır. Açılan pencerede sol taraftaki soy ağacından **model >ACP model>material data> fabric** üzerinde sağ tıklayarak **“create fabric”** tıklanır. Şekil 4.27’ de gösterilen pencerede görülen **General** menüsü altında bulunan **material** sekmesinden, **engineering data** bölümünde oluşturduğumuz malzememizi seçiyoruz. **Thickness** bölümünden fiber kumaşımızın kalınlığını girerek **Apply** basıyoruz.



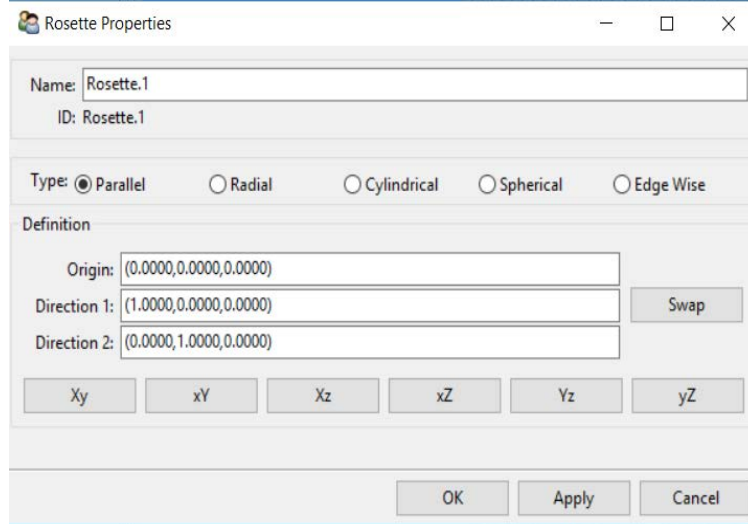
Şekil 4.27. Kompozit malzemenin katman özelliklerinin belirlenmesi

Bir sonraki aşamada katmanları ve fiber yönlerine belirlemek için **model >ACP model>material data>stackup** üzerinde sağ tıklanarak “**create stackup**” seçilir. Şekil 4.28’ de gösterilen pencere açılacaktır. “**General**” menüsü altında bulunan sekmelerden katman sayısı ve katmanların fiber açıları girilir. “**Analysys**” menüsünden gerekli parametreler seçilerek “**Apply**” butonuna basarak işlem onaylanır.



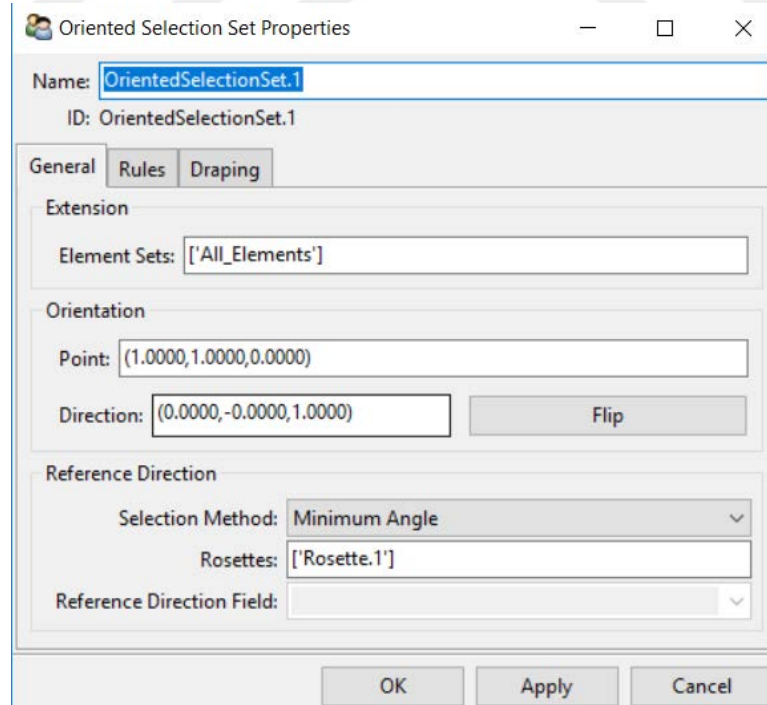
Şekil 4.28. Kompozit malzemenin katman sayısı ve fiber açılarının belirlenmesi

Elemanların referans yönünü belirlemek için için **model >ACP model>material data>rosette** üzerine sağ tıklayarak “**create rosette**” seçilir. Referan yönü seçilerek açılan pencereden “**Apply**” butonuna basılarak referan yönü belirlenir.



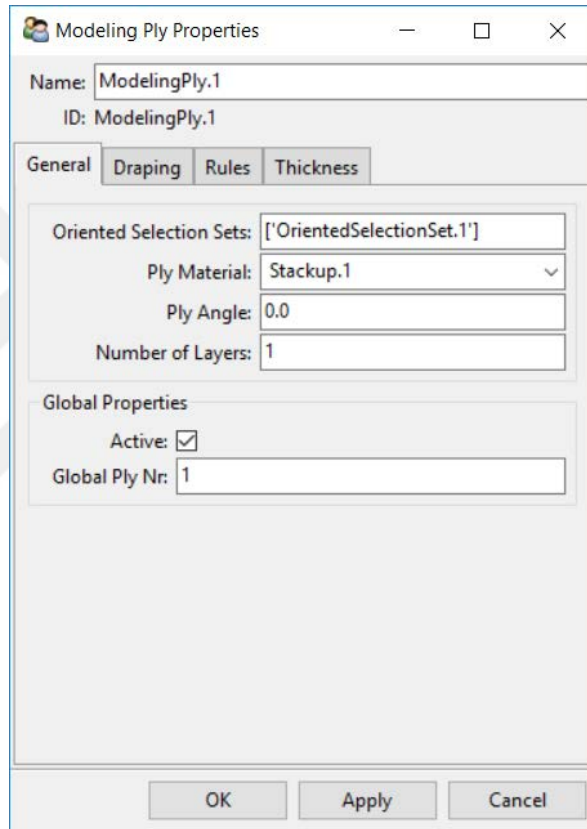
Şekil 4.29. Kompozit malzemenin elemanlarının referans yönünün belirlenmesi

Fiber yönlerinin belirtilmesi için **Model >ACP model>Material data>Oriented Selection Set** üzerine sağ tıklayarak “**create Oriented Selection Set**” Şekil 4.30’ da görüldüğü gibi “**Element Sets**” soy ağacından “**All_elements**” seçilir. Orientation bölümü altındaki “**Point**” noktası yüzey üzerinden bir nokta seçilerek katman yönü belirlenir.



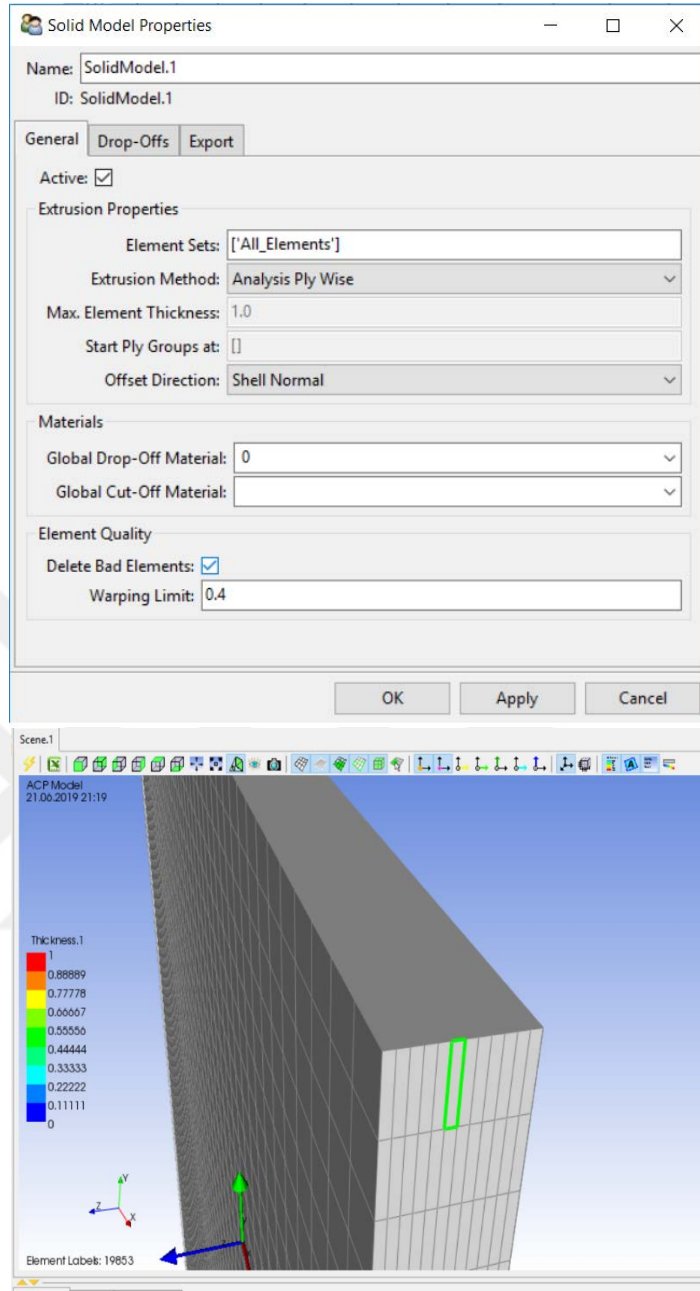
Şekil 4.30. Kompozit malzemenin katman yönünün belirlenmesi

Bu adımdan sonra “**stackup**” bölümünde belirlediğimiz katmanları için **Model >ACP model>Material data>Modeling Groups** üzerine sağ tıklayarak “**create modeling group**” seçerek açılan pencereden modelimizin adını yazarak “**OK**” butonuna tıklıyoruz. Oluşan modelimizin üzerinde sağ tıklayarak “**create Ply** ” seçiyoruz. Açılan pencerede Şekil 4.31’ de görüldüğü gibi oluşturduğumuz “**Oriented Selection Set**” seçiyoruz. “**Ply material**” daha önce katman sayılarını ve fiber yönlerini belirlediğimiz “**stackup**” seçtikten sonra “**Apply**” butonuna basarak katmanları oluşturuyoruz.



Şekil 4.31. Kompozit malzemenin katmanlarının oluşturulması

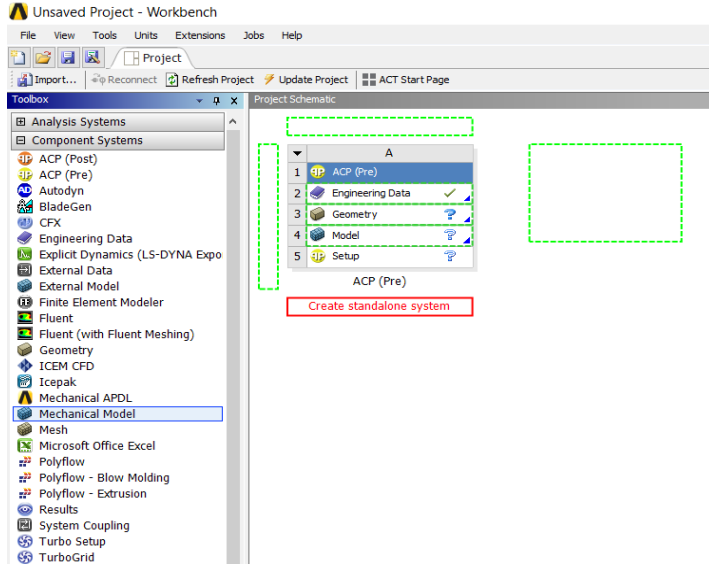
Kompozit malzemesinin modellenmesinde son işlem olarak katmanlara reçinenin emdirilmesi işleminin matematiksel olarak yapılmasını sağlıyoruz. **Model >ACP model>Material data>Solid Models** üzerine gelerek sağ tıklayarak “**create solid models** ” seçiyoruz. Açılan pencerede daha önceki pencerelerde yaptığımız gibi “**elements set**” bölümünü Şekil 4.32’ de görüldüğü gibi “**All_elements**” olarak soy ağacından seçiyoruz. Reçine tipimizi de “**Materials**” bölümünde bulunan “**Global Drop-Off material**” sekmesinden belirledikten sonra “**Apply**” butonuna basarak modelimizi katı model haline getiriyoruz.



Şekil 4.32. Kompozit malzeme katmanlarına reçine emdirilmesi

4.13. Vurucu Ucun Modellenmesi Ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Mekaniksel malzemelerin modellenmesi için kullanılan **Toolbox>Component>Mechanical model** üzerine gelerek farenin sol tuşu ile basılı halindeyken Şekil 4.33’ de gösterildiği gibi “**create standalone system**” penceresine sürüklenerek bırakılır.



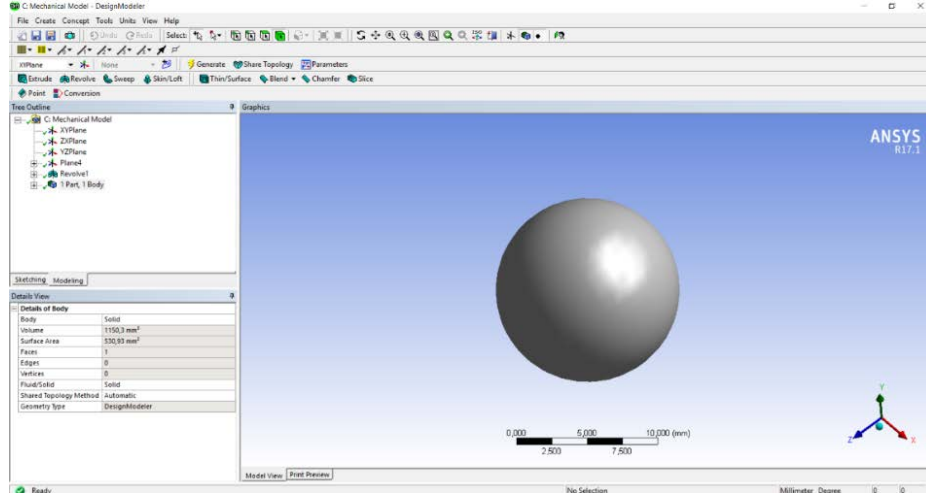
Şekil 4.33. Mekaniksel malzemenin modelleme modülünün belirlenmesi

4.13.1. Mekaniksel malzemenin özelliklerinin belirlenmesi

Mekaniksel malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için **toolbox>component>Mechanical Model>Engineering Data** tıklanır. Açılan percerede bulunan hazır materyaller malzememizin özelliklerine uygun ise bu bölümden seçerek malzememize atayabiliriz. Kütüphanede bulunmayan bir malzeme özelliklerini programa eklemek için **“Structural steel”** altındaki kısma tıklanır ve malzemeye isim atanır. Yeni malzemenin özellikleri sol taraftaki **“Toolbox”** menüsü altındabulunan sekmelerden seçilerek malzeme özellikleri belirlenir. Deneyimizde kullanılan mekaniksel model program kütüphanesinde mevcut olduğu için **“Structural steel”** materyalini kullanıyoruz.

4.13.2. Mekaniksel vurucu ucun geometrisinin modellenmesi

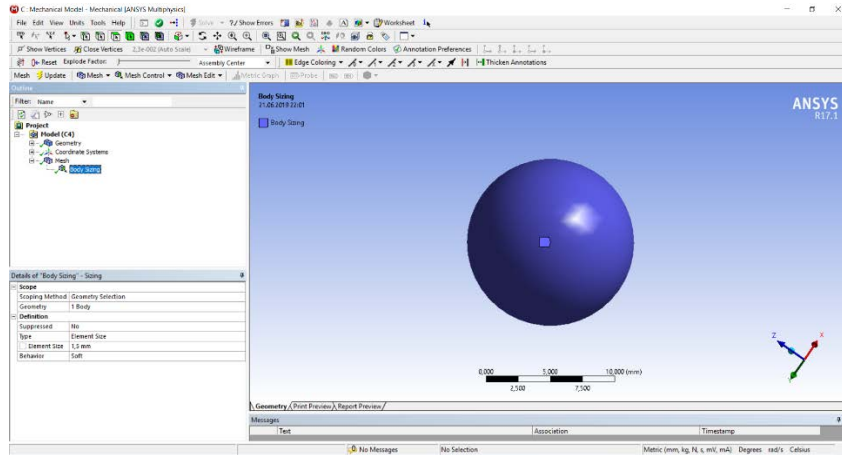
Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için **toolbox>component>Mechanical Model>Geometri** tıklanır. Açılan percerede bulunan modelleme araçları kullanılarak malzemenin geometrik ölçüleri 3D olarak modellenir.



Şekil 4.34. Mekaniksel vurucu ucun modellenmesi

4.13.3. Kompozit malzemenin elemanlara ayrılması

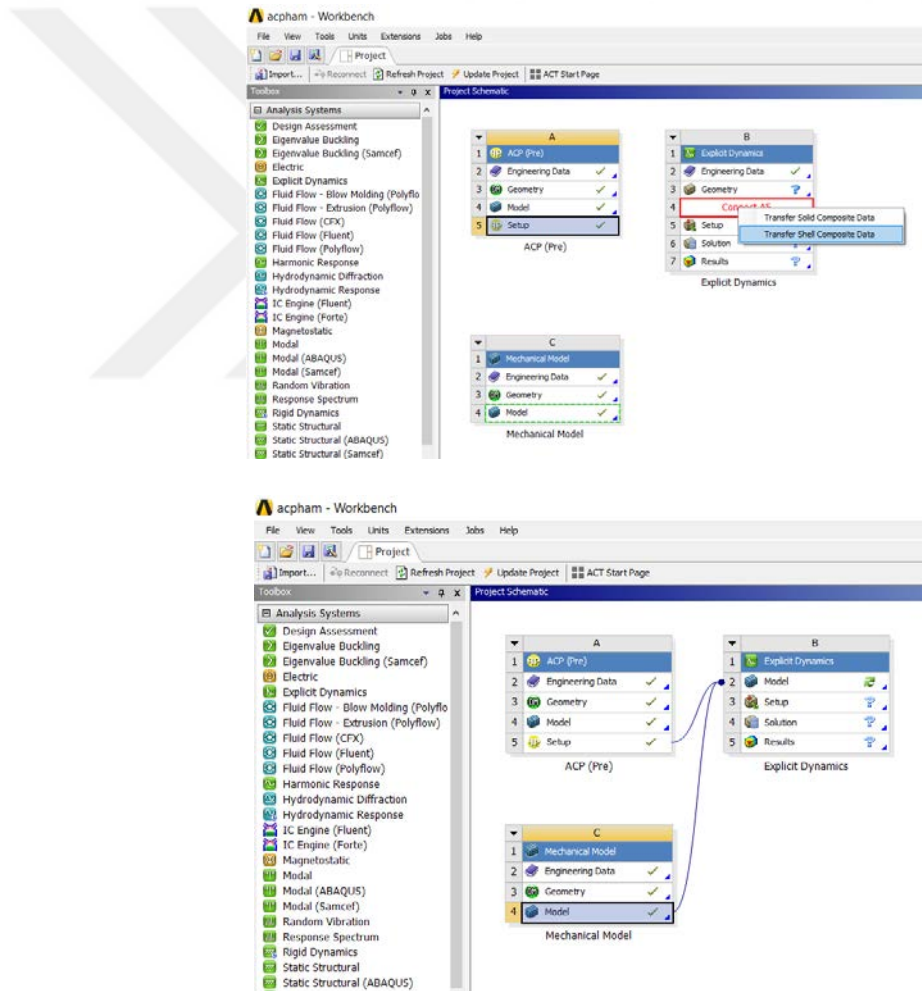
Kompozit malzemenin mesh yapısının modele uygulanması için **toolbox>component>Mechanical Model>Model** tıklanır. Açılan percerede **outline >project>mesh** üzerinde sağ tıklayarak **insert>sizing** tıklanarak oluşturulur. Oluşturulan sizing seçilerek sol alt tarafta açılan “**detail of mesh**” penceresinden “**element size**” değeri atanarak mesh yapısı belirlenir.



Şekil 4.35. Mekaniksel vurucu ucun elemanlara ayrılması

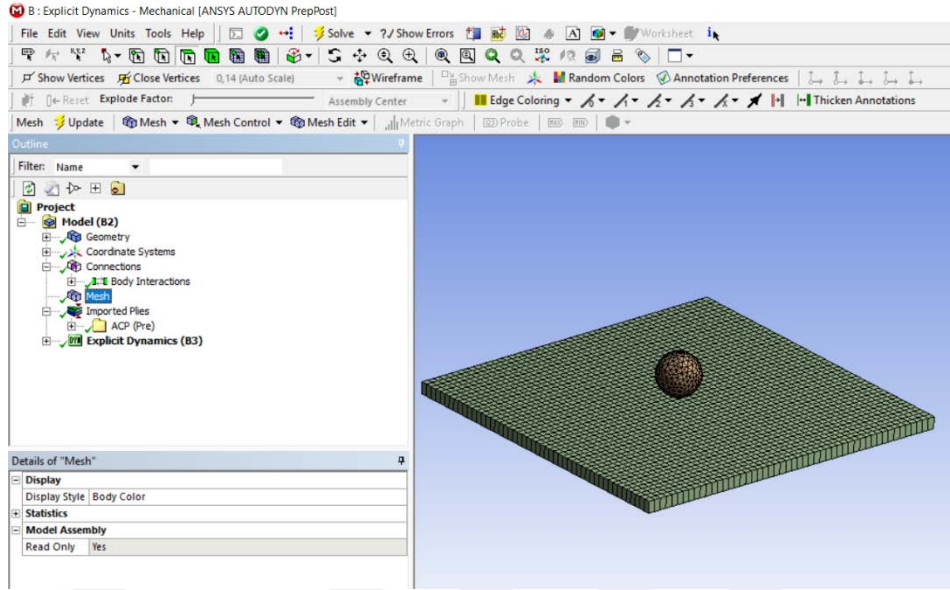
4.14. Explicit Dynamics Modülünün Uygulanması

Kompozit ve mekaniksel malzemelerin modellenmesinden sonra darbe (çarpışma) testinin simüle edilmesi için **toolbox>Analysis Systems>Explicit Dynamics** akışı uygulanarak farenin sol tuşu ile basılı halindeyken Project Schematic sayfasına sürüklenerek **“create standalone system”** penceresinin içine bırakılır. Şekil 4.36’ da gösterildiği gibi **“ACP Pre>setup”** sürüklenerek bırakılır ve malzememiz kompozit bir materyal olduğu için **“Transfer Shell Composite Data”** seçiyoruz. Mekaniksel **“model”** aynı şekilde sürüklenerek **“Explicit Dynamics model”** içerisine bırakılarak modeller import edilmiş olur.



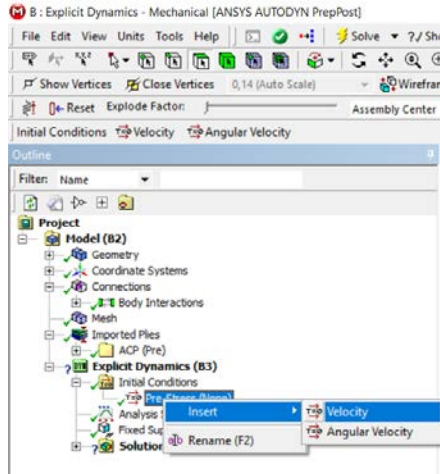
Şekil 4.36. Kompozit ve mekaniksel modelin Explicit Dynamics’e import edilmesi

Modellerin İmport aşaması gerçekleşikten sonra **“Explicit Dynamics>model”** uygulamasına çift tıklanarak uygulama açılır. Modellerimizi mesh yapımızı görmek için **“Outline>Project>Model>mesh”** tıklarız.



Şekil 4.37. Modellerin eleman (mesh) yapısının görünümü

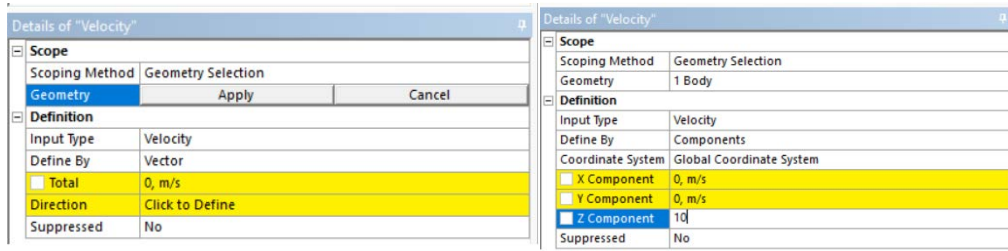
Darbe testinin simülasyonunu yapmak için vurucu ucumuza hareket ve kompozit malzememizi mesnetlememiz gerekmektedir. Vurucu ucumuza hız verebilmek için **Project>model>explicit Dynamics>initial conditions** üzerine gelinip sağ tıklanır. Açılan sekmede **Insert>velocity** tıklanır.



Şekil 4.38. Hız parametrelerinin belirlenmesi

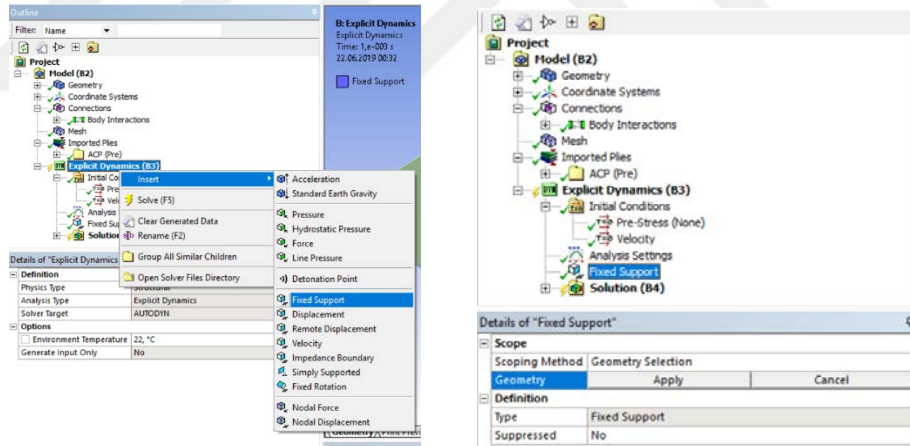
Sol alt kısımda açılan “**detail of velocity**” penceresinden “**scope>geometry**” bölümü tıklanarak hız verilecek olan geometri seçilir ve “**Apply**” butonuna basılarak nesne belirlenir. İkinci işlem olarak aynı pencerede bulunan **Definition>Define**

By>components seçilerek hareket edecek nesnenin hareket edeceği eksene hız değeri girilir.



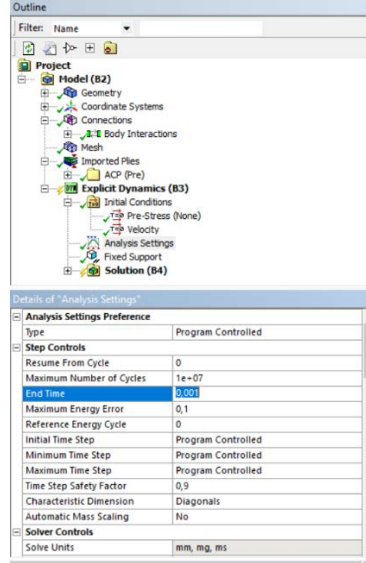
Şekil 4.39. Vurucu uç hız değerinin girilmesi

Kompozit malzemenin mesnetlenmesi için **Project>Model>Explicit Dynamics** üzerinde sağ tıklayıp açılan pencereden **insert>fixed support** seçilir. “**Explicit Dynamics**” altında oluşan “**fixed support**” seçilerek geometri üzerinden mesnet bölgeleri ve seçilir “**detail of fixed support**” penceresinden “**scope**” sekmesinden “**geometry selection**” sekmesinde “**Apply**” butonuna basılarak mesnet bölgeleri belirlenir.



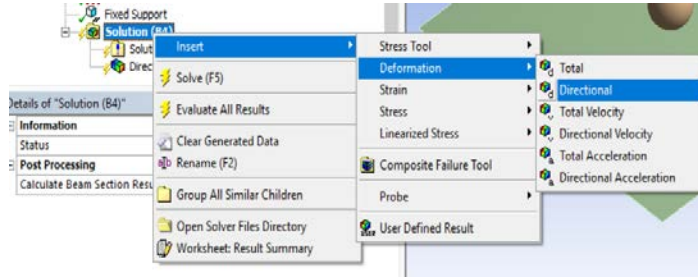
Şekil 4.40. Mesnet noktalarının belirlenmesi

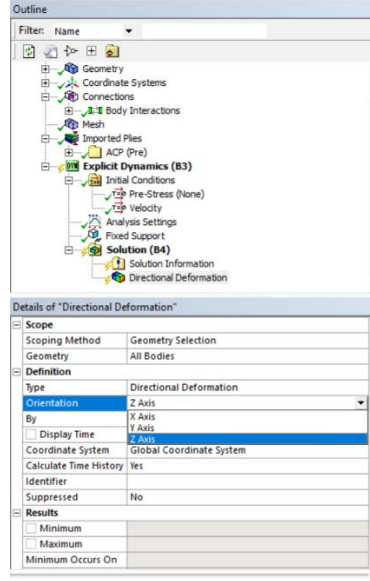
Mesnetleri belirledikten sonraki adım olarak analiz ayarlarının yapılması için “**Explicit Dynamics>analysis settings**” sekmesine tıklanır. “**Details of analysis settings**” penceresinden “**step controls**” sekmesinde “**end time**” sekmesine zaman değeri giriyoruz. “**Details of analysis settings**” sekmesi altında bulunan parametrelerle değişiklikler yaparak analiz sonuçlarının gerçek deney sonuçlarına yaklaşması sağlanabilmektedir.



Şekil 4.41. Analiz parametrelerinin belirlenmesi

Analiz yapmak için gerekli koşullar belirlendikten sonra **“Project>model>explicit Dynamics>solution”** kısmından sağ tıklayıp açılan pencereden istenilen analizi türü eklenerek çözümlene yapabilir. Bu çalışmada **“Solition>Insert>Deformation>Directional”** seçilerek darbe sonrası oluşan maksimum çökme ve kuvvet değerleri elde edilmiştir. **“Detail of directional deformaion”** penceresinden **“Definition>Orientation”** sekmesinden deformasyon yönü seçilir.



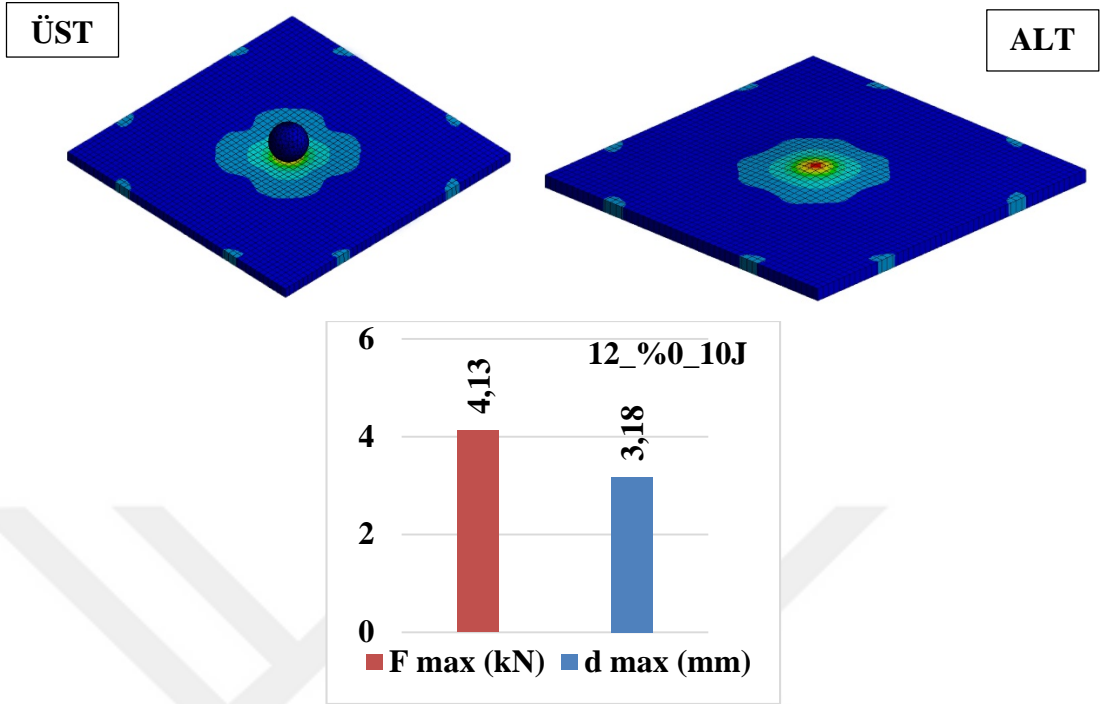


Şekil 4.42. Analiz tipinin belirlenmesi

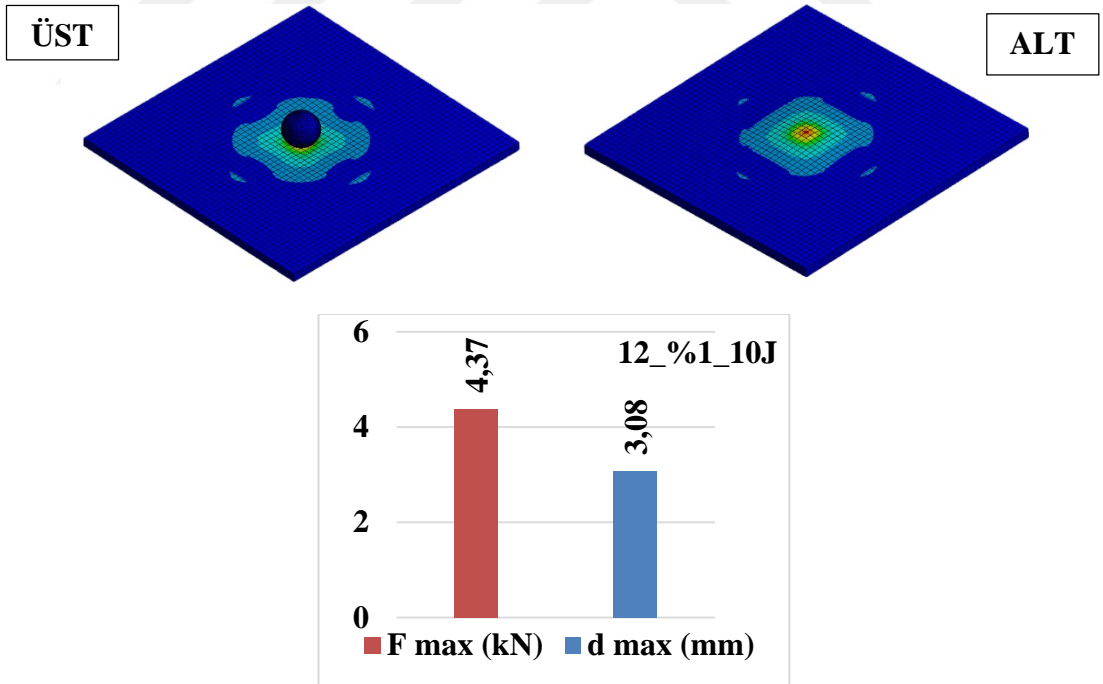
4.15. Darbe Deneylerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Sayısal Analizi

Sonlu eleman tabanlı bir program olan ANSYS mühendislik probleminin çözümü üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu aşamalar; ön işlemler, çözüm ve son işlemler olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada ANSYS WORKBENCH programının Explicit Dynamics modülünde kompozit plakalar modellenmiş deneysel verilerde elde edilen mekanik özelliklerin parametreleri programa aktararak deneyler bilgisayar ortamında matematiksel olarak analiz yapılmıştır.

4.15.1. TİC takviyeli numunelerin 10j sayısal analizleri

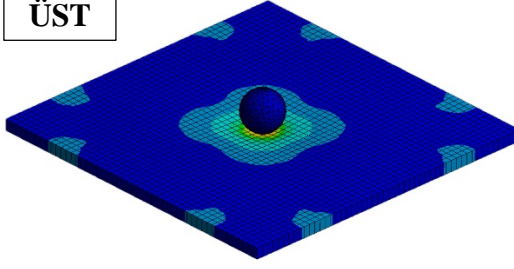


Şekil 4.43. %0 TİC takviyeli numunenin 10J sayısal analiz görünümü ve değerleri

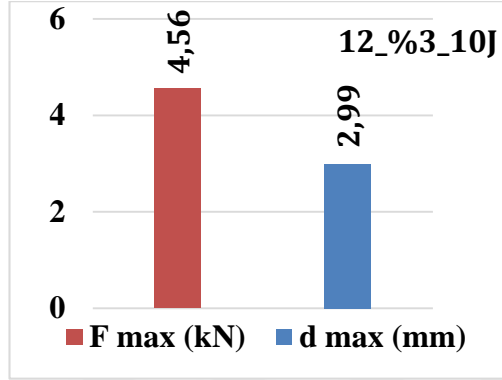
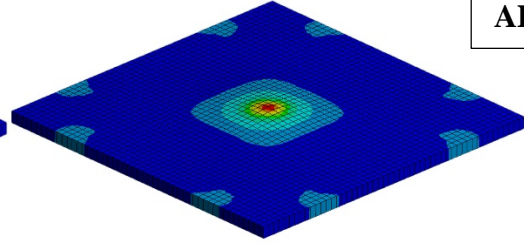


Şekil 4.44. %1 TİC takviyeli numunenin 10J sayısal analiz görünümü ve değerleri

ÜST

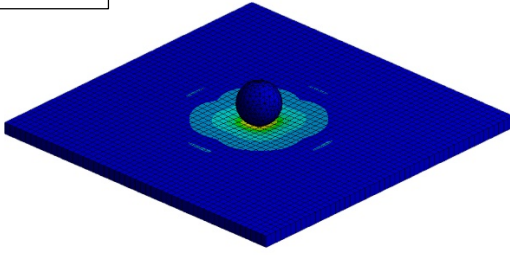


ALT

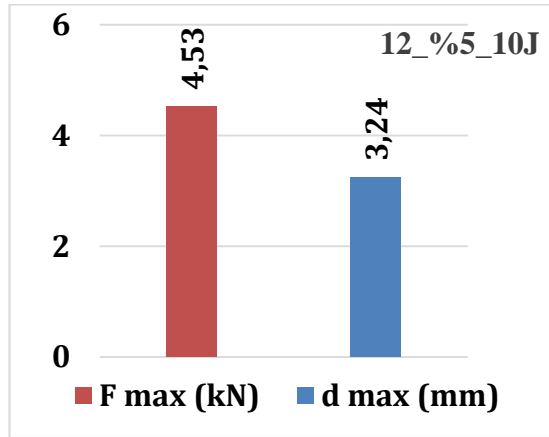
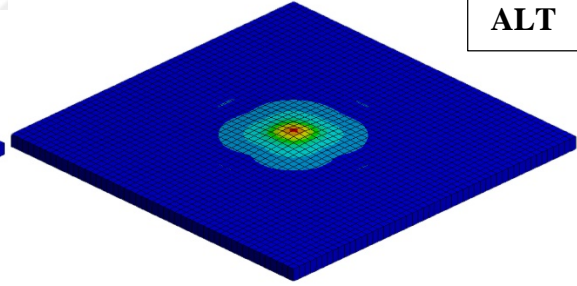


Şekil 4.45. %3 TiC takviyeli numunenin 10J sayısal analiz görünümü ve değerleri

ÜST

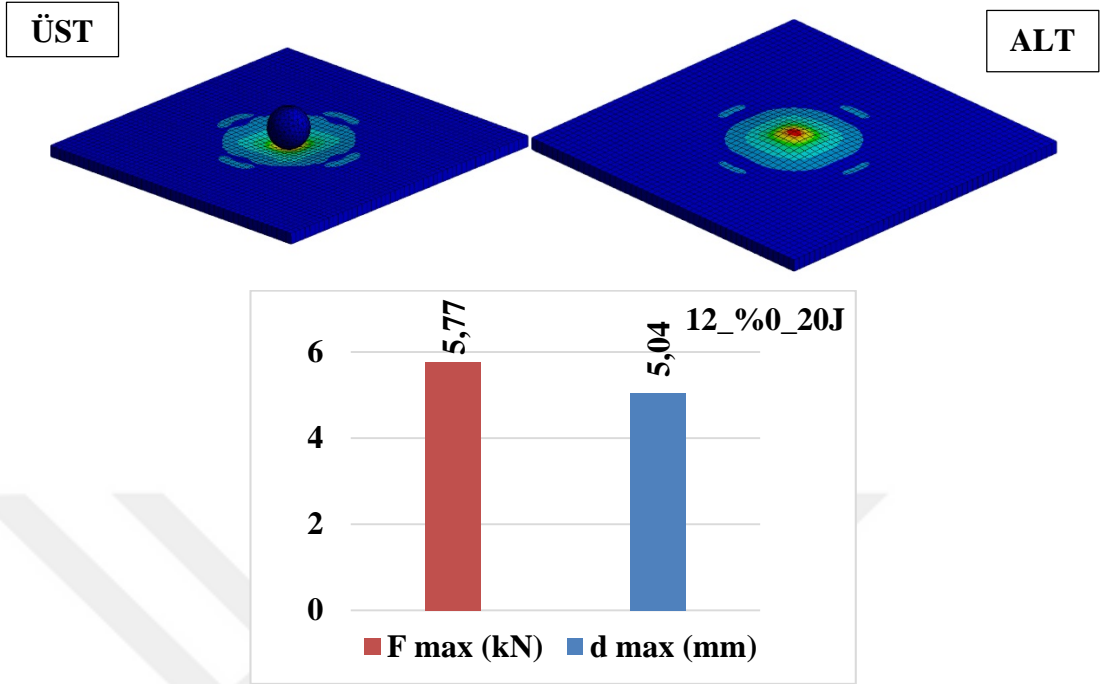


ALT

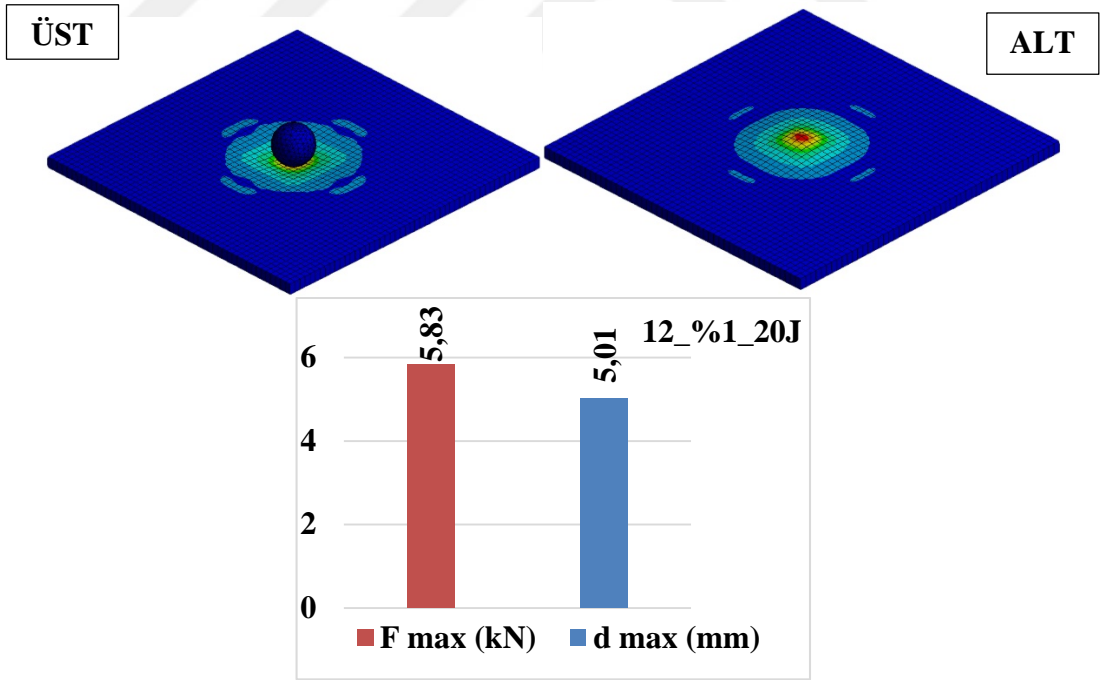


Şekil 4.46. %5 TiC takviyeli numunenin 10J sayısal analiz görünümü ve değerleri

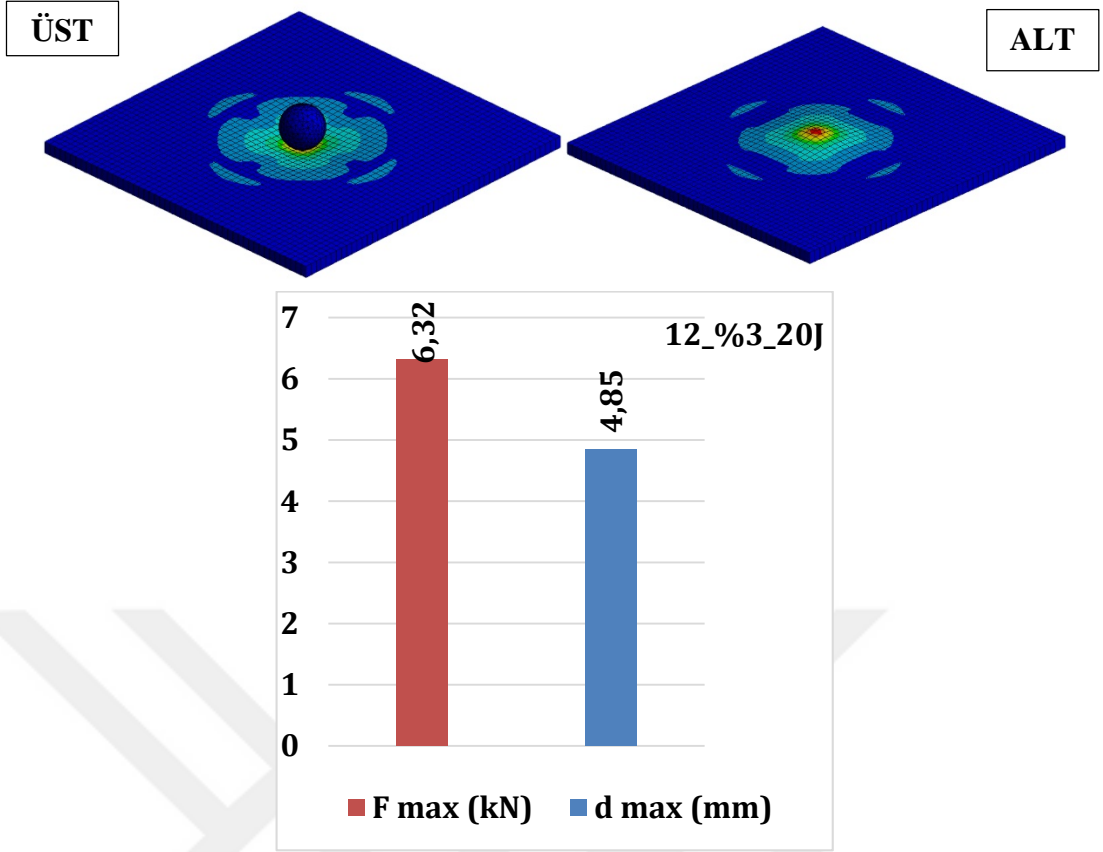
4.15.2. TİC takviyeli numunelerin 20j sayısal analizleri



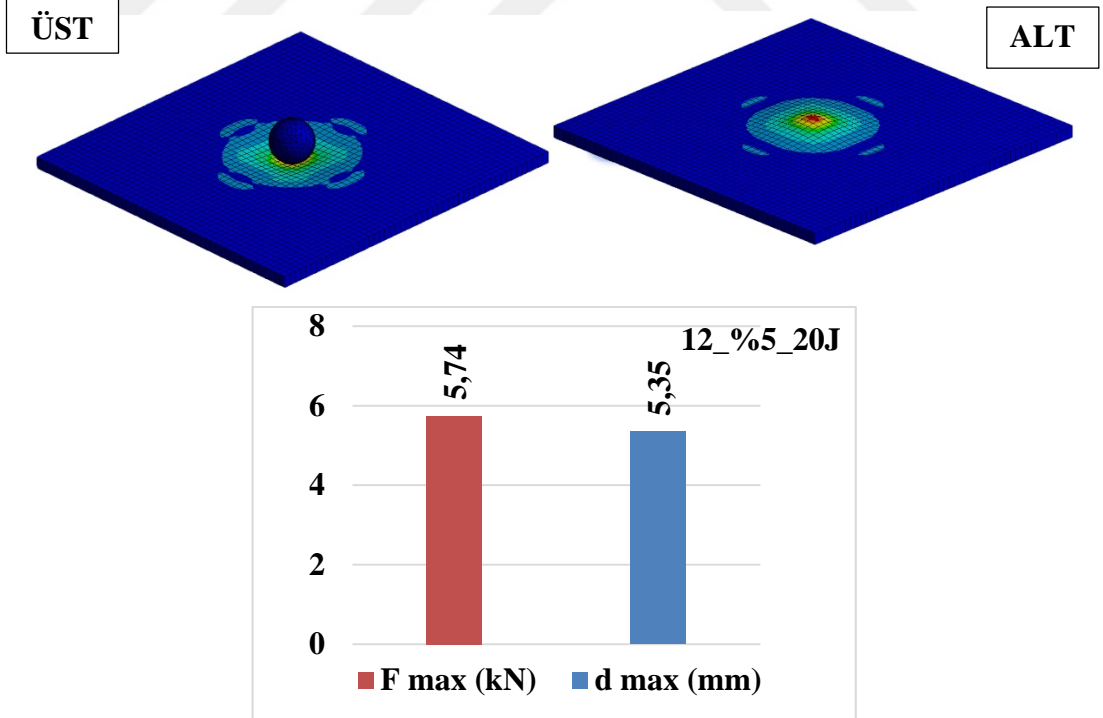
Şekil 4.47. %0 TİC takviyeli numunenin 20J sayısal analiz görünümü ve değerleri



Şekil 4.48. %1 TİC takviyeli numunenin 20J sayısal analiz görünümü ve değerleri

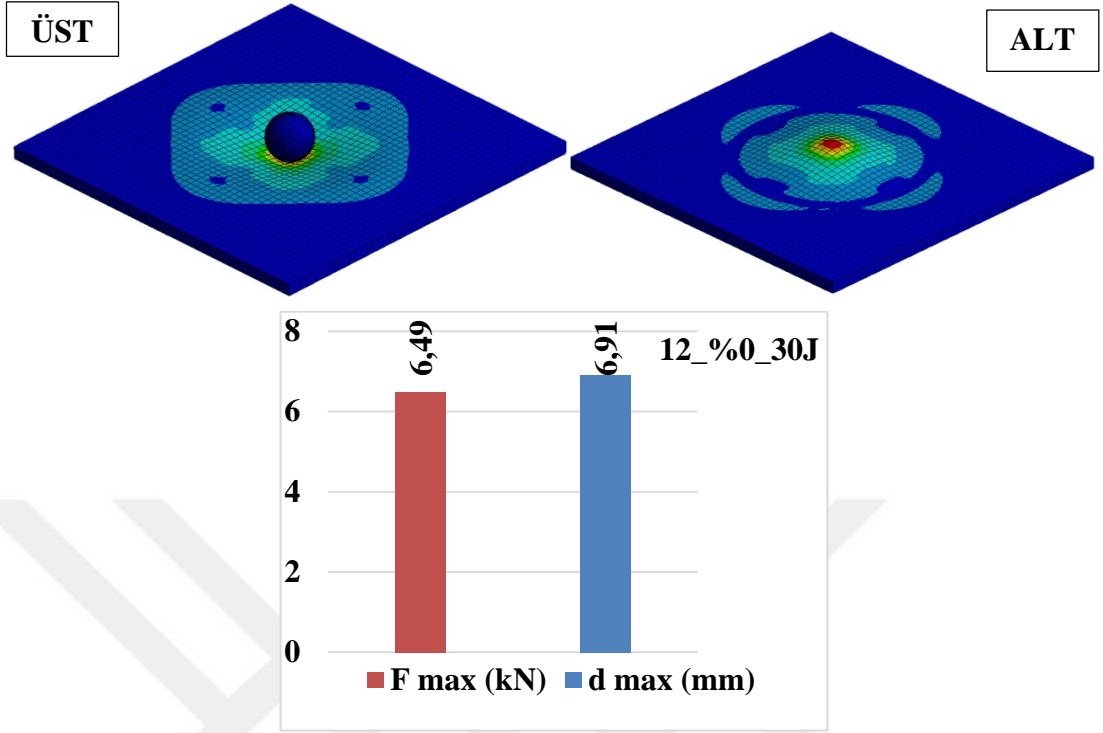


Şekil 4.49. %3 TiC takviyeli numunenin 20J sayısal analiz görünümü ve değerleri

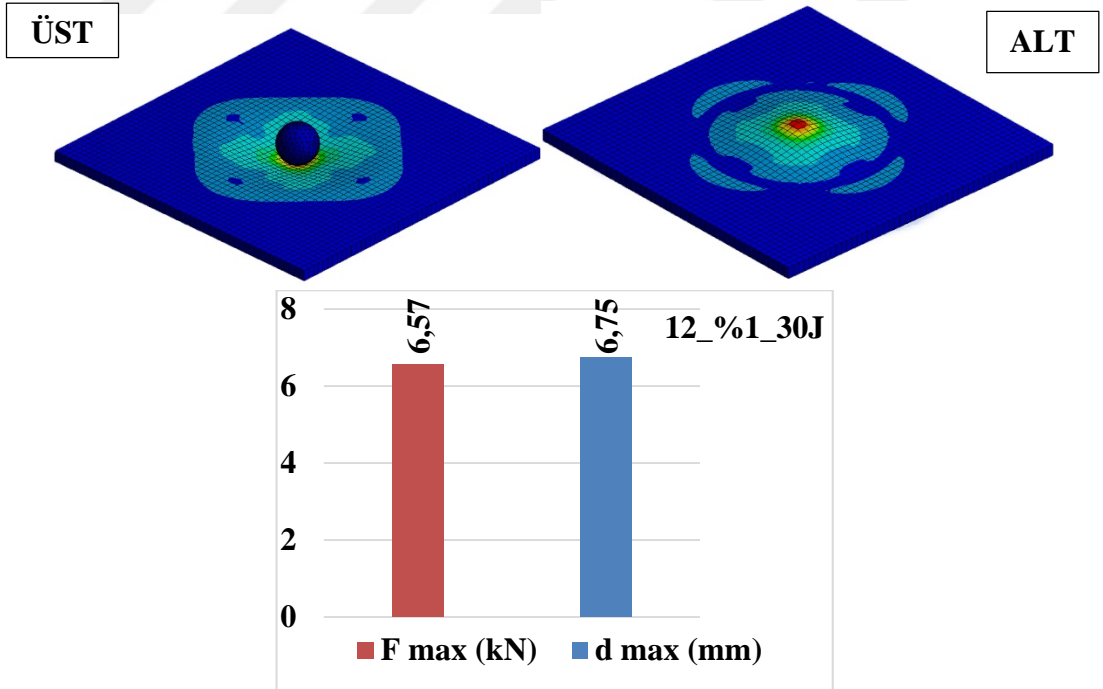


Şekil 4.50. %5 TiC takviyeli numunenin 20J sayısal analiz görünümü ve değerleri

4.15.3. TİC takviyeli numunelerin 30j sayısal analizleri



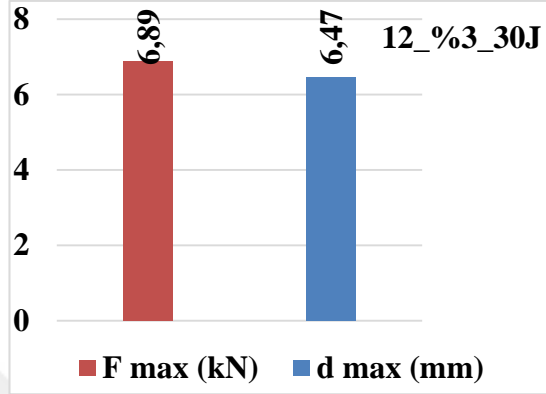
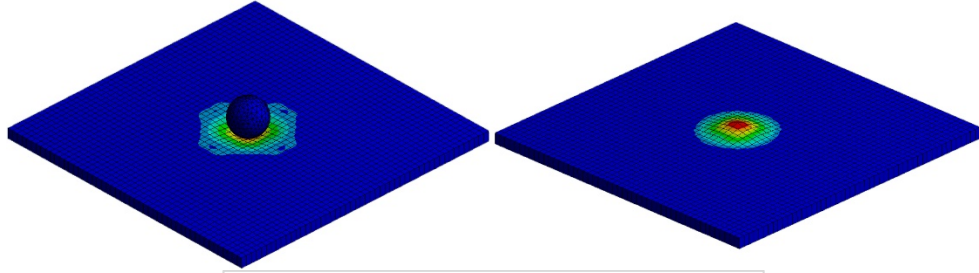
Şekil 4.51. %0 TİC takviyeli numunenin 30J sayısal analiz görünümü ve değerleri



Şekil 4.52. %1 TİC takviyeli numunenin 30J sayısal analiz görünümü ve değerleri

ÜST

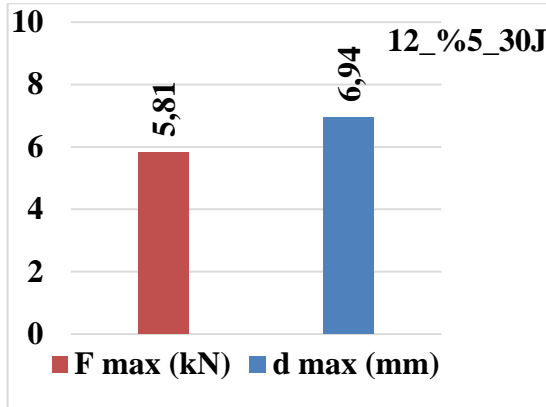
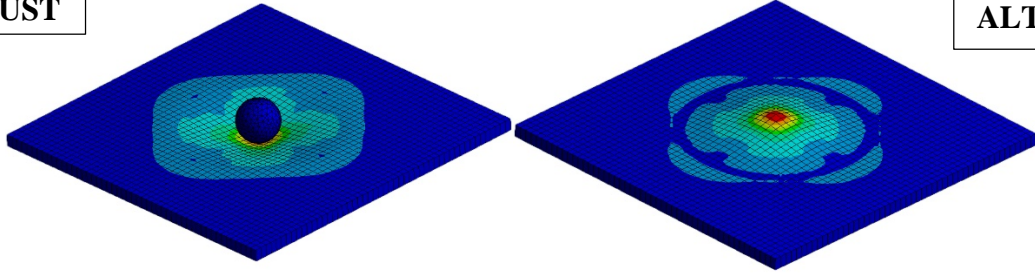
ALT



Şekil 4.53. %3 TİC sakviyeli numunenin 30J sayısal analiz görünümü ve değerleri

ÜST

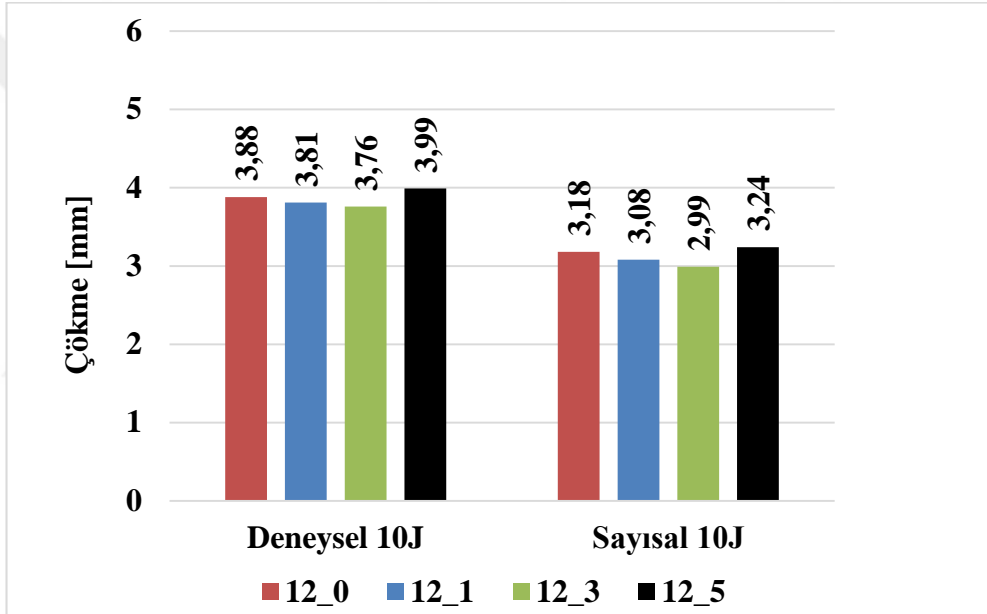
ALT



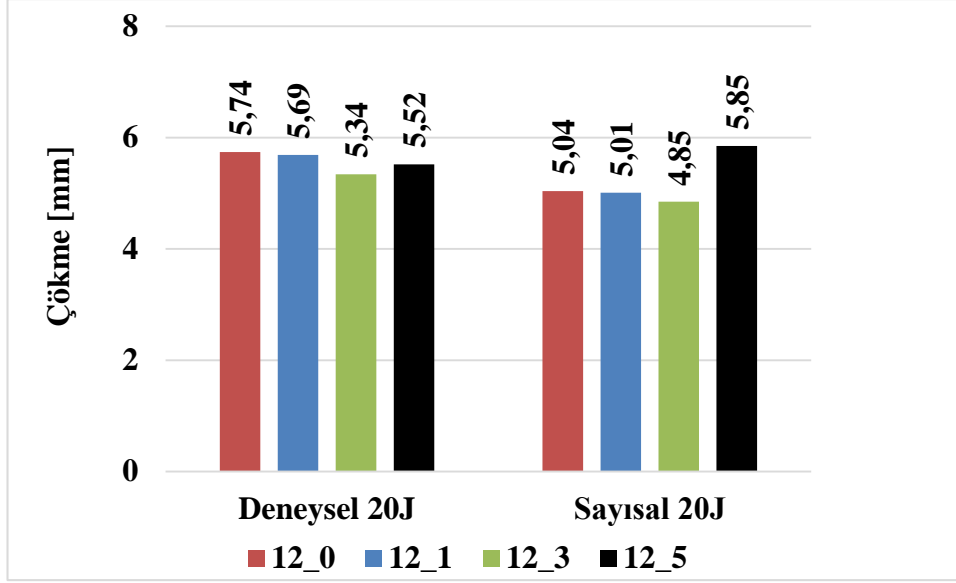
Şekil 4.54. %5 TİC takviyeli numunenin 30J sayısal analiz görünümü ve değerleri

4.15.4. TİC takviyeli numunelerin çökme- darbe enerjisi deneysel ve sayısal karşılaştırılması

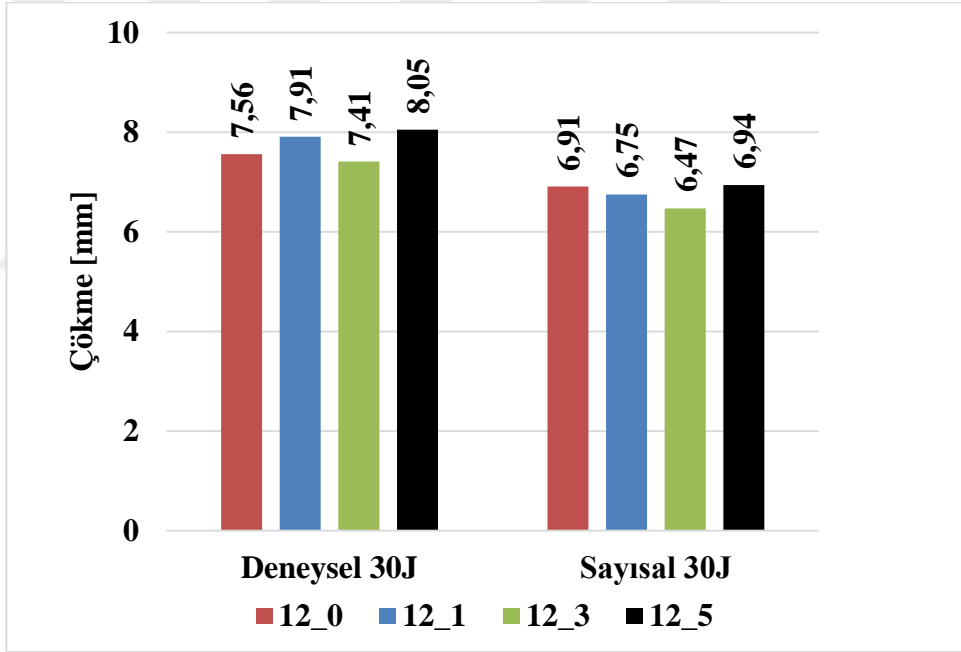
Grafikten de görüleceği üzere genel olarak deneysel testlere göre sayısal testler daha iyi performans göstermektedir. Sayısal testler ile deneysel testler %79,5 oranında yakınsama görülmektedir. Sayısal testlerde ortaya çıkan sonuçlar deneysel testlerde elde edilen değerlere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Deneysel testlerde elde edilen değerlerde en iyi sonuçlar % 3 TİC takviyeli numunelerde elde edilmiştir. Sayısal testlerde elde edilen sonuçlarda da %3 TİC takviyeli numuneler daha üstün özellik göstermiştir.



Şekil 4.55. TİC takviyeli numunelerin 10J çökme-darbe enerjisi deneysel ve sayısal karşılaştırılması



Şekil 4.56. TİC takviyeli numunelerin 20J çökme-darbe enerjisi deneysel ve sayısal karşılaştırılması



Şekil 4.57. TİC takviyeli numunelerin 30J çökme-darbe enerjisi deneysel ve sayısal karşılaştırılması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada epoksi ile güçlendirilmiş 12 tabakalı (9 kevlar+3cam elyaf) hibrit kompozit numunelere TİC nanopartikül ilavesinin mekanik özelliklere ve darbe davranışına olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, 12 tabakalı 100x100 mm boyutlarında hibrit kompozit plakaların oda sıcaklığında darbe davranışları belirlenmiştir. 10J, 20J, 30J şeklinde artan darbe enerjilerinde deneylere tabi tutulmuşlardır. Yapılan bu mekanik testler ve darbe testleri sonucunda bu hibrit kompozit plakaların darbe davranışları hakkında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Hibrit kompozit malzemelerin reçinesine ağırlıkça %1 oranında TİC takviyesinin yapıldığı numunelerin elastisite modülünde %3,65 oranında artış meydana gelmiştir.
- Hibrit kompozit malzemelerin reçinesine ağırlıkça %3 oranında TİC takviyesinin yapıldığı numunelerin elastisite modülünde %14,74 oranında artış meydana gelmiştir.
- Hibrit kompozit malzemelerin reçinesine ağırlıkça %5 oranında TİC takviyesinin yapıldığı numunelerin elastisite modülünde %2,03 oranında düşüş meydana gelmiştir.
- Hibrit kompozit malzemelerin reçinesine ağırlıkça %3 oranında TİC takviyesinin yapıldığı numunelerde absorbe edilen darbe enerjisinde %6,32 artış olduğu görülmüştür.
- Ağırlıkça %3 oranının üzerinde takviye yapılması durumunda TİC nanopartiküllerinin topaklanmaya neden olduğu, homojen olarak reçine içerisinde dağılmadığı, bunun sonucunda reçinenin özelliklerine olumsuz etki yaparak katmanlar arası yapışmayı azalttığı görülmüştür.

Hibrit kompozit plaklarda, düşük darbe enerjileri için darbe uygulanan yüzeylerde ilk önce ezilme izi ve matris çatlağı ile başlayan hasar modu, darbe enerjisinin artmasıyla tabaka kalınlığı boyunca fiber kırılmalarının olduğu hasar moduna dönüşmektedir.

Tüm numunelerden elde edilen Fmax değeri karşılaştırıldığında %3 TİC nanopartikül takviyeli numunelerden, en yüksek Fmax değerleri elde edilmiştir. Buna göre, darbe karakteristikleri değerleri bakımından %3 TİC ilaveli hibrit kompozit plakaların %0, %1, %5 TİC takviyeli numunelere göre daha üstün performans göstermiştir.

Hibrit kompozit plaklar için oda sıcaklığında darbe enerjisi arttıkça temas kuvveti, çökme ve numune ile temas süreleri de artmaktadır. Genel olarak kompozitin kuvvet ve çökme değerleri fiber kopması sınırında en yüksek değerine ulaşırken, vurucu ile numune arasındaki temas süresi ise fiber kopması öncesinde en yüksek değerine ulaşmaktadır.

TİC nanopartikül takviyeli hibrit kompozit plaklarda darbe uygulanmamış olan arka yüzeylerde küçük delaminasyonlar ve fiberler arası ayrılma olarak başlayan hasar modu, darbe enerjisinin artmasıyla delaminasyon alanlarının genişlediği ve bazı fiberlerin matrisden ayrıldığı bir hasar moduna dönüşmektedir.

Aramid hibrit kompozitlerde, aramid fiberlerin altında bulunan cam fiberler aramid fiberler içinde meydana gelen delaminasyonları sınırlayıcı bir etki yaptığı ve daha bölgesel bir hasarın meydana gelmesini sağladığı gözlemlenmiştir.

TİC'in tabakalar arası kayma dayanımını artırarak delaminasyonu azalttığı görülmüştür. Bu azalma en belirgin olarak ağırlıkça %3 oranında TİC oranına sahip hibrit kompozitlerde görülmüştür.

Deneysel test sonuçları ile sayısal test sonuçları arasında %79,5 oranında yakınsama görülmüştür. Sayısal test sonuçlarında da %3 TİC takviyeli numuneler en iyi mekanik özellik göstermişlerdir.

Ağırlıkça %3 TİC'li hibrit kompozit malzemenin diğer TİC ilave oranlarına göre (%0, %1 %5) hem mekanik özellikler açısından hem de darbe direnci açısından daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür.

Reçine içerisine ağırlıkça yüzde olarak ilave edilen TİC partiküllerinin homojen olarak dağılması ve topaklanma olayının minimum orana düşmesi için mekanik karıştırıcı yerine ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılma işleminin yapılması daha iyi sonuçlar elde edilebilir.



KAYNAKLAR

- Ali, M., (2016). Synthesis & Characterization of Epoxy Matrix Composites Reinforced with Various Ratios of TiC, *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 10 (4), 231-237.
- Anonim (2019a). <http://www.figes.com.tr/ansys/explicit-dynamics.php/> (Son erişim tarihi: 14.08.2019)
- Balasubramanian, M. (2013). Composite Materials & Processing (C. 19). *CRC Press/Taylor & Francis Group, LLC*.
- Bandaru, A. K., Chavan, V. V., Ahmad, S., Alagirusamy, R. & Bhatnagar, N. (2016). Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors. *International Journal of Impact Engineering*, 89, 1–13. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2015.10.014.
- Bandaru, A. K., Chavan, V. V., Ahmad, S., Alagirusamy, R. & Bhatnagar, N. (2016b). Low velocity impact response of 2D & 3D Kevlar/polypropylene composites. *International Journal of Impact Engineering*, 93, 136–143. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.09.066.
- Berk, B., Karakuzu, R., İçten, B.M., Arıkan, V., Arman, Y., Ataş, C., Gören, A., (2016). An experimental & numerical investigation on low velocity impact behavior of composite plates. *Journal of Composite Materials*, 50 (25), 3551-3559. doi: org/10.1177/0021998315622805
- Bittmann, B., Hauptert, F. Schlarb, A.K., (2009). Ultrasonic dispersion of inorganic nanoparticles in epoxy resin, *Ultrasonic Sonochemistry*, 16, 622-628.
- Campbell, F. (2010). Structural Composite Materials. *ASM International. ASM international*.
- Doğan. A., (2014). *Farklı Çevresel Koşullara Maruz Kompozitlerin Mekanik Davranışları*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ferreira, J.A.M., Reis, P.N.B., Costa, J.D.M., Richardson, M.O.W., (2012). Fatigue behaviour of Kevlar composites with nanoclay-filled epoxy resin, *Journal of Composite Materials*, 47 (15), 1885-1895. doi: org/10.1177/0021998312452024.
- Fu, S. Y., Feng, X. Q., Lauke, B. & Mai, Y. W. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion & particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(6), 933–961. doi: org/10.1016/j.compositesb.2008.01.002.

- Grujicic, M., Pandurangan, B., Koudela, K.L., Cheeseman, B.A., (2006). A computational analysis of the ballistic performance of light-weight hybrid composite armors. *Elsevier Applied Surface Science*, 253, 730-745. doi: org/10.1016/j.apsusc.2006.01.016
- Hosur, M.V., Abdullah, M., & Jeelani, S. (2005). Studies on the low-velocity impact response of woven hybrid composites. *Composite Structures*, 67, 253–262. doi: 10.1016/j.compstruct.2004.07.024.
- Kavitha, N., Balasubramanian, M., Kennedy, A.X., (2012). Investigation of impact behavior of epoxy reinforced with nanometer- & micrometer-sized silicon carbide particles. *Journal of Composite Materials*, 47(15), 1877-1884. doi: org/10.1177/0021998312451920.
- Kumar, S., Gupta, D.S., Singh, I., Sharma, A., (2010). Behavior of Kevlar / Epoxy Composite Plates Under Ballistic Impact. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 29(13), 2048-2064. doi: org/10.16984/taufbilder.403987.
- Mark, E.J., (1999). Polymer Data Handbook. *Oxford University Prss, 2st edition, 1102, Oxford.*
- Malek A., (2016). Synthesis & Characterization of Epoxy Matrix Composites Reinforced with Various Ratios of TiC. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering, University of Tabuk* 10(4), 231-237, 2016, Saudi Arabia
- Metin, M., (2008). *E-Cami/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Hasarının Burkulma Özelliklerine Etkisi*.Yüksek Lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mili, F. & Necib, B., (2001). Impact Behaviour of Cross-Ply Laminated Composite Plates Under Low Velocities. *Composite Structures*, 51, 273-244. doi: org/10.016/S0263-8223(00)00134-3
- Özer, H., Öz, Ö., (2014). A Compaqrative Evaluation of Numerical & Analytical Solutions to the Biadheseive Single-Lap Joint. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, 16. doi: org/10.1155/2014/852872.
- Özer, M., (2018). *Vakum Destekli El Yaturma Yöntemi İle Üretilen Fe₂O₃ Nano Parçacık İlaveli Tabakalı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*.Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Nakamura, Y., Yamaguchi, M., Okubo, M., Matsumoto, T., (1991). Effect of particle size on impact properties of epoxy resin filled with angular shaped silica particles. *Polymer*, 32, 16, 2976-2979. doi:org/10.1016/0032-3861(91)90195-O.

- Park, R., & Jang, J. (2001) Impact Behavior of Aramid Fiber/Glass Fiber Hybrid Composites: Effect of stacking sequences. *Polymer Composites*, 22 (1): 80-89. doi: org/10.1002/pc.10519.
- Sayer, M., (2009). *Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi*. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sierakowski, R. L., & Chaturvedi, S. K. (1997). *Dynamic loading & characterization of fiber-reinforced composites*. John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 252 s.
- Soy, U., (2009). Kompozit Malzemeler. *Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi*, 1. Baskı, 11, Sakarya.
- Sudheer, M., Prabhu, R., Raju, K., Bhat, T., (2014). *Effect of Filler Content on the Performance of Epoxy/PTW Composites*. *Advances in Materials Science & Engineering*, 970468, 11 s.
- Usal, M. M. A., (2016). *Rijit Cismin Çarpma Etkisine Maruz Kalan & Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Kompozit Yapıların Sonlu Elemanlarla Analizi*. Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü.
- Valenc, A, S. L., Griza, S., De Oliveira, V. G., Sussuchi, E. M. & De Cunha, F. G. C. (2015). Evaluation of the mechanical behavior of epoxy composite reinforced with Kevlar plain fabric & glass/Kevlar hybrid fabric. *Composites Part B: Engineering*, 70, 1–8. doi: org/10.1016/j.compositesb.2014.09.040.
- Vasconcelos, P. V., Lino, F.J., Magalhaes, A., Neto, R.J.L., (2005). Impact fracture study of epoxy-based composites with aluminium particles & milled fibres. *Journal of Materials Processing Technology*, 170, 277-283. doi: org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.006.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa TAŞLIDERE
Doğum Yeri ve Yılı : Isparta, 1988
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mustafa8801@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Isparta Gazi Lisesi, 2005
Önlisans : SDÜ, Senirkent MYO, Makine-Resim-Konstrüksiyon, 2007
Lisans : SDÜ, Teknik Eğitim Fakültesi, Tasarım ve Konst. Öğrt., 2013
Lisans : SDÜ, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh., 2017

Mesleki Deneyim

TSMC Composite Works A.Ş.	2007-2010	CNC Operatörü
Ankara Yapı Ltd. Şti.	2010-2011	Teknik Ressam
Dilmer Makine	2018-2019	Üretim Mühendisi
Fipol Deniz Araçları A.Ş.	2019-devam	Tasarım Mühendisi