



**TRAKTÖR ÜST KORUYUCU YAPILARDA
POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT
KULLANIMININ İNCELENMESİ**

İBRAHİM POLAT

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doc. Dr. Bahar UYMAZ
2022**

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

TRAKTÖR ÜST KORUYUCU YAPILARDA
POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT KULLANIMININ İNCELENMESİ

İBRAHİM POLAT

ORCID: 0000-0002-9259-9203

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Doc. Dr. Bahar UYMAZ

Haziran-2022

Her hakkı saklıdır.

ÖZET

TRAKTÖR ÜST KORUYUCU YAPILARDA POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT KULLANIMININ İNCELENMESİ

İbrahim POLAT

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Bahar UYMAZ

Bu araştırmada SMC Kompozit malzemelerin günümüz traktörlerinde üst koruyucu yapı (FOPS) olarak metal malzemelerin yerine kullanılabilirliği araştırıldı. Üst koruyucu malzeme olarak SMC-R25 kompozit malzemesi seçildi. Üst koruyucu testi olarak OECD code 10 standardı kullanıldı. Bu test hem fiziksel hem de sayısal yöntem ile gerçekleştirildi. Fiziksel test, Hattat 3000 serisi traktörün SMC-R25 malzemedan yapılan FOPS'unuzerinde gerçekleştirildi. Sayısal yöntem çözümü için bir explicit çözücü olan radios kullanıldı. Çözüm algoritması için radios içinde bulunan Tsai-Wu hasar kriterine ve Chang-Chang uygun çalışan Law 25 malzeme kartı seçildi. Malzeme sınır değerlerini belirlemek için Hattat 3000 serisi traktörün FOPS üretim bantından DIN EN ISO 527-4 'e göre 0°, 90° ve 45° numunelere yapılan çekme ve basma testi yapıldı. Elde edilen sınır koşullar doğrultusunda yapılan sayısal çözüm ile fiziki test karşılaştırıldığında çözümün örtüştüğü gözlemlendi. SMC-R25 malzemesinin OECD kod 10 testini geçme bilmesi için min. 14mm kalınlığa sahip olması gerektiği tespit edildi. Bu sayısal çözüm aynı geometriye sahip SMC 65 kompozit-S235JR (St37-2) metal malzemesi üzerinde de gerçekleştirildi ve SMC-R65 malzemesi, traktörlerin FOPS yapıları için düşük alaşımlı çeliklere alternatif olabileceği kararı verildi.

Anahtar Kelimeler: SMC, FOPS, Tsai-Wu, Radioss, Law 25

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE USE OF POLYMER MATRIX COMPOSITES IN TRACTOR FALLING OBJECT PROTECTIVE STRUCTURES

İbrahim POLAT

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bahar UYMAZ

In this research, the usability of SMC Composite materials as a falling object protective (FOPS) structure in today's tractors instead of metal materials was investigated. SMC-R25 composite material was chosen as FOPS. OECD code 10 standard was used as falling object protective test. This test was carried out with both physical and numerical methods. The physical test was carried out on the FOPS of Hattat 3000 series tractor made of SMC-R25 material. Radioss, an explicit solver, was used for the numerical method solution. For the solution algorithm, the Law 25 material card, which works in accordance with the Tsai-Wu and Chang-Chang damage criterions in the radioss, was selected. In order to determine the material limit values, tensile and compression tests were performed on 0°, 90° and 45 ° samples according to DIN EN ISO 527-4, from the FOPS production side of Hattat 3000 series tractor. When the numerical solution made in line with the obtained boundary conditions was compared with the physical test, it was observed that the solution matched. It was determined that SMC-R25 should have a min 14mm thickness to pass OECD code 10 standarts. This numerical solution was also performed on the SMC-R65 composite- S235JR (St37-2) metal material with the same geometry and it was decided that the SMC-R65 material could be an alternative to low alloy steels for FOPS structures of tractors.

Keywords: SMC, FOPS, Tsai-Wu, Radioss, Law 25

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
SİMGELER dizini.....	ix
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti	2
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	11
2. MATERYAL VE YÖNTEM	12
2.1. SMC Üretim Yöntemi	12
2.2. SMC-R25 İçin Yapılan Malzeme Testleri ve Test Sonuçları.....	21
2.3. SMC-R65 İçin Yapılan Malzeme Testleri ve Test Sonuçları.....	32
2.4. Düşen Cisimlere Karşı Üst Koruyucu Yapı (FOPS) Testi	34
2.5. Radioss Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Açık Çözüm	40
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	56
3.1. FOPS Testi.....	56
3.2. SMC-R25 İçin Radioss ile Çarpma Simülasyonu	57
3.3. SMC-R65 İçin Radioss ile Çarpma Simülasyonu	64
3.4. S235JR (St 37-2) İçin Radioss ile Çarpma Simülasyonu	66
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR.....	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. TS EN ISO 527-4'e Göre Deney Numune Ölçüleri	23
Çizelge 2.2. Çekme Numunelerine Göre Sertleşme Katsayıları	30
Çizelge 2.3. SMC R25 – SMC R65 Gerinim Oran Sonuçları.....	30
Çizelge 2.4. SMC R25 Malzeme Test Sonuçları	31
Çizelge 2.5. SMC R65 Malzeme Test Sonuçları	33
Çizelge 2.6. Explicit ve Implicit Çözümlerin Artı ve Eksi Yönleri	42



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. FOPS mimarisi	3
Şekil 1.4. Simüle edilmiş mekanik olayla ilişkili şema	6
Şekil 1.5. Traktör kabin iskeletinin kesiti	7
Şekil 1.6. Statik testler sırasında kompozit çatının bükülmesi	8
Şekil 1.7. PCM çatısının kalınlık ile deplasman arasındaki ilişki	8
Şekil 1.8. Koruyucu yapıya monte edilmiş PE çatı [gri] ve DLV [beyaz]	9
Şekil 1.9. Testten sonra PE çatı: Daireler çarpma noktasını gösterir	9
Şekil 1.10. FOPS için Sonlu eleman modeli	10
Şekil 1.11. FOPS testi sonrası Deformasyon	10
Şekil 1.12. Belirlenen kontrol noktalarının deformasyon miktarlarının simülasyon ve gerçek test karşılaştırmaları	11
Şekil 1.13. Deformasyon açısından a) Gerçek test sonucu, b) Simülasyon sonucu	11
Şekil 2.1. Otomotivde uygulanan çeşitli SMC uygulamaları.....	13
Şekil 2.2. GF-SMC ve CF-SMC'nin hibrit olarak uygulanması. 2003 Doge viper kapı.....	13
Şekil 2.3. Yangın geciktirici ve düşük duman özeliğine sahip SMC tren Koltukları	14
Şekil 2.4. Yarı bitmiş SMC levhalarının sıkıştırılarak kalıplanmasından kaynaklanan elyaf oryantasyonu (a) ve kabuk-çekirdek etkisi (b)	16
Şekil 2.5. SMC Pestil üretim hattı.....	17
Şekil 2.6. SMC Kalıplama hattı	18
Şekil 2.7. SMC CNC Delik delme operasyonu	19
Şekil 2.8. Boyanmış SMC malzemeden yapılmış otomotiv parçası	19
Şekil 2.9. Yaygın biçimde kullanılan SMC tipleri a)SMC-R b)SMC C-R c)SMC X	20
Şekil 2.10. ZWICK/ Roel Z050 test cihazı	22
Şekil 2.11. Zwick Z250 universal test cihazı	23
Şekil 2.12. TS EN ISO 527-4'e göre deney numune sembolleri	23
Şekil 2.13. SMC-R25'den 0°'de kesilen numunelerin çekme test sonuçları	24
Şekil 2.14. SMC-R25'den 0°'de kesilen numunelerin basma test sonuçları	25

Şekil 2.15. SMC-R25'den 90°'de kesilen numunelerin çekme test sonuçları	25
Şekil 2.16. SMC-R25'den 90°'de kesilen numunelerin basma test sonuçları	26
Şekil 2.17. SMC-R25'den 45°'de kesilen numunelerin çekme test sonuçları	26
Şekil 2.18. SMC-R25'den 45°'de kesilen numunelerin basma test sonuçları	27
Şekil 2.19. Plastik işin şematik gösterimi	27
Şekil 2.20. Sertleşme katsayıları ile logaritmik gerilme ve gerinme eğrisi.....	28
Şekil 2.21. SMC-R25 0°'den kesilen 5 adet numune için logaritmik gerilme-gerinme grafiği	29
Şekil 2.22.SMC-R25 90°'den kesilen 5 adet numune için logaritmik gerilme-gerinme grafiği	29
Şekil 2.23. SMC-R65'den 0°'de kesilen numune çekme test sonucu.....	32
Şekil 2.24.SMC R65'den 0°'de kesilen 1 adet numune için logaritmik gerilme-gerinme grafiği	33
Şekil 2.25. FOPS testinde kullanılacak olan Hattat C 3065 traktör	35
Şekil 2.26. FOPS testinde kullanılacak olan Hattat C 3065 traktör	36
Şekil 2.27. OECD code 10'a göre FOPS testi.....	36
Şekil 2.28. Hyperworks programı ile analiz yapılacak 3D modelin genel görünüşü.....	37
Şekil 2.29. FOPS ve çelik güllenin mesh yapısı	38
Şekil 2.30. FOPS'un mesnet noktaları	38
Şekil 2.31. Çelik Güllenin çarpma hızı (mm/sn).....	39
Şekil 2.32. S235JR(ST 37) için gerilim-gerinim eğrisi.....	39
Şekil 2.33. Kapalı veya açık çözüm için seçim şeması	41
Şekil 2.34. Sayısal yöntem seçimi ile hız değişiminin analiz çözücüsüne etkisi	42
Şekil 2.35. Açık çözümde zamana göre işlem	43
Şekil 2.36. 1 yönünde çekme ve basma gerilmeleri.....	46
Şekil 2.37. 2 yönünde çekme ve basma gerilmeleri.....	47
Şekil 2.38. 1-2 düzleminde kayma gerilmeleri	48
Şekil 2.39. 1-2 düzleminde kayma gerilmeleri çekme testi	48
Şekil 2.40. Tsai-Wu akma gerilimi sınır eğrileri.....	49

Şekil 2.41. $F(\sigma)=1$ için Tsai-Wu akma yüzeyinin kesitleri	50
Şekil 2.42. İzotropik plastisite sertleşmesi	50
Şekil 2.43. Kırılma Oryantasyonu	52
Şekil 2.44. Sertleşme durumunda gerinim oran etkisi	53
Şekil 3.1. OECD kod 10 testinde çelik güllenin SMC-R25 malzemesi ile çarpışma anı.....	56
Şekil 3.2. OECD kod 10 testinde, SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'ta oluşan deformasyonlar.....	57
Şekil 3.3. Tsai-Wu hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (gülle ile Deplasman) (mm).....	58
Şekil 3.4. Tsai-Wu hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (gülsüz ile Deplasman) (mm)	58
Şekil 3.5. Tsai-Wu hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (Plastik iş)(J/mm ³).....	59
Şekil 3.6. Chang-Chang hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesi sahip FOPS'un simülasyon sonucu	59
Şekil 3.7. Tsai-Wu hasar kriterine göre 7 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS' un simülasyon sonucu (Deplasman)(mm).....	60
Şekil 3.8. Tsai-Wu hasar kriterine göre 7 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS 'un simülasyon sonucu (Plastik iş)(J/mm ³).....	61
Şekil 3.9. Chang-Chang hasar kriterine göre 7 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS 'un simülasyon sonucu	61
Şekil 3.10. Tsai-Wu hasar kriterine göre 14 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (Deplasman)(mm).....	62
Şekil 3.11. Tsai-Wu hasar kriterine göre 14 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (Plastik iş)(J/mm ³).....	63
Şekil 3.12. Chang-Chang hasar kriterine göre 14 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu	63
Şekil 3.13. Tsai-Wu hasar kriterine göre 3,56 mm kalınlığındaki SMC-R65 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (Deplasman) (mm)	64
Şekil 3.14. Tsai-Wu hasar kriterine göre 3,56 mm kalınlığındaki SMC-R65 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (Plastik iş)(J/mm ³)	65
Şekil 3.15. Chang-Chang hasar kriterine göre 3,56 mm kalınlığındaki SMC-R65 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu	65

Şekil 3.16. M36_PLAS_TAB hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki S235JR malzemesine sahip FOPS simülasyon sonucu (deplasman, gülle ile) (Deplasman)(mm) 66

Şekil 3.17. M36_PLAS_TAB hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki S235JR malzemesine sahip FOPS simülasyon sonucu (deplasman, güllersiz)(Deplasman)(mm)..... 67

Şekil 3.18. M36_PLAS_TAB hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki S235JR malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (Gerilme)(MPa) 67



SİMGELER DİZİNİ

H	Yükseklik
p	Enerji
m	Kütle
g	Yerçekimi ivmesi
v_{impact}	Çarpma hızı
ρ	Yoğunluk
E_{11}	1 yönündeki elastisite modülü
E_{22}	2 yönündeki elastisite modülü
ν_{12}	Majör poison oranı
G_{12}	12 yönünde kayma modülü
G_{23}	23 yönünde kayma Modülü
G_{31}	31 yönünde kayma Modülü
$W_{p\text{max}}$	Maksimum plastik iş
σ_{1y}^t	1 Yönündeki çeki değeri
σ_{2y}^t	2 Yönündeki çeki değeri
σ_{1y}^c	1 Yönündeki bası değeri
σ_{2y}^c	2 Yönündeki bası değeri
σ_{12y}^t	12 Yönündeki çeki değeri
σ_{12}^c	2 Yönündeki bası değeri
τ_{12}	Kayma değeri
σ_1^t	1 yönündeki çekme gerilimi
σ_1^c	1 yönündeki basma gerilimi
σ_{12}^t	12 yönündeki çekme gerilimi
σ_{12}^c	12 yönündeki basma gerilimi
σ_2^t	2 yönündeki çekme gerilimi
σ_2^c	2 yönündeki basma gerilimi
$\dot{\epsilon}_0$	Referans gerinim oranı
b	Plastik sertleştirme parametresi
n	Plastik sertleştirme üssü
c	Plastik iş kriterleri için gerinim oranı katsayısı.

α	Tsai-Wu kriterinde F_{12} katsayısı hesaplaması için indirgeme faktörü.
f_{\max}	Tsai-Wu kriter limitinin maksimum değeri.
ε_t	Hasar durumundaki gerinim değeri
γ_{ini}	Delaminasyon başladığında düzlem dışı kayma gerilmesi
γ_{\max}	Delaminasyon sona erdiğinde ve eleman silindiğinde düzlem dışı kayma gerilmesi
ε_{mi}	Elemandaki gerilimin sıfıra ayarlandığı i yönündeki maksimum gerinim değeri
t	Zaman
t_r	Gevşemenin başladığı zaman
T	Dinamik gevşeme zamanı
β	Kesme ölçekleme faktörü
l	Uzunluk
f_{ext}	Dış kuvvet
f_{int}	İç kuvvet
$f_{\text{hourglass}}$	Kum saati kuvveti

KISALTMALAR DİZİNİ

FOPS	Düşen Cisimlere Karşı Üst Koruyucu Yapı (Falling Object Protective Structure)
ROPS	Yuvarlanmaya Karşı Koruyucu Yapı (Rolling Object Protective Structure)
SIP	Koltuk indeks Noktası (Seat Index Point)
DLV	Sapma- Sınır Hacmi (Deflection-Limiting Volume)
SMC	Sac Kalıplama Bileşiği (Sheet Moulding Compound)
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
OECD	Ekonomik İş birliği ve Kalkınma Örgütü (Organisation for Economic Co-operation and Development)

1. GİRİŞ

Tarih boyunca insanlar temel ihtiyaçların tarım ve ormancılık ile karşılamaktadır. 18.yy'da James Watt'ın icat ettiği pistonlu buhar makinesi ile ilkel aletlerin kullanıldığı tarım ve ormancılık sektörü makineleşmeye başlamıştır. Traktörlerin ilk öncüsü lokomotifler olsa da içten yanmalı motoru olan ilk traktör 1982 yılında John Froehlich tarafından yapılmıştır. Mekanizasyon artıka tarım ve ormancılıktaki iş kazaları artış göstermiştir. Avrupa Birliği ülkelerinde yaşanan iş kazaları en fazla inşaat sektöründe, ikinci olarak ise tarım ve ormancılık sektöründe görülmektedir. Bu ülkelerde tarım çalışanlarının %1,2'sinde iş kazaları nedeniyle sürekli iş göremez hale gelmekte, %3,2'sinde ise meslek hastalıkları şeklinde görülmektedir [1].

Tarım ve ormancılık sektöründe yaşanan kazaların içerisinde traktör ile yapılan kazaların payı oldukça büyüktür. Amerika'da yapılan araştırmalar tarımda yaşanan kazaların %75'inin traktörden kaynaklandığını ve traktör kazalarının tarımdaki ölümcül kazaların 1/3'ünü oluşturduğunu ortaya koymuştur [2]. Traktörler ile yapılan kazaların yarısından fazlası traktörlerin devrilmesi sonucu oluşur. Arazi şartları, toprağın yapısı, operatörün kabiliyeti traktörün devrilme kazasının gerçekleşme nedenleridir. Düşen cisimler nedeniyle oluşan kazalar ise genellikle ormancılık faaliyetlerinde gözlemlenir. 1980'lere kadar üretilen traktörlerde herhangi bir koruyucu yapı olmaması kazaların daha ölümcül olmasına sebep olmuştur.

Ülkemizde her yıl özellikle tarımda traktör kullanımının yoğun olduğu bölgelerde traktör ve traktör ekipmanlarının sebep olduğu ölümcül ya da ağır yaralanmayla sonuçlanan kazalar olmaktadır. Türkiye ölçeğinde 880 traktör ve 1167 tarım makinesi kazasının analizleri yapılmıştır. Bu kazalara ilişkin veriler anket yöntemiyle elde edilmiştir. Kaza başına 1,54 kişinin düştüğü kazaların ayrıntılı incelemeleri sonucunda, traktör kazalarının %44'ünün köy yolunda, %33'ünün öğleden sonra, %59'unun devrilme, takla atma ya da şarampole uçma şeklinde gerçekleştiği; kazazedelerin %91'inin erkek, %69'unun 11-40 yaş grubunda olduğu, %40'mın herhangi bir sürücü belgesi olmadığı, %29'unun öldüğü, %71'inin aynı makineyi daha sonra tedirgin kullandığı, %80'inin makinenin kullanma bakım kitabını okumadığı, kazaya karışan traktörlerin %82'sinde kabin ya da koruyucu çatı olmadığı, traktör kazalarının sadece %18'inin hasarsız atlatıldığı, kazaların çoğunun toprak zeminlerde (%60), eğimli yerlerde (%60) ve kuru zeminlerde (%80) gerçekleştiği gibi sonuçlara ulaşılmıştır. Kazaya karışan kabin ya da emniyet çatısı olmayan traktörlerde, kazaya karışanların %77'si kazadan

bir şekilde (ölüm, ağır ya da hafif yaralanma ve kısmen ya da tamamen fiziksel engelli) etkilenmekte, kabinsiz, koruyucu çatı olan traktörlerde ise kazaya karışanların %40'ı etkilenmemekte ve ölüm oranları ise sırasıyla %34 ve %10 değerlerini almaktadır. Kazaların %83'ünün insandan, %10'unun çevre koşullarından ve %7'sinin makinadan kaynaklandığı belirlenmiştir. Kazaların nedenleri arasında ilk sırayı operatörün dikkatsizliği (%25) almıştır. Bunu sırasıyla trafik kurallarına uyulmaması (%14), operatörün kullanılan traktörle ilgili deneyim eksikliği (%10) gibi nedenler izlemiştir. Ülkemizde efektif ömrü dolan, üzerinde herhangi bir koruyucu yapı olmayan veya koruyucu yapı olup operatörün herhangi bir nedenden bu koruyucu yapıyı çıkarmasından dolayı kazaların şiddeti artmaktadır[3].

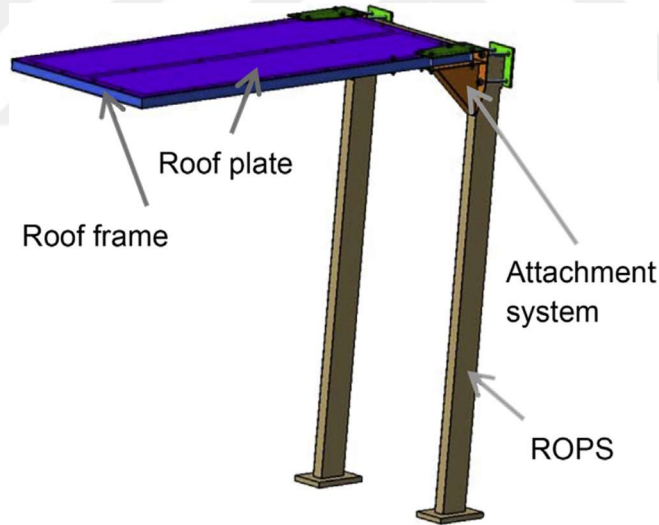
Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Teşkilatı (OECD) tarım ve ormancılık sektöründe oluşan kazaların azaltmak için, traktörlere yuvarlanmaya karşı koruyucu yapı (ROPS), emniyet kemeri, düşen cisimlere karşı koruyucu yapı (FOPS) gibi emniyet ekipmanlarını zorunlu hale getirmiştir. Zorunluluk getirilen bu yapılara, akredite onayına sahip kuruluşlar tarafından testler yapılarak onay verilmektedir. Bu çalışmada incelen düşen Nesnelere karşı Koruyucu Yapı (FOPS) bir kaza anında traktör sürücüsünü koruyan en önemli parçalardan biridir. Bu yapı OECD Kod 10 standartlarına göre test edilir[4].

Günümüz dünyasında FOPS olarak düşük alaşımli çelik malzemeler kullanılmaktadır. Ancak düşük alaşımli çelik malzemelerin korozyon dayanımının iyi olmaması, çelik malzemedan yapılan FOPS'un korozyon vasıtasıyla zamanla aşınıp koruma özeliğini kaybetmesine neden olmaktadır. Korozyon dayanımı yüksek olan kompozit malzemelerin, SMC teknolojisinin gelişmesi ile kompozit parça imalatında, seri ve otomasyon üretimine imkân vermesi, otomotiv ve traktör sektöründe çelik malzemeler için alternatif malzeme olarak kullanılmasına sebep olmuştur. Bu çalışmada SMC üretimi ile oluşturulan kompozit FOPS'un düşük alaşımli çelik malzemelerin yerine kullanımı incelenmektedir. Yapılan deneysel FOPS testi ile sayısal yöntem ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır.

1.1. Literatür Özeti

Avrupa birliği ülkelerinde traktör FOPS'un öneminin artmasıyla birlikte, FOPS ile gelen regülasyonlardan önce satılan, üzerinde herhangi bir koruyucu yapı ve koruyucu çerçeve olmayan traktörlere de koruyucu yapı eklenmesi ihtiyacı doğmuştur. Ancak tek bir traktör için üretilen bir koruyucu yapının teste tabi tutularak onay alınması ve bu onay sonucunda tekrar üretilmesi maliyetli bir iş olarak görülmüştür. Bu sorunları gidermek için

L.Al-Bassit, N. Tricot, S.Sayegh [5], Fransa devletinin desteği ile üzerinde herhangi bir koruyucu yapı olmayan traktörler için düşen cisimlere karşı uygun nasıl bir üst yapı tasarlanacağını anlatan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. FOPS tasarlanacak traktörde bir yuvarlanmaya karşı koruyucu yapısı (ROPS) var ise bu yapı değiştirilmeden FOPS'un ROPS'a eklenmesi gerektiği ve eklenecek FOPS'un operatörün görüş ve çalışma alanını olumsuz etkilememesi gerektiğinden bahsedilmiştir. Çalışmalar sonucunda Şekil 1.1'deki tasarıma ulaşmışlardır. Yeterlilik şartları için OECD kod 10 şartlarından yararlanılmıştır. Üst koruyucu malzemesi olarak çelik sac ve polikarbon seçmiş olsalar bile OECD kod 10 testini bir adet sac levha üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Değişik kalınlıktaki sac levha ve polikarbon malzeme için LS-Dyna analiz programını kullanmışlardır. Sistem için matematiksel model geliştirilmiş olup FOPS güvenliği için malzeme ve malzeme kalınlığının yanı sıra, çatının üzerine sabitlediği iskeletin öneminde de bahsedilmiştir. Elde ettikleri bulgulardan yuvarlanmaya karşı koruyucu yapıya sahip ancak FOPS'u olmayan traktörler için bilgisayar yazılımları kullanılarak, OECD kod 10 testinden geçebilecek tasarımlar edilebileceği kanaatine varmışlardır.



Şekil 1.1. FOPS mimarisi [5]

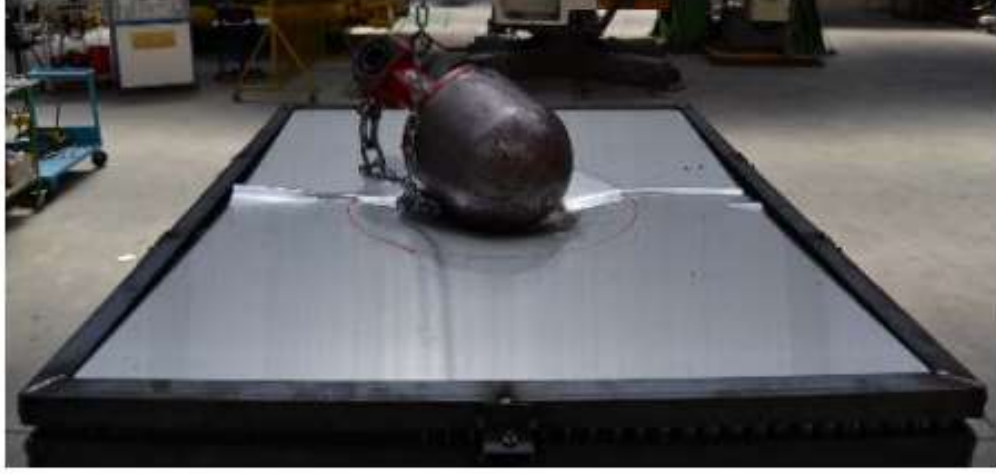
Cavallo ve Facello [6]'ın yaptığı araştırmada SMC ve PE'nin metale göre olumlu olan yönlerinin üstün dayanım-ağırlık ve sertlik-ağırlık oranları, tasarım esnekliği, gürültü ve titreşim sönümlenmesi, iyi yüzey kalitesi olmasından dolayı değişik sıcaklıklarda SMC ve PE'den yapılan FOPS'a düşen cisim testi uygulamışlardır. Bu testler 10 ile 20°C ve -14 ile -18 °C arasında gerçekleştirilmişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda PE'nin çok elastik yapıya sahip olmasından dolayı, kürenin çarpması ile elastik çatının deformasyonu sonucu kürenin

güvenlik bölgesine girdiğini gözlemlemişlerdir. Düşük sıcaklıklarda ise iki malzemeden yapılan koruyucu yapılar kırılmalık özellikleri göstermişlerdir. SMC'den yapılan koruyucu yapılar ise tüm sıcaklıklarda darbe sonucunda çatlamıştır. Araştırmacılar oluşan çatlama ve kırılmalıkları önlemek için koruyucu yapıyı metaller ile takviye ederek testi tekrar etmişlerdir. Çıkan olumlu bulgular sonucunda SMC ve PE' in otomotiv endüstrisinde koruyucu yapılar için metallere alternatif bir malzeme olduğuna karar vermişlerdir.

Bonanno ve ark.[7] hafriyat makinelerinde üst koruyucu yapı (FOPS) olarak alüminyum bal peteği sandviç malzemenin kullanılmasını incelemişlerdir. Standartlar iş makineleri için düşen cisimlerin enerjisini 11600 J olarak belirlemiştir. Araç ağırlığını düşürmek ve özellikle düşen cismin enerjisini sönmölemek için araştırmacılar test edilen numuneleri, poliüretan reçine çekirdek ve deri arasında bağ sağlayan, kalınlığı 80 mm olan AA3003 alüminyum alaşımından yapılmış 19 mm çapında altıgen hücrelere sahip ticari alüminyum bal peteği sandviç seçmişlerdir. Bu sandviç kompozit bileşik kullanarak araştırmacılar, kabin iskelet yapısı üzerine FOPS oluşturmuşlardır. Şekil 1.2'deki iskelet sistemi üzerinde seviye-I ve seviye-II testlerini ayrı ayrı gerçekleştirmişlerdir. Test sonucunda FOPS üzerinde oluşan deformasyon Şekil 1.3'deki gibidir. Yapılan testler sonucunda bal peteği yapılı alüminyum FOPS'un sönmöleme özeliği nedeniyle, FOPS'larda alternatif bir malzeme olarak kullanılabilceği kararına varmışlardır.



Şekil 1.2. Koruyucu iskelet üzerindeki darbe etkisi [7]



Şekil 1.3. Bal peteği FOPS üzerindeki darbe etkisi [7]

Dumitrache ve Goanță [8]'ın yaptıkları çalışmada ağır iş makineleri için yapılan testlerin pahalı ve teste uğrayan yapı üzerinde testin tekrarlanabilir olmamasından dolayı FOPS testlerinde sayısal yöntemlerin kullanımına değinmişlerdir. Mekanik yapılara şok yüklemesini ve bu yapıların şok sırasında ve sonrasındaki davranışlarını mekanik bir olay olarak değerlendirmişlerdir. Bu değerlendirme kapsamında FOPS testi gibi şok yüklemeler için MES tekniğinin kullanılmasını gerektiğini savunmuşlardır. Araştırmada bahsedilen bu mekanik olay Newton'un ikinci hareket kanununu Hooke kanunu ile birleşimine ve enerji sönümleyen etkilerin dikkate alınmasına dayanır.

$$[M]\{a\} + [K]\{d\} + [C]\{v\} = 0 \quad (1.1)$$

Denklem (1.1) sönümsüz serbest titreşim hareketini temsil etmektedir burada a ivme, d deplasman, v hız olup m kütle, k yay sabiti ve sönümlenme sabitini göstermektedir. Bu denklemde kuvveti çıkardıklarını ve kuvvetin simülasyonun girdisi değil çıktısı olduğunu söylemektedirler. Ayrıca incelemede yapılacak simülasyonun doğruluğu için geometrinin, testi yansıtabilecek en sade 3D modele sahip olması, seçilen sonlu elmanın tasarlanan 3D modele ve teste uygun olması, malzeme tanımlarının ve simülasyon parametrelerinin doğru yapılmasının gerektiğini belirtmişlerdir. Düşen cisim testi için hız, yükseklik ve zaman eşitlikleri elde ederek Şekil 1.4' deki vaka üzerinde simülasyon gerçekleştirmişlerdir.

Potansiyel enerji formülünde güllenin serbest bırakılma yüksekliği:

$$H = \frac{P}{m \cdot g} \quad (1.2)$$

Test nesnesinin serbest düşmesi için gereken süre:

$$t_f = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{2P}{m}} \quad (1.3)$$

Etki oluşma anında test nesnesinin hızı:

$$v_{impact} = \sqrt{\frac{2P}{m}} \quad (1.4)$$

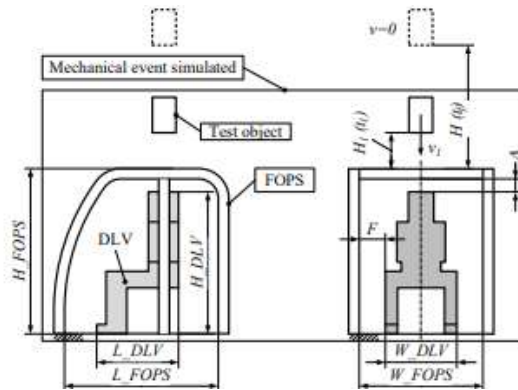
Simüle edilen mekanik olay için iki yaklaşım sunmuşlardır.

1- Yükseklik değeri hız ve zaman formüllerinde yerine konulur.

$$fv_1 = \sqrt{\frac{2P}{m} - 2gH_1}; \quad t_1 = \frac{1}{g} \left(\sqrt{\frac{2P}{m}} - \sqrt{\frac{2P}{m} - 2gH_1} \right) \quad (1.5)$$

2- Zaman değeri yükseklik ve hız formüllerinde yerine konulur.

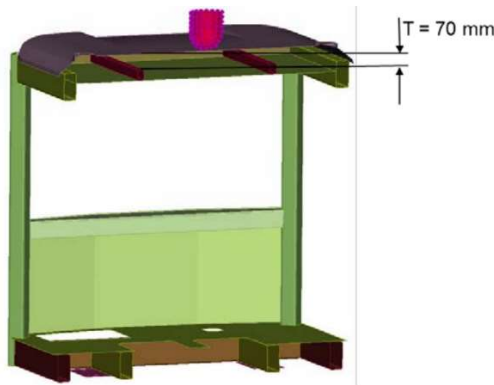
$$v_1 = \sqrt{\frac{2P}{m} - gt_1}; \quad H_1 = t_1 \left(\sqrt{\frac{2P}{m}} - \frac{1}{2}gt_1 \right) \quad (1.6)$$



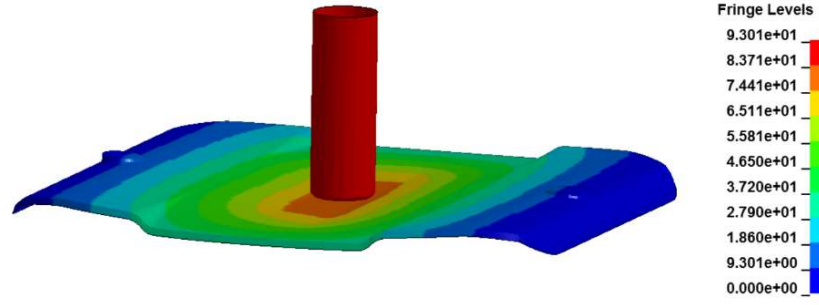
Şekil 1.2. Simüle edilmiş mekanik olayla ilişkili şema [8]

Araştırmacılar daha çok ikinci yaklaşımın uygulanmasını tavsiye etmişlerdir. Bu bağlamda, denklem (1.6)'dan v_1 ve H_1 hesaplanır. Burada H_1 , test nesnesinin platform arasındaki yüksekliğidir. Sonlu elmanlar yöntemi (SEY) platformuna geometri aktarıldıktan sonra, FOPS'a çarpan nesne için başlangıç hızı olarak V_1 uygulanır. Sonuç olarak araştırmacılar düşen cisim testi gibi şok testlerde bir simülasyonun gerçeğe yakın sonuçlar verse de gerçek bir testin yerini tam anlamıyla tutamayacağına ancak maliyeti düşük ve tekrarlanabilirliği gibi olumlu etkilerden dolayı tasarımcıya tasarım esnasında gerçek testi geçmesi için ideal bilgiler vereceği kanaatine varmışlardır.

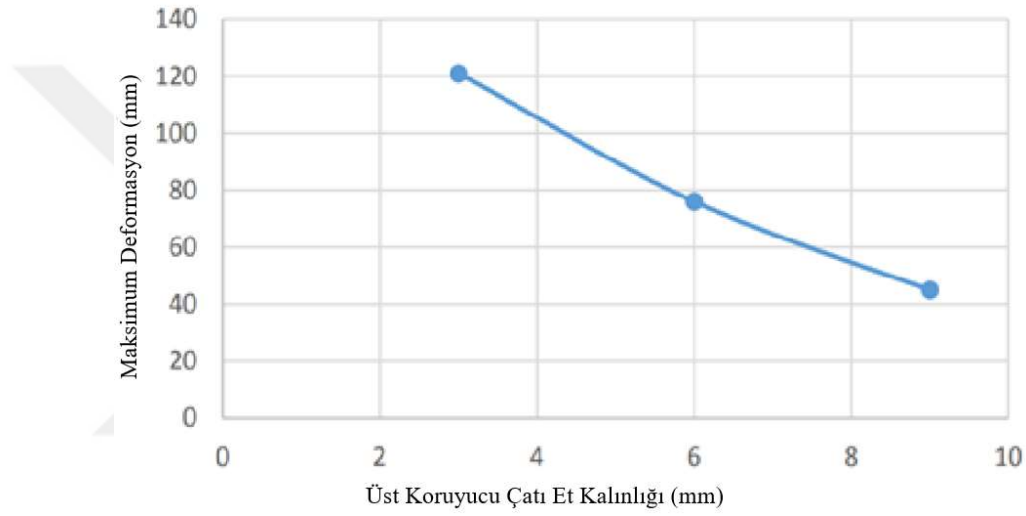
Lebedev ve ark. [9] yaptığı çalışmada bir traktöre monte edilen, Şekil 1.5'de kesiti gösterilen 4 kirişli bir kabinin üzerine takılan ve kaplama için kullanılan plastik yapının, kompozit olarak imal edilerek darbe sönümleme etkisini araştırmışlardır. Kaplama panel için kullanılacak yapının kompozit olarak modellenmesi ve simülasyonu LS-DYNA programı kullanılarak yapılmıştır. LS-DYNA'da malzeme ve hasar modu için MAT22 kartı seçilmiştir. Kapama ile kabinin FOPS'u arasında 70 mm mesafe vardır. Panel kalınlığı 3mm'den 9mm'ye kadar değiştirilerek düşen cisim testi seviye-I ve seviye-II simülasyonları tekrarlanmıştır. Şekil 1.6'da simülasyon deplasman sonucu mm cinsinde gösterilmektedir. Kabinin kompozit paneli testin tüm aşamalarında kırılmıştır, ancak kompozit yapının sönümleme etkisi metal yapıların maruz kaldığı darbeyi ortalama %30 azaltmıştır. Şekil 1.7'de görüldüğü üzere PCM malzemesinin kalınlığının artması ile çarpma esnasındaki oluşan deformasyon azalmıştır. Traktör kabin tavan panelinin, çarpışma testlerinde bir sönümleme uygulayarak, etkileşim anında düşen cisim hızının seviye-I testinde %36, seviye-II testinde %16 azalttığını gözlemlemişlerdir. Buradan, kompozit panellerin düşen bir nesnenin enerjisinin önemli bir miktarını emdiğini bulmuşlardır. Bu değerler özellikle seviye-I testleri için %59 ve seviye-II testleri için %30 civarlarındaydı.



Şekil 1.3. Traktör kabin iskeletinin kesiti [9]



Şekil 1.4. Statik testler sırasında kompozit çatının bükülmesi [9]



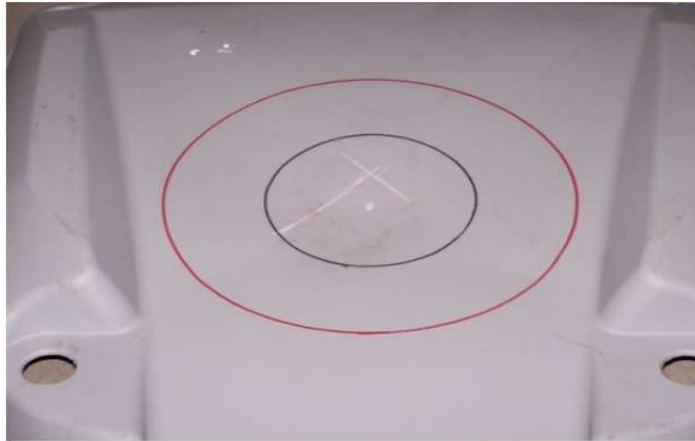
Şekil 1.5. PCM çatısının kalınlık ile deplasman arasındaki ilişki [9]

Antonino Bonanno [10] polietilenin (PE) koruyucu yapı standartlarında metalik malzeme için istenen aynı gereksinimleri karşılama yeteneğini araştırmıştır. Polimerin FOPS için üretim şekli olan döner kalıplama yöntemi ve polimerin kimyasal yapısından da bahsetmiştir. Şekil 1.8 de yandan geometrisi gösterilen ve darbe noktası desteklemeyen ve PE'den üretilen FOPS'a seviye-I ve seviye-II FOPS testi uygulamak istemiştir. Ancak Şekil 1.9 da gösterildiği gibi PE'den üretilen bu koruyucu yapı seviye-I testinde hasara uğramış, Deflection-Limiting Volume (DLV) ile etkileşime girmiştir. Bu nedenle seviye-II FOPS testini yapamamıştır. Döner kalıplama ile üretilen ve herhangi bir metalik donatı olmadan gerçekleştirilen bir PE çatının ISO 3449 gerekliliklerini “neredeyse aşma” yeteneği sunduğunu tespit etmiştir. Araştırmacı koruyucu yapının herhangi bir yapısal bozulma olmaksızın 1365 J darbeye dayanabileceğini, ancak DLV ile temas ettiğini, oluşan hasarın büyüklüğünün fazla olmadığını, polimer yapı içerisine konulacak bir sandviç elaman veya köpük katmanının PE malzemenin seviye-I FOPS testini geçeceğini savunmuştur. Ayrıca

araştırmacı pek çok metalik koruyucu yapının, Charpy'in çentik darbe standart gerekliliklerini tamamen yerine getirmesine rağmen, yapısal okme ve bunun sonucunda DLV'ye girişim yaptığını hatırlatmıştır. Araştırmacı PE kabuğun performansları, ağırlık azaltma, estetik ve kabin alanı optimizasyonu gibi pozitif özelliklerden dolayı FOPS'larda kullanılabileceği belirtmiştir.



Şekil 1.6. Koruyucu yapıya monte edilmiş PE atı [gri] ve DLV [beyaz] [10]



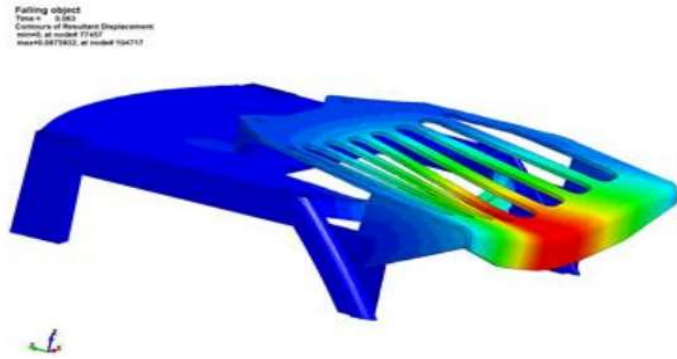
Şekil 1.7. Testten sonra PE atı: Daireler arpma noktasını gösterir [10]

Nazarenko ve ark. [11], AMKODOR holding ve Belarus Ulusal Bilimler Akademisi (UIIP NASB) ile özel makinelerin FOPS tasarımı konusundaki işbirliğinin sonucunda bir makale sunmuşlardır. Tasarım esnasında yapılan katı model ve sayısal analizlerin koruyucu yapı güvenlik testlerinin başarı ile geçmesi hususunda üreticiye katkı sağladığından bahsetmişlerdir. Aksi taktirde tasarım esnasında fark edilmeyen bir hatanın koruyucu yapı hasar testlerini geçmemesine ve yapının tasarımını düzelterek tekrarlanmasının yüksek

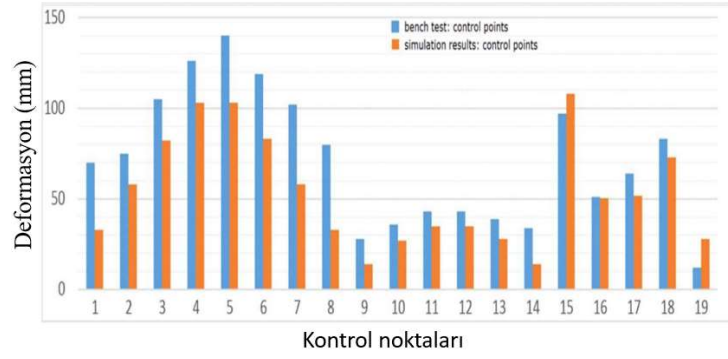
maliyet ve zaman kaybına neden olacağını yazmışlardır. Araştırmacılar düşüncesini doğrulamak için AMKODOR'un yol yapım makinesinin ISO 3449 Seviye-II standardının gerekliliklerine göre Şekil 1.10 , Şekil 1.11 ve Şekil 1.13'deki gibi sayısal yöntem ve analitik yöntem ile test etmişlerdir. FOPS için çelik malzeme kullanılmıştır. Analiz ve test sonrası elde edilen Şekil 1.12' deki grafik ile araştırmacılar, gerçek test ile simülasyon üzerindeki belirledikleri 19 adet noktanın yaptığı deformasyonun çok yakın olduğunu gözlemlemişlerdir. Üst koruyucu yapı tasarımı esnasında kullanılan sonlu elmanlar yönteminin doğru sonuca ulaşmak için düşük maliyetli uygun bir yöntem olduğu kanaatine varmışlardır.



Şekil 1.8. FOPS için Sonlu eleman modeli [11]



Şekil 1.9. FOPS testi sonrası Deformasyon [11]



Şekil 1.10. Belirlenen kontrol noktalarının deformasyon miktarlarının simülasyon ve gerçek test karşılaştırılmaları (mm) [11]



(a)



(b)

Şekil 1.11. Deformasyon açısından a) Gerçek test sonucu, b) Simülasyon sonucu [11]

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Günümüzde ormancılık faaliyetlerinde kullanılan traktörler ya da iş makinalarının FOPS'u metal malzemeden yapılmaktadır. Metal malzemeler OECD kod 10 testini başarı ile geçmesine rağmen uzun süre kullanımda, korozyon gibi dış etkilerinde dolayı zayıflamaktadır ve güvenlik kabiliyetini tamamıyla ya da kısmen yitirmektedir. Bu çalışmada korozyon direnci metal malzemelere göre yüksek ve seri üretim şartlarına uygun olan SMC kompozit malzemenin, traktör FOPS'u için metal malzemelere alternatif olup olmayacağı incelenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. SMC Üretim Yöntemi

SMC, İngilizce “Sheet Moulding Compound” kelimelerinin baş harflerinin kısaltılmış yazılıdır. SMC, takviye malzemesi olarak kırılmış cam elyaf ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin, SMC makinasında birleştirilmesi ile oluşan pestil biçimindeki malzemedir. Uygulamaya ve özel gereksinimlere bağlı olarak, içerik maddeleri değiştirilebilir[12]. Ayrıca SMC, pres kalıplama yoluyla, yarı bitmiş malzemenin kompozit bir parçaya dönüştürülmesi sürecini de ifade eder [13].

Kompozit üretim yöntemlerinden biri olan SMC iki adımda üretilir. Birinci adımda özel olarak hazırlanan, cam fiber, doymamış polyester, dolgu ve katkı maddeleri bir araya getirilip karıştırılarak pestil (preg) biçiminde malzemeler hazırlanır. İkinci adımda da olgunlaşması için bir süre bekletilen pestiller yüksek basınçlı ısıtmalı kalıplarda istenen şekle getirilir [14].

Termoset reçineler, SMC'nin matrisini ve kimyasal omurgasını oluşturur. Reçineler, elyafı bir arada tutar. Nispeten yükü taşımaya katkısı olduğu gibi yükü elyaflar arasında da böler. Doymamış polyester (UP) veya vinilester (VE) en yaygın kullanılan reçinelerdir. Isı ve basınç altında kürlendiklerinde çapraz bağlanma reaksiyonuna girerler. VE reçineleri, yüksek bir teknik gereksinim olduğunda, örneğin sürekli ısı ve kimyasal dirence ihtiyaç duyulduğunda kullanılır. İyi ısı direnci, tüm termosetlerin bir özelliğidir ve termoplastiklerden farklıdır. Çünkü bileşik sert bir katıya dönüştüğünde, yüksek sıcaklıklarda yumuşamaz veya daha düşük sıcaklıklarda kırılabilir hale gelmez. Bu, SMC parçalarının geniş bir sıcaklık aralığında orijinal özelliklerini ve boyutsal doğruluğunu koruduğu anlamına gelir[15].

SMC ile karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıklarında üretilebilmesi mümkündür. Ayrıca ürünün iki yüzü de kalıp ile şekillenmektedir. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik, boşluk gibi karmaşık şekiller parça kalıplaması esnasında elde edilebilmektedir ve iskarta oranı düşüktür [16].

SMC teknolojisini üzerinde yapılan araştırmalar ile BMC (Thick Moulding Compound), HPC (High Performance Compound), CIC (Continuous Impregnation

Compounds) ve AMC (Advanced Moulding Compounds) gibi kalıp içerisindeki reçineyi ısıtarak kompozit üretim teknikleri geliştirilmiştir.

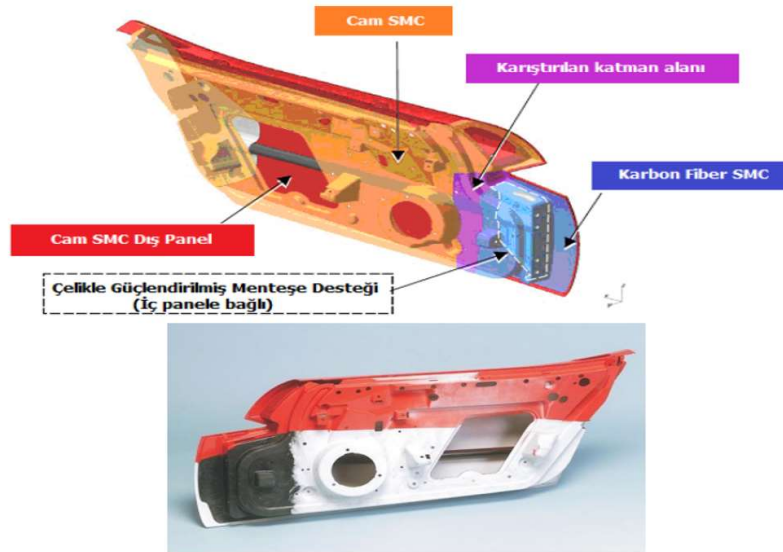
SMC üretim yöntemi en çok otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılsa da, tarım sektöründe, uçak, denizcilik, elektrik ve inşaat sektörlerinde de kullanılmaktadır. Şekil 2.1-2.3 otomotivdeki kullanım örneklerinden bir kaçıdır.



(a) A sınıf rüzgârlık

(b) Kamyon ön paneli

Şekil 2.1. Otomotivde uygulanan çeşitli SMC uygulamaları.[15]



Şekil 2.2. GF-SMC ve CF-SMC'nin hibrit olarak uygulanması. 2003 Doge viper kapı [23]



Şekil 2.3. Yangın geciktirici ve düşük duman özeliğine sahip SMC tren Koltukları [15]

SMC Üretiminin Yönteminin Avantajları:

SMC üretimi, metallerde sac (sheet) metal ile kalıplı üretime benzetilebilir. Ancak kompleks parçalarda sac metal yöntemindeki gibi ürün birden fazla kalıplama operasyonunda elde etmek yerine tek kalıplama operasyonu ile elde edilir. Bu da zaman ve maliyet açısından üstünlük sağlamaktadır.

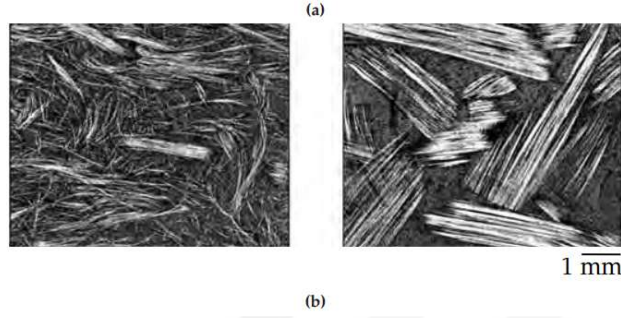
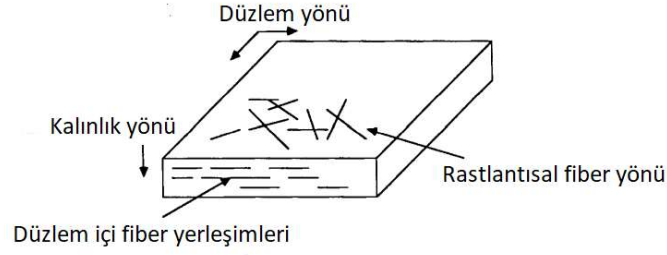
- Kalıplama üretimine olanak verir.
- Kaplama veya boyama işlemi parçanın kalıplama işleminde gerçekleştirilir. Ayrı bir prosese ihtiyaç duyulmaz.
- Isı iletim katsayısı çeliğe göre düşüktür.
- Üretilen ürün çeliğe göre daha hafiftir.
- Üretilen kompozitin malzemenin yüzeyi, kalıp yüzeyinin yüzey kalitesine sahiptir. Genelde düzgün yüzey elde edilmesi kolaydır.
- Ses ve darbe sönümlenme özeliğine sahiptir.
- Metal gömme parçalar sayesinde kalıptan çıkan kompozit parçalar montaj üretime hazırdır [17].
- Seri üretim ve otomasyona uygundur. Robotik kullanım ile insansız prosesler gerçekleştirilebilir.
- Proses süresi kısadır. (Presleme süresi 1 ila 3 dakika arasındadır).
- Düşük elektrik iletkenliğine sahiptir.
- Pestili oluşturan formüldeki bileşenlerin türünü ve karışım yüzdeleri değiştirerek, malzeme karakteristiği, ihtiyaca göre ayarlanabilir. Örneğin, düşük veya yüksek basınçlı kalıplama ve yüksek mekanik mukavemet, Sınıf A yüzey veya alev geciktirme gibi son ürün performans gereksinimlerine sahip ürünler elde edilebilir. Düşük ağırlıklı, yüksek

mukavemetli parçaların elde edilmesi için cam elyaf yerine karbon fiber (CF-SMC) kullanımı mümkündür. Performansın daha az kritik olduğu durumlarda, diğer malzemeler takviye olarak kullanılabilir[15].

SMC Üretim Yönteminin Dezavantajları:

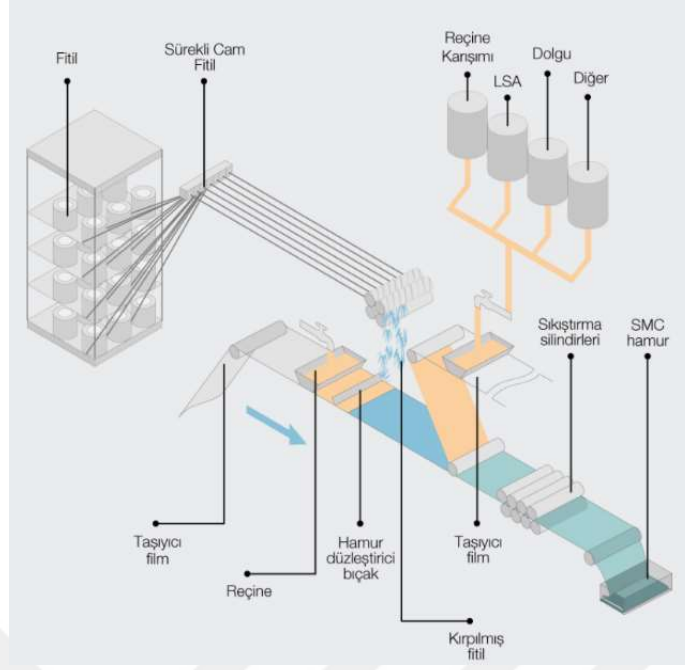
- SMC pastillerinin depolama ömrü kısa ve depolama koşulları maliyetlidir.
- SMC yöntemi ile üretim ucuz olmasına rağmen kullanılan kalıplardan dolayı yatırım maliyetleri yüksektir.

SMC üretiminde kullanılan cam elyaf haricindeki tüm malzemeler, mikserler içerisine eklenip karıştırılarak macun haline getirilir. Bu macunun içerisine reçine ve raf ömrünü uzatmak ve katalizör etkisi oluşturmak için dolgu malzemeleri eklenir. Elde edilen bileşim genellikle 40.000-100.000 cp viskozitede, kıvamlı bir sıvıdır. Bu hamur, taşıyıcı bir film vasıtası ile konveyör bandı üzerinde rulolardan geçirilerek pestil haline getirilir. Oluşturulan pestil üzerine genellikle %20-35 oranında 12-50 mm uzunluğunda, çapı 9,5-16 µm arasında cam elyaf kırkılır. Sıkıştırma işlemi için ikinci bir naylon film tabakası eklenerek tekrar rulodan geçirilir. Şekil 2.4'te de görüldüğü üzere elyaflar, tabaka düzleminde (rastgele) yönlendirilmiş filament demetleri olarak bulunur. Fiber demetlerinin enine kesiti, genel olarak, 60 µm - 200 µm arasında değişen küçük bir eksen ile 500 µm - 1000 µm arasında değişen bir ana eksene sahip olan elips olarak tanımlanır[18]. Cam elyaf miktarı rulo bandının hızı ile ayarlanır. Bandın hızı arttıkça pestil içerisindeki elyaf miktarı azalmaktadır. Oluşturulan rulolar istenilen büyüklüğe geldiğinde, depolama işlemine uygun sıcaklığa ve havalandırmaya sahip odalarda stoklanır. Günümüz teknolojisi ile yukarıda bahsedilen SMC pestil üretimi tamamen otomasyon kontrolü ile gerçekleştirilebilir. Şekil 2.5'de bir pestil üretim hattının şematik şekli gösterilmektedir



Şekil 2.4. Yarı bitmiş SMC levhalarının sıkıştırılarak kalıplanmasından kaynaklanan elyaf oryantasyonu (a) ve kabuk-çekirdek etkisi (b) [18,19]

SMC pestillerin kalıplama için gerekli viskoziteye ulaşması 3-5 gün arasında sürer. Bu süreye olgunlaşma süresi denir. Yarı bitmiş levhaların işlenmesi için yeterince yüksek bir viskoziteye ihtiyaç duyulduğundan, özellikle yoğunluk artırıcı maddeler, macunun viskozitesini arttırmak için önemlidir[20,21]. Dolgu maddesi olarak çoğunlukla kalsiyum karbonat (CaCO_3) kullanılır. Bunun nedeni ucuz ve kolay bulunabilir olmasıdır. İyi bir viskozite değeri elde etmek ve yüzey kalitesini artırmak dolgu maddesinin kullanılmasının başlıca nedenidir. Viskozite değerlerini artırmak için kullanılan alternatif katı maddeleri ise magnezyum oksit ve magnezyum hidroksittir. Dolgu maddesi eklenen pestil daha sonra sıcaklık ve nem kontrollü odalarda bekletilir. Pestil, SMC kalıplama viskozitesine ulaştıktan sonra bile viskozitesinin artması devam etmektedir. Stok süresi geçmiş pestiller yüksek viskozite nedeniyle kalıplanamaz hale gelmektedir. Bu nedenle üretilen pestil, bozulmadan önce kullanılmalıdır. İlk giren ilk çıkar yöntemi olarak bilinen FIFO yöntemi pestilin, depodan kalıplama prosesine aktarılmasında kullanılan en yaygın depolama yöntemidir.



Şekil 2.5. SMC Pestil üretim hattı [22]

SMC basınçlı kalıplama işlemi malzeme hazırlama, yük modeli hazırlama, yük yerleştirme, kalıplama, kalıp açma ve ikincil işlemler olarak altı ayrı procesten oluşur.

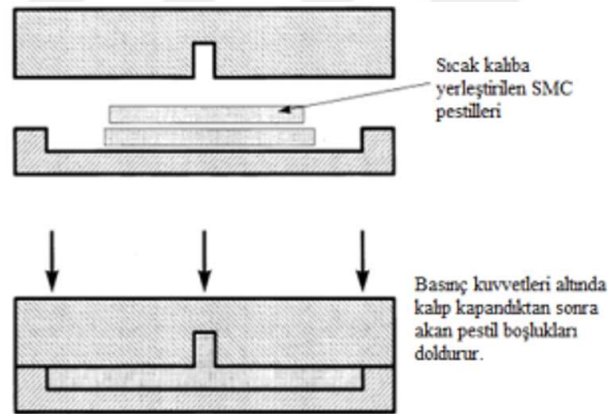
Malzeme hazırlama: SMC pestili normalde rulolar halinde tedarik edilir. İlgili ürün ve kalıp için kesim şablonları oluşturulur. Kesim tezgahına getirilen rulo şeklindeki pestiller bu şablonlar vasıtasıyla kesilir. Kesim işlemi manuel ya da otomasyon kontrolü yardımıyla, giyotin veya makas kullanarak şablon ölçülerinde kesilir.

Yük modeli hazırlama: Kesilmiş parçalar, sonra yığılır ve kalıp boşluğunu doldurmak için uygun, şekil ve hacim olarak belirlenmiş bir yük modeli üzerinde birleştirilir. Yük modelinin belirlenmesi için yapılan denemeler fabrika işletme mühendisi tarafından gerçekleştirilir[17]. Bu işlemden sonra malzeme tartılır. Malzeme ağırlığında bir eksiklik var ise ekleme yapılır.

Yük yerleştirme: Önceden belirtilmiş yük, sonra ön üretim kalıplama denemeleri esnasında ısıtılmış kalıp yüzeyine yerleştirilir. Büyük ya da karmaşık parçalar üzerinde yük, önceden belirlenen kısımlar içerisine ayrı bir şekilde yerleştirilebilir. Uygun yerleştirme, yüksek kaliteli parçalar için kılavuz yardımı ile olur. Yük model yerleşimden bir değişme, parçanın mukavemet özelliklerinde de bir değişmeye sebep olabilir. Sonuçta fiber yönelmesi düşük gerilmeden yüksek gerilme alanlarına doğru kayar ve bu esnada yüzey hataları ortaya çıkabilir [24].

Kalıplama: SMC kalıplama işleminden önce alaşımlı çelikten yapılmış kalıp 120-170°C kadar ısıtılır. Isıtılan kalıbın içine parçanın yapısına göre miktarı önceden ayarlanmış SMC pestili yerleştirilir. Şekil 2,6'daki şematik şekilde de gösterildiği gibi daha sonra kalıp hidrolik presler yardımı ile 80- 170 bar arasında sıkıştırılır. Isı ve basınç altında SMC pestili akışkan bir yapıya dönüşür. Kullanılan katkı maddesi, parça kalınlığı ve kalıp sıcaklığına bağlı olarak kalıplama işlemi 1-5 dakika sürebilir. Eğer parçanın yapısı ve büyüklüğünden dolayı akışkan olan SMC pestili, kalıp boşluklarını tam doldurmuyor ve gerekli dağılımı sağlamıyorsa kalıp içerisine vakum uygulaması yapılabilir. Kurlenme süresi, matristeki reçine tipine, kürlenme maddesinin seviyesine ve bileşenin kalınlığına bağlıdır. Kalıp yüzeyine yapılacak kaplama ve yüzey kalitesini artırma işlemi parçanın yüzey kalitesini de artıracaktır.

Kalıp açma: Kalıplama işleminden sonra kalıp açılır. Isı ile preslenen parça, kalıptan hava ya da vakum yardımı ile ayrılır ve çapak kaldırma operasyonu yapılır. Daha sonra soğuyan parça üzerine ikincil operasyonlar gerçekleştirilir.



Şekil 2.6. SMC Kalıplama hattı [25]

İkincil işlemler: Talaş kaldırma: delik ve yüzey işleme operasyonları için genelde CNC tezgâhları kullanılır. SMC kompozit parça, Şekil 2.7'deki gibi CNC tezgâhlarına aparatlar sayesinde bağlanarak seri üretime uygun programlar ile delik delme, talaş kaldırma operasyonları yapılır.



Şekil 2.7. SMC CNC Delik delme operasyonu [15]

Yapıştırma: Özel yapılmış yapıştırıcılar sayesinde kompoziti kompozite veya kompoziti diğer malzemelere (metal, plastik) bağlamak artık mümkündür. Bu yapıştırıcıların çoğu, mekanik gereksinimi karşılamak için poliüretan, akrilik, epoksi veya modifiye silikon (MS) polimer kimyasına dayanmaktadır [15]. Boyama: SMC parçalara geleneksel boyama yöntemleri ile boyama yapılabilir. A sınıfı yüzey gerektiren kaporta gibi parçalarda özel boyama işlemlerine de tabi tutulabilirler. SMC parçalarının boyama işlemi korozyon dayanımı arttırmak değil, ürünün Şekil 2.8'de gösterilen örnek parça gibi cazibesini arttırmak için yapılır.



Şekil 2.8. Boyanmış SMC malzemeden yapılmış otomotiv parçası [15]

SMC'ler, fiberin matris içerisindeki dağılımına ve SMC oluşturan malzemelerin cinsine göre sınıflandırılırlar. SMC'lerin fiberin matris içerisindeki dağılımına göre ayrılmasının nedeni pestil içerisinde bulunan fiberlerin yönleri ve sürekliliğidir. Fiberin matris içerisindeki dağılımına göre SMC'ler:

SMC-R: Pestil içerisinde fiber malzeme tesadüfi şekilde dağıtılarak elde edilir. Bu yöntemle elde edilen SMC ile oluşturulan nihai parçanın mekanik özellikleri nerdeyse tüm

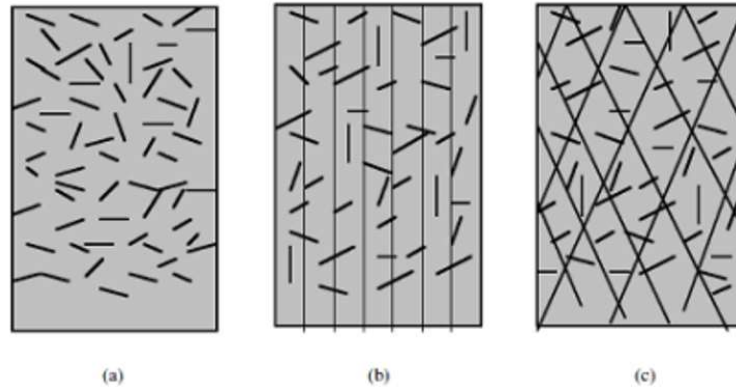
yönlerde aynıdır. Parçanın büyüklüğü ve karmaşıklığı, kalıplama prosesinde değişikliklere neden olacağından mekanik özellikteki bu benzerliği değiştirebilir. Pestil içerisindeki elyaf ağırlık yüzde oranı R harfinden sonra yazılır (Örneğin SMC-R20, ağırlıkça %20 fiber oranı).

SMC-C: Pestil içerisindeki elyaf tek yönde dizilmiştir. Parçanın mekanik değeri elyafın yönüne göre değişiklik gösterir. Elyaf yönündeki mukavemet değeri diğer yönlere göre daha yüksektir. Akışkanlık özeliği daha düşük olduğu için kalıplama esnasında vakum operasyonuna ihtiyaç duyurulur.

SMC-C-R: Daha mukavemetli malzemelerin üretilmesi için rasgele ve sürekli elyaflar bir araya getirilerek elde edilir. Bu yöntemde de malzemenin mekanik özellikleri sürekli elyaf yönünde daha fazladır. Malzeme içerisindeki elyaf oranları ağırlıkça yüzde olarak birlikte yazılır (C20R20 gibi) [26].

SMC-X: Çapraz yöndeki X şeklinde sürekli liflerin ve rastgele liflerin, mukavemeti artırmak için bir araya gelmesi ile üretilir [26].

SMC-D: Tek yönlü ama sürekli olmayan 100 mm veya daha fazla uzunluktaki lifler kullanılarak elde edilir. Geniş bir biçimde dağıtılan lifler elyaf yönünde daha iyi bir akış sağlar ama SMC-C' ye göre mukavemet biraz azalabilir [26].



Şekil 2.9. Yaygın biçimde kullanılan SMC tipleri a)SMC-R b)SMC C-R c)SMC X [26]

SMC oluşturan malzemelerin cinsine göre SMC'ler:

Cam fiber takviyeli (SMC GF-SMC): Sanayide en yaygın kullanılan SMC türüdür. Takviye eleman olarak cam elyaf, matris malzeme olarak polyeester ya da VE kullanılır.

Karbon fiber takviyeli (SMC CF-SMC): VE veya epoksi reçineli, karbon fiberli SMC uygulamaları oldukça yenidir. Mukavemet değerleri yüksek olduğundan dolayı, Metal

malzemelere alternatif olarak kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Yüksek mukavemet ve hafiflik istenilen yerlerde kullanılır. Genellikle rüzgâr türbinlerinde, yarış ve uzay araçlarında kullanılır. Pahalı bir malzeme olduğu için otomobil ve tarım sektöründe kullanılmamaktadır.

Doğal lif takviyeli (SMC NF-SMC): Keten, jute, kenevir gibi doğal liflerle SMC üretim denemeleri yapılmıştır. Cam fiberlere göre düşük yoğunluk ve düşük ekipman aşınması gibi birkaç avantajı vardır. Voorn ve ark. [28] 2001’de yaptıkları çalışmada kısa keten lifleri kullanarak SMC parça üretmiş, cam fiber SMC’ye yakın mekanik değerler elde etmişlerdir [28].

2.2. SMC-R25 İçin Yapılan Malzeme Testleri ve Test Sonuçları

Bu çalışmada fiziksel olarak FOPS testine maruz kalan malzeme, SMC-R25 dir. Cam elyaflar ile güçlendirilmiş, katkı maddesi olarak kalsiyum karbonat (CaCO_3) eklenmiş polyester matrisinden meydana gelmiştir. Matris içerisinde ağırlık bakımından %25 oranında süreksiz dizilime sahip, boyları 25 mm olan cam elyaflar vardır. SMC-R25 malzemesi kullanarak hidrolik pres yardımıyla kalıplanan FOPS, 3,5 mm kalınlığa sahiptir. Kalıplama işlemi $140\text{ }^\circ\text{C}$ ’ de 2 dakika süresince 8 MPa basınçla gerçekleştirilmiştir.

Günümüzde birçok malzemenin sayısal değerleri ile deneysel değerleri arasında farklılıklar gözlenmektedir. Bunun nedeni ise sayısal değerde malzemenin yapısı genellikle kusursuz kabul edilir. Ancak aynı üretim hattında üretilen malzemelerin deneysel sonuçlarında bile farklılıklar gözlemlenebilir. Özellikle SMC gibi dağılık elyaf kompozit malzemeler ile ilgileniliyorsa malzemelerin mekanik özelliklerini doğru bir şekilde elde etmek daha da zorlaşmaktadır. SMC kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, elyaf türüne, stoklama, saklama koşullarına ve matris olarak kullanılan reçinenin cinsine göre farklılık göstermektedir. Bu nedenlerden dolayı, sayısal simülasyonlarda kullanılacak malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için bu çalışmanın konusu olan FOPS’un üretim hattından alınan numunelere yapılan çekme ve basma testi sonuçları referans alınacaktır. Çekme testi için, TS EN ISO-527-4 (izotropik ve ortotropik elyaf takviyeli plastik kompozitler için deney şartları) standardı, basma test için ASTM D695-15 (standard test method for compressive properties of rigid plastics) standardı referans alınacaktır. Simülasyon yardımı ile yapılacak karşılaştırma testlerinde kullanılacak alternatif malzemelerin (SMC R65 ve S235JR) özellikleri literatür taraması ile belirlenmiştir.

Çekme testleri sırasında ZWICK/ Roel Z050 test cihazı kullanılmıştır. Cihaz, ölçüm aralığı 50 kN'a kadar yük uygulayabilen ve hassasiyeti 0,1 N olan hidrolik kuvvet çenelerine sahiptir. Cihazın test alan yüksekliği maksimum 1892 mm olup, test alan genişliği ise 630 mm' dir. Cihazın çekme hızı 0,001 ila 2000 mm/dak arasında değiştirilebilmektedir. Çekme deney parçasındaki uzamayı ölçmek için cihaz üzerinde ölçüm aralığı 20 mm ve hassasiyeti 0,001mm olan bir adet ekstansometre vardır. Hidrolik kuvvet uygulayıcısından ve 661.20F03 model 100 kN'luk yük hücresinden oluşmaktadır. Çekme deneyi için kullanılan hidrolik kuvvet uygulayıcısı, yük hücresi ve bağlantı kısıkaçları Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



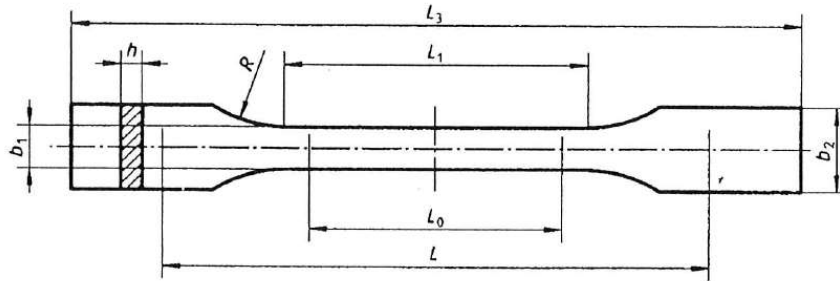
Şekil 2.10. ZWICK/ Roel Z050 test cihazı

Basma testlerinde Zwick Z250 universal test cihazı kullanılmıştır. Cihaz, ölçüm aralığı 250 kN'a kadar yük uygulayabilen ve hassasiyeti 0,1 N olan hidrolik kuvvet çenelerine sahiptir. Cihazın test alan yüksekliği maksimum 1675 mm olup, test alan genişliği ise 630 mm' dir. Cihazın çekme hızı 0,001 ila 600 mm/dak arasında değiştirilebilmektedir. Basma deneyi için kullanılan test cihazı Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Zwick Z250 universal test cihazı

Çekme ve basma numuneleri, TS EN ISO 527-4'e göre Tip 1B'ye ve ASTM D695-15' 6.7.1 maddesine uygun olarak Hattat 3000 traktör gölgeliği için seri üretim yapan firmadan rastgele seçilen gölgelikler üzerinden, standardın Şekil 2.12. ve Çizelge 2.1.'de belirtildiği ölçülerde 90° (y yönü), 0° (x yönü) ve 45° (xy yönünde) de 5 adet çekme ve 5 adet basma testleri için kesilerek elde edilmiştir.



Şekil 2.12. TS EN ISO 527-4'e göre deney numune sembolleri [42]

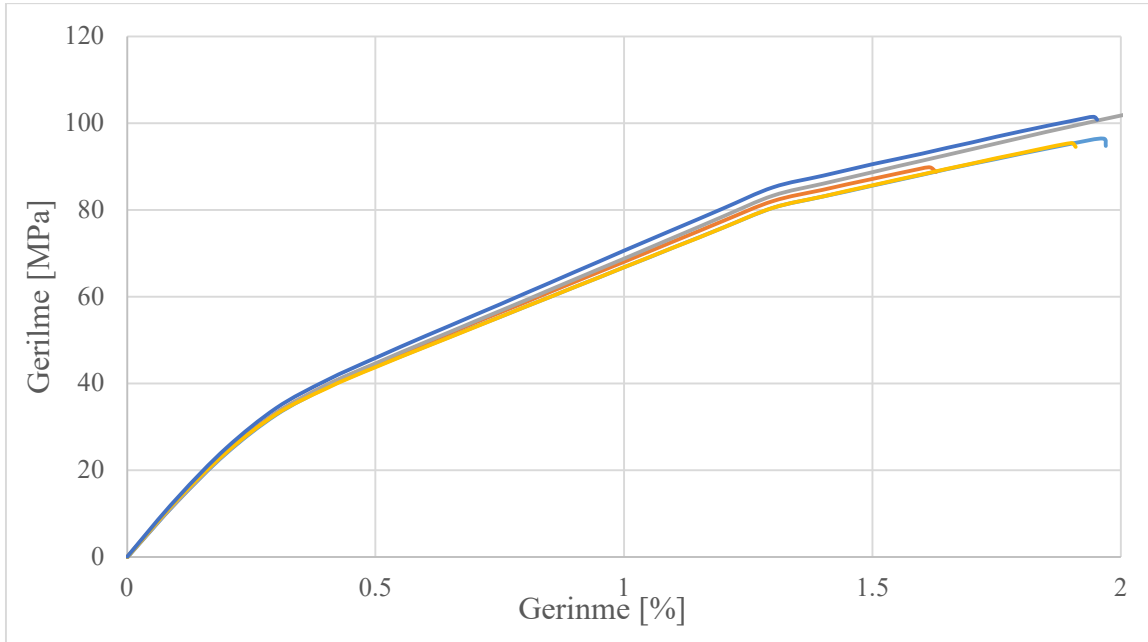
Çizelge 2.1. TS EN ISO 527-4'e göre deney numune ölçüleri

Sembol	Ölçü	Değer Aralığı	Numune ölçüleri
L ₃	Toplam uzunluk	≥150	250
L ₁	Dar paralel kenarlı kısım uzunluğu	60±0,5	60±0,5
R	Yarıçap	≥60	80±5
b ₂	Uçlardaki genişlik	20±0,2	20±0,2
b ₁	Dar kısmın genişliği	10±0,2	10±0,2

Çizelge 2.2. TS EN ISO 527-4'e göre deney numune ölçüleri (Devamı)

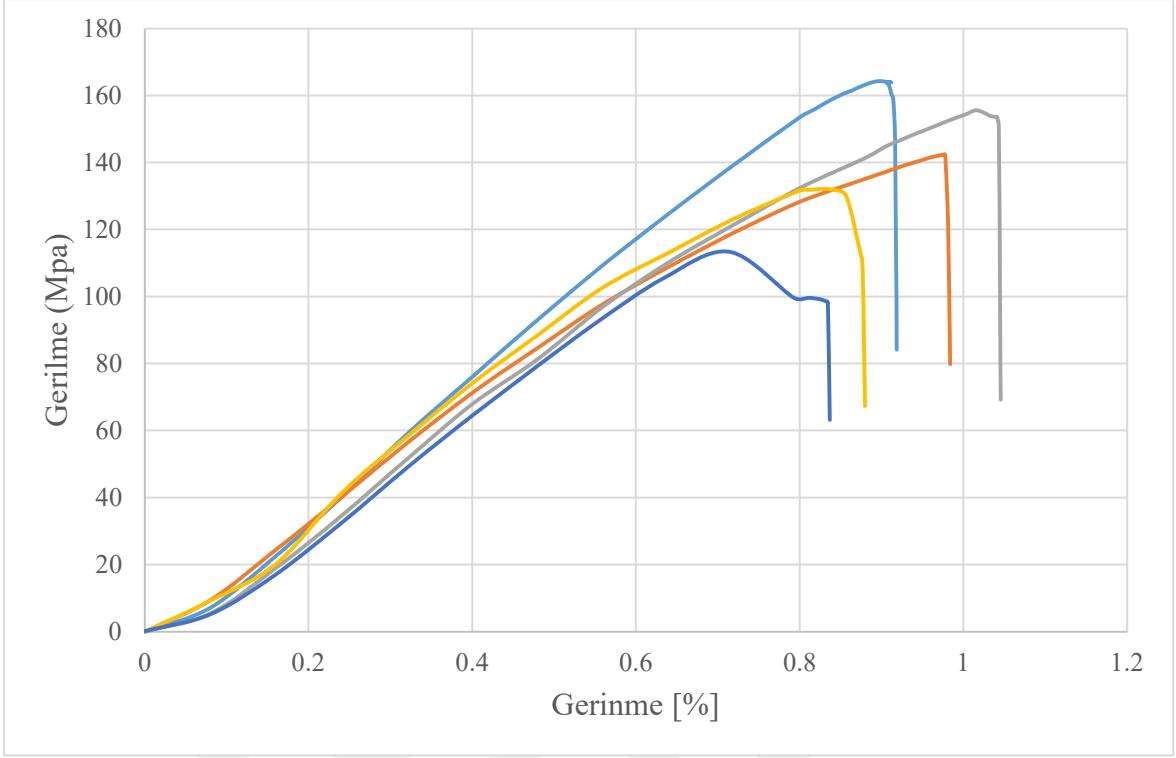
Sembol	Ölçü	Değer Aralığı	Numune ölçüleri
h	Kalınlık	2-10	10
L₀	Ölçme Uzunluğu (uzama ölçerler için tavsiye edilen)	50±0,5	50±0,5
L	Çeneler arasındaki başlangıç mesafesi	115±1	115±1

SMC-R25 için yapılan çekme testleri sonucunda 0°'de kesilen 5 numune için Şekil 2.13' deki gerilme-gerinme eğrileri elde edilmiştir.



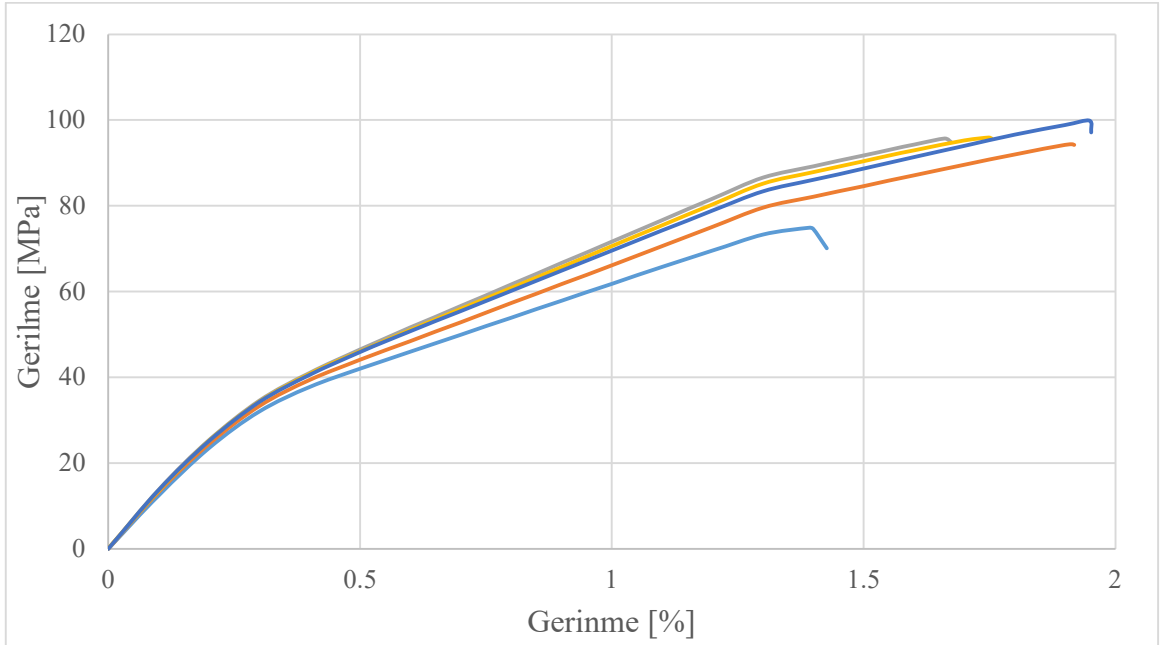
Şekil 2.13. SMC-R25'den 0°'de kesilen numunelerin çekme test sonuçları

SMC-R25 için yapılan basma testleri sonucunda 0°'de kesilen 5 numune için şekil 2.14'deki gerilme-gerinme eğrileri elde edilmiştir.



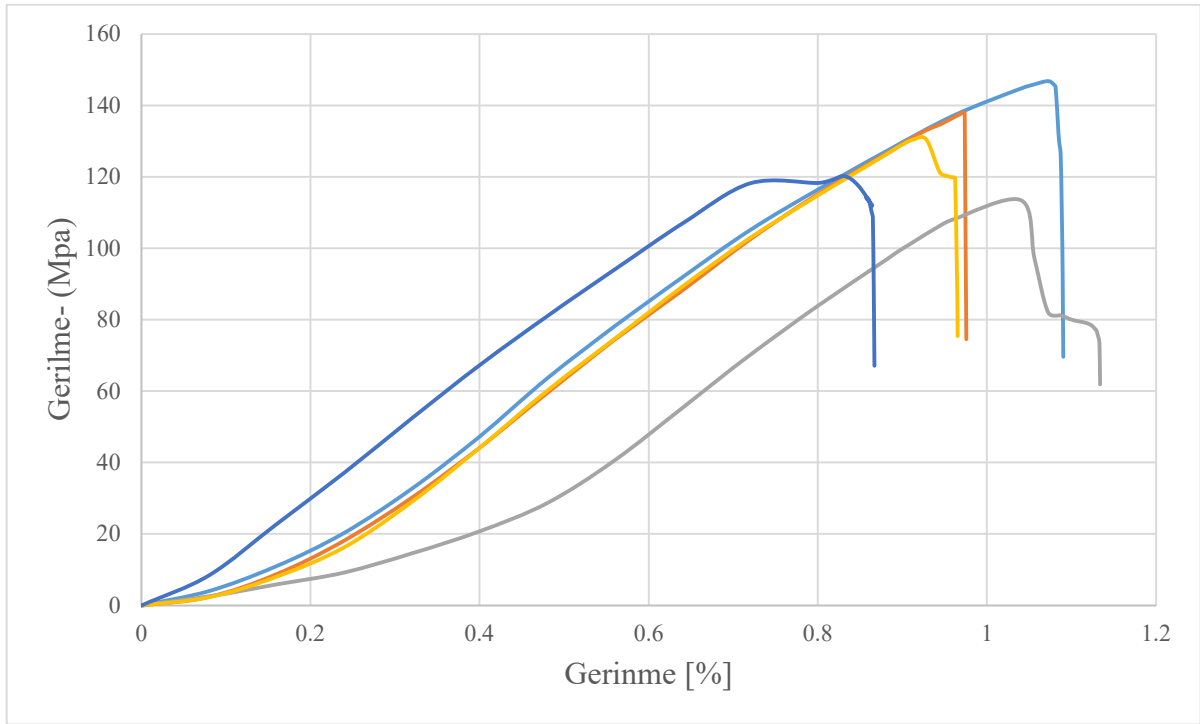
Şekil 2.14. SMC-R25'den 0°'de kesilen numunelerin basma test sonuçları

SMC-R25 için yapılan çekme testleri sonucunda 90°'de kesilen 5 numune için Şekil 2.15' deki gerilme-gerinme eğrileri elde edilmiştir.



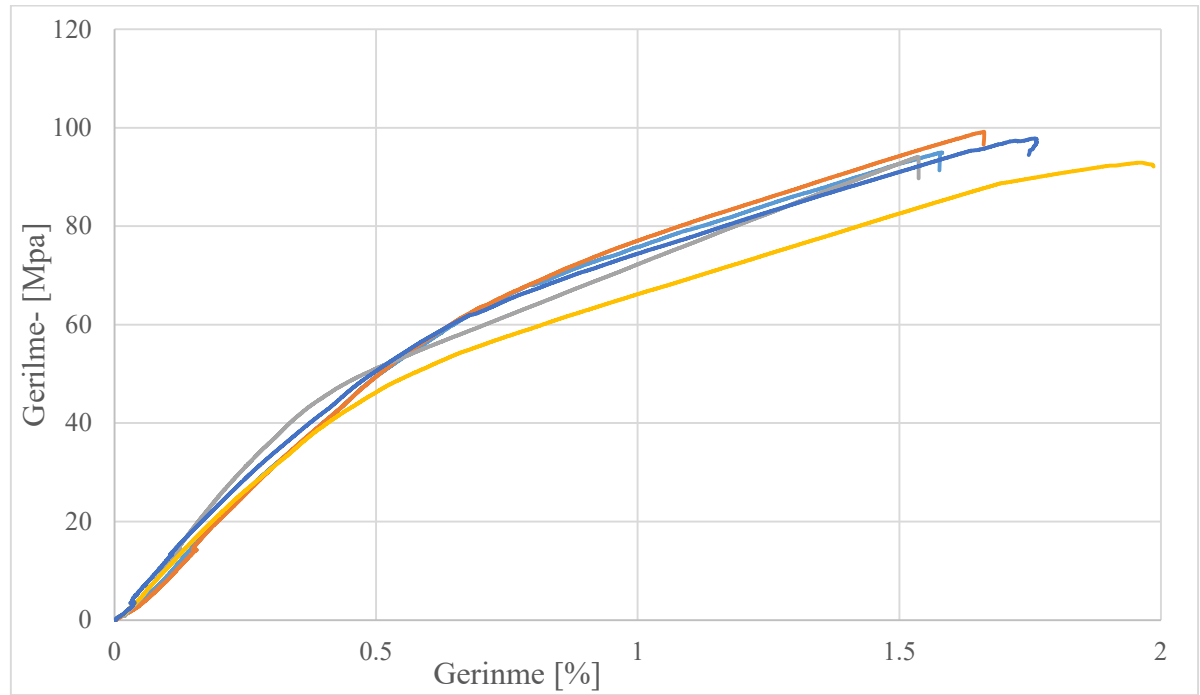
Şekil 2.15. SMC-R25'den 90°'de kesilen numunelerin çekme test sonuçları

SMC-R25 için yapılan basma testleri sonucunda 90°'de kesilen 5 numune için Şekil 2.16'deki gerilme-gerinme eğrileri elde edilmiştir.



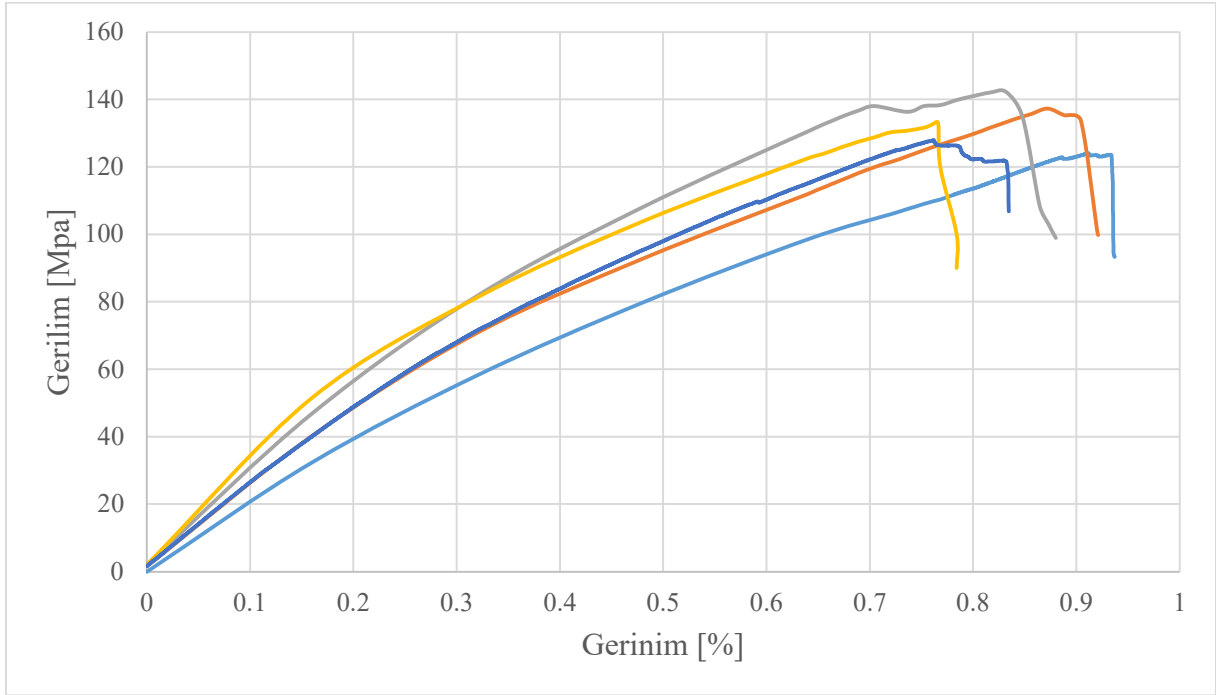
Şekil 2.16. SMC-R25'den 90°'de kesilen numunelerin basma test sonuçları

SMC-R25 için yapılan çekme testleri sonucunda 45°'de kesilen 5 numune için Şekil 2.17'deki gerilme-gerinme eğrileri elde edilmiştir.



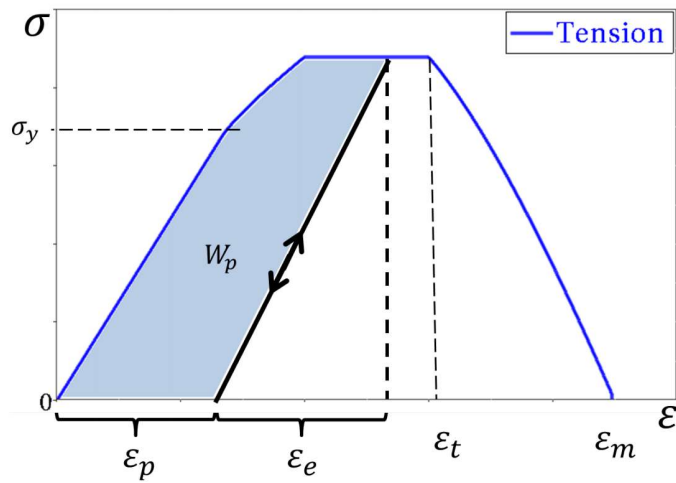
Şekil 2.17. SMC-R25'den 45°'de kesilen numunelerin çekme test sonuçları

SMC-R25 için yapılan basma testleri sonucunda 45°'de kesilen 5 numune için Şekil 2.18'deki gerilme-gerinme eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 2.18. SMC-R25'den 45°'de kesilen numunelerin basma test sonuçları

Malzeme üzerindeki kuvvetin kalkması durumunda, malzemede oluşan kalıcı deformasyona plastik gerinme ε_p denir. Elastik gerinme ise ε_e , malzemede deformasyona neden olan kuvvet etki ettiğinde ortaya çıkar. Kuvvetin sıfır olduğu durumda elastik gerilme de sıfır olur. Şekil 2.19'da açıklanmaya çalışılan plastik iş (W_p) ise malzeme üzerinde plastik gerilmenin oluşması esnasında oluşan iştir.



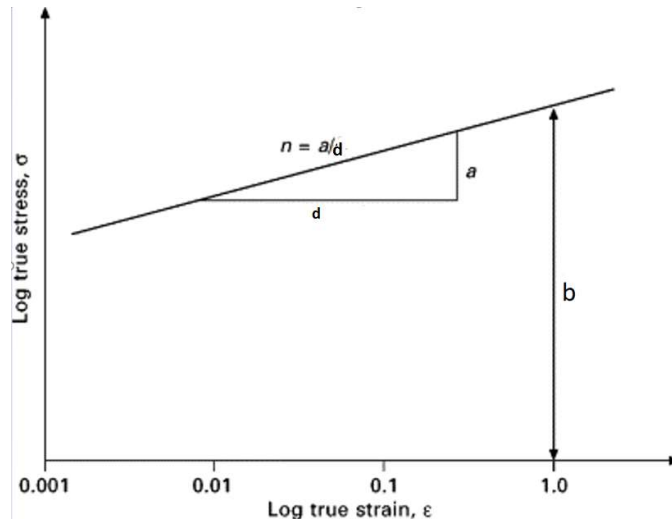
Şekil 2.19. Plastik işin şematik gösterimi

Plastik iş eğrinin altındaki gölgeli alandır. Bu doğrultuda SMC-R25 malzemesinin plastik işini belirlemek için 2 adet 90° ve 2 adet 0° olmak üzere 4 adet numuneye çekme testi uygulanmıştır. Çekme testinde numune üzerine 90 MPa gerilme oluşana kadar kuvvet uygulanıp numune kopmadan serbest bırakılarak numunenin L₀ uzunluğunun ilk ve son ölçüleri arasındaki farkın, yani ϵ_p 'in 0,08 mm olduğu ölçülmüştür. Creo 3D modelleme programı kullanılarak W_p Alanı yüzey olarak çizilip ölçülmüştür. Ölçümlerde 12,378; 11,489; 11,934; 11,935 J/mm³ değerler elde edilmiş olup simülasyonlarda ortalama değeri 11,934 J/mm³ alınmıştır.

Plastik sertleşme üssü olan n değeri, malzeme deforme olduğunda ne kadar hızlı bir şekilde gerilme yüklendiğinin ölçüsüdür. n-değeri, logaritmik bir ölçekte çizilen bir çekme testinde gerilime karşı gerinim eğrisinin eğiminden elde edilebilir[39]. Plastik sertleşme katsayısı olan b değeri ise çizilen bu grafikteki log gerinme 1 değerine karşı gelen log gerilme değeridir.

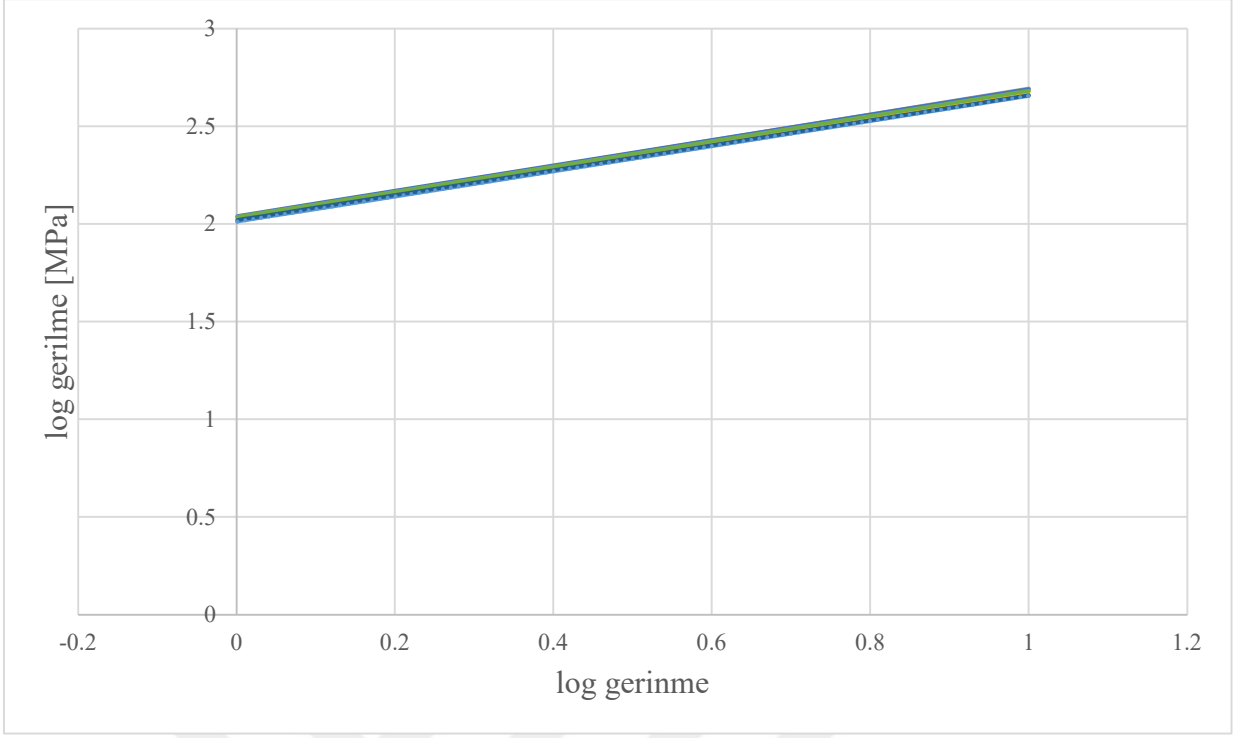
$$\sigma = b\epsilon^n \quad (2.1)$$

Burada σ ve ϵ gerçek gerilme ve gerinmedir.

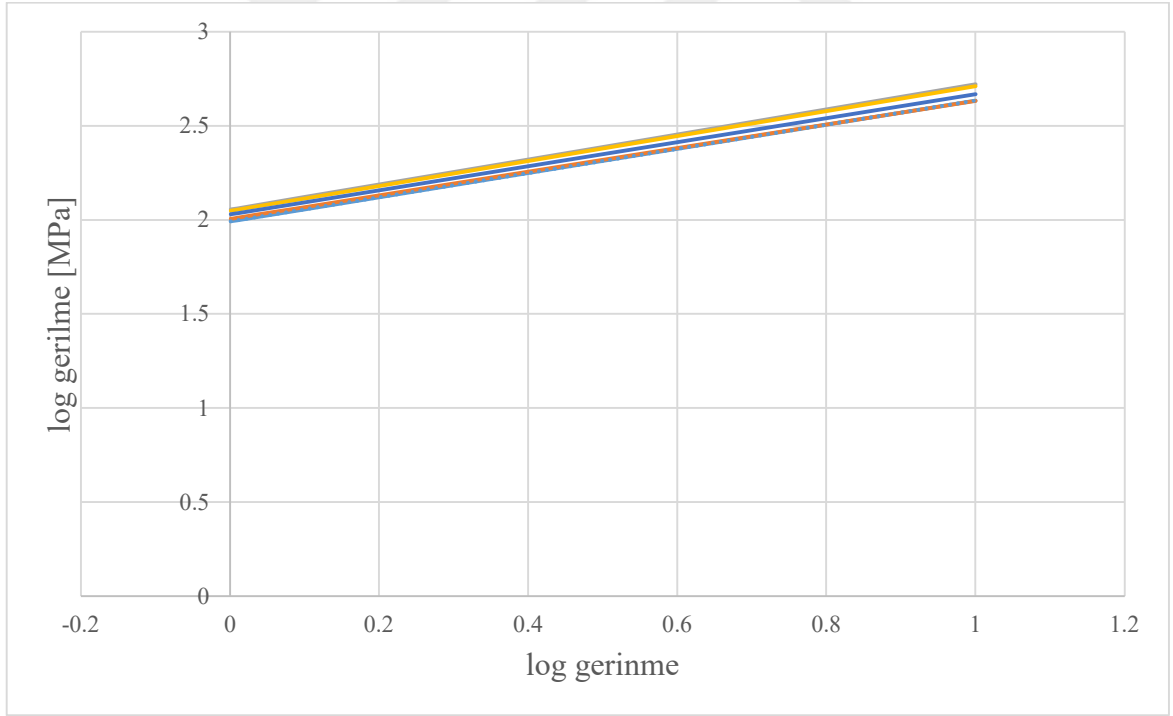


Şekil 2.20. Sertleşme katsayıları ile logaritmik gerilme ve gerinme eğrisi

SMC-R25 malzemesinin gerçek logaritmik gerilme- gerinme grafikleri 5 adet 0° ve 5 adet 90° derece doğrultusunda alınan numuneler ile Şekil.2.21-Şekil 2.22'de verilmektedir. Eğrilerin eğimi n ve log 1 gerinmedeki gerilme değeri b değeri olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.21. SMC-R25 0°'de kesilen 5 adet numune için logaritmik gerilme-gerinme grafiği



Şekil 2.22. SMC-R25 90°'den kesilen 5 adet numune için logaritmik gerilme-gerinme grafiği

Çizelge 2.3. Çekme numunelerine göre sertleşme katsayısı (b) ve sertleşme üssü (n) değerleri

		n	b
0° dercede kesilen	Numune 1	0,64	2,65
	Numune 2	0,66	2,69
	Numune 3	0,65	2,67
	Numune 4	0,65	2,69
	Numune 5	0,64	2,68
90° dercede esilen	Numune 1	0,64	2,63
	Numune 2	0,62	2,63
	Numune 3	0,66	2,72
	Numune 4	0,66	2,71
	Numune 5	0,63	2,66
Ortalama		0,64	2,67

Malzeme üzerine etki eden kuvvetin hızına bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerinde değişiklik görülür. Bu değişikliğe gerinim oranı etkisi denir. Gerinim oranı etkisi farklı malzemeler için farklı değerler verir. Statik durumlar için ihmal edilebilirken yarı statik veya dinamik durumlarda ise hesaplamalara dâhil edilmelidir. Gerinim oranı etkisinin matematiksel ifadesi aşağıdaki denklem (2.2) ifade edildiği gibidir. Bu formüldeki c katsayısı gerinim etki katsayısıdır.

$$\sigma(\dot{\epsilon}) = \sigma(\dot{\epsilon}_0) \left(1 + c \log \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (2.2)$$

Taggart D.G. ve ark.[38]'in çalışmalarında,SMC R25 ve SMC R65 malzemeleri için değişik çekme hızlarında elde ettikleri akma gerilmelerini gösteren Çizelge 2.3'te sunulmuştur

Çizelge 2.4. SMC-R25 ve SMC-R65 Gerinim Oran Sonuçları

		Gerinim Oranı (min⁻¹)					
Malzeme		0,01	1	10	100	1000	10000
Maksimum Gerilme (Mpa)	SMC R25	73,8	73,8	67,6	78,6	109,6	109,6
	SMC R65	45,5	49,6	67,6	66,9	80	87,6

SMC-R25 malzemesi için c katsayı bulmada, Çizelge 2.3'deki $\dot{\epsilon}_0$ için 10 değeri, $\dot{\epsilon}$ için ise 100 değerleri işleme alınmıştır. Bu değerler denklem (2.2)'de yerlerine yazılıp c değeri için işlem yapıldığında c değeri 0,163 bulunur.

Hattat 3000 serisi traktörde kullanılması planlanan FOPS'u oluşturan SMC-R25 malzeme için yapılan tüm testlerin ve araştırmaların sonuçları Çizelge 2.4 ile verilmektedir.

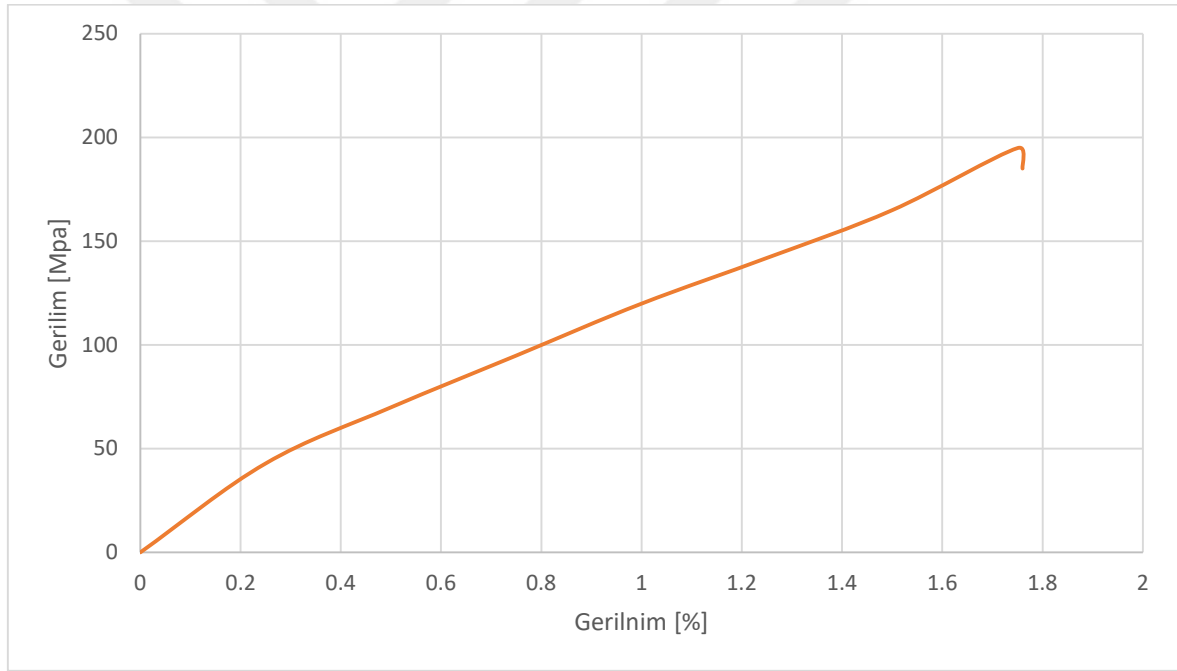
Çizelge 2.5. SMC-R25 malzeme test sonuçları

Tanım	Sembol	Norm	Birim	Sonuç
Özgül ağırlık	ρ	TS EN ISO 3838	g/cm ³	1,79
Su absorpsiyonu		TS EN ISO 62	%	0,17
Elyaf oranı		ISO 1172	%	24,8
Darbe mukavemeti		DIN EN ISO 179	kJ/m ²	69,57
Poisson Oranı	ν	DIN EN ISO 527-4		0,28
0°'de çekme mukavemeti	σ_{1y}^t	DIN EN ISO 527-4	N/mm ²	97
0°'de Basma mukavemeti	σ_{1y}^c	ASTM D695-15	N/mm ²	130,1
0°'de Elastisite modülü	E ₁₁	DIN EN ISO 527-4	N/mm ²	11,401
0°'de çekmedeki uzama	Δl_1	DIN EN ISO 527-4	%	1,89
90°'de çekme mukavemeti	σ_{2y}^t	DIN EN ISO 527-4	N/mm ²	92
90°'de basma mukavemeti	σ_{2y}^c	ASTM D695-15	N/mm ²	133,9
90°'de Elastisite modülü	E ₂₂	DIN EN ISO 527-4	N/mm ²	11,385
90°'de çekmedeki uzama	Δl_2	DIN EN ISO 527-4	%	1,75
45° çekme mukavemeti	σ_{12y}^t	DIN EN ISO 527-4	N/mm ²	95
45° basma mukavemeti	σ_{12y}^c	ASTM D695-15	N/mm ²	133,5
Maksimum Plastik iş	W_p^{max}		J/mm ³	11,9
Plastik sertleşme katsayısı	b			2,67
Plastik Sertleşme üssü	n			0,64
Gerinim Etki Katsayısı	c			0,163
Referans Gerinim oranı [38]	$\dot{\epsilon}_0$		1/sn	10
Referans Gerinim oranı	$\dot{\epsilon}_0$		1/sn	10 [38]

2.3. SMC-R65 İçin Yapılan Malzeme Testleri ve Test Sonuçları

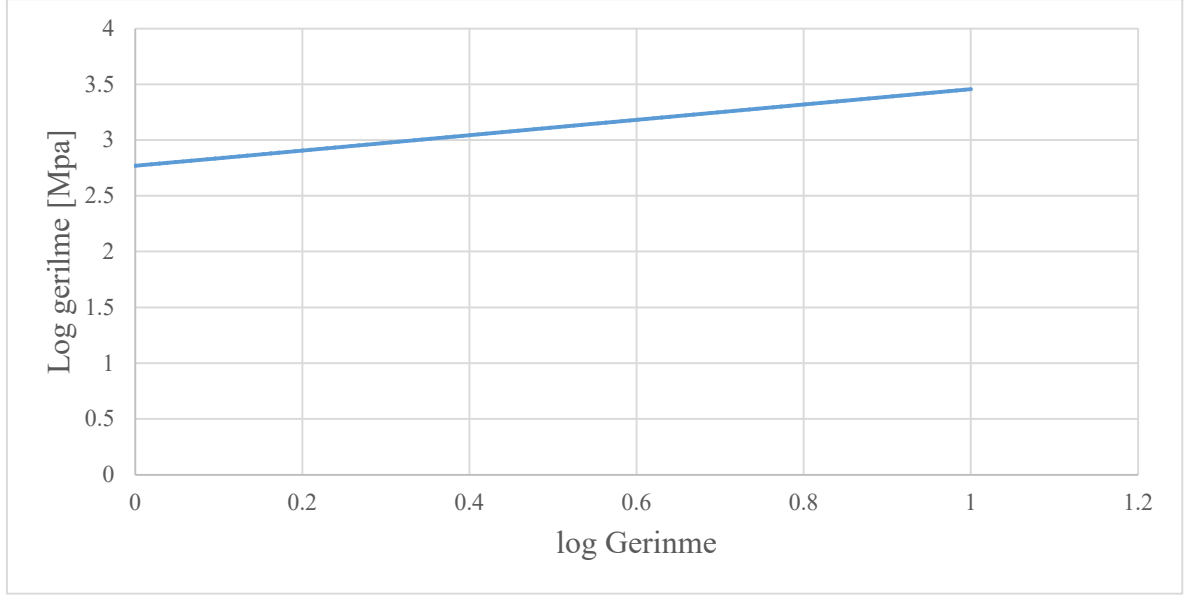
SMC R65 simülasyonu için gerekli olan mekanik değerler literatür taraması ile elde edilmiştir. Kompozitin 90° ve 0° çekme, basma, kayma mukavemet değerleri, elastik modül değerleri, özgül ağırlık değeri Taggar ve ark. [38] çalışmalarından alınmıştır. SMC 25 malzeme testlerinde elde edilen sonuçlara dayanarak SMC 65 için 45°’de çekme ve basma değerleri için 90° ve 0° ‘in ortalamaları alınmıştır.

Plastik iş değerini, plastik sertleşme katsayısını ve sertleşme üssünü belirlemek için 0° yönünde iki adet çekme testi gerçekleştirildi. Çekme numunesinin biri 160 MPa gerilme uyguladıktan sonra serbest bırakıldığında plastik uzama miktarı 0,27mm olarak ölçülmüştür. Plastik iş değeri için W_p alanı CREO parametrik programı kullanılarak modellenmiştir ve oluşan yüzeyin alanı ölçüldüğünde plastik iş değeri 33.34 J/mm³ olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.23. SMC-R65’den 0°’de kesilen numune çekme test sonucu

SMC-R65 için yapılan çekme testinden elde edilen verilerle log gerilme-gerinme grafiği SMC-R65 malzemesi için Şekil 2.24 daki gibi elde edildi. Oluşan doğrunun eğimi yani plastik sertleşme üssü (n) 0,68 ve log 1 gerinme karşılık gelen gerilme yani plastik sertleşme katsayısı (b) ise 3,45 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2.24. SMC R65'den 0°de kesilen 1 adet numune için logaritmik gerilme-gerinme grafiği

SMC-R65 gerinim etki katsayısını belirlemek için denklem (2.2) kullanıldı. Çizelge 2.3 kullanılarak ϵ_0 için 1 değeri, ϵ için ise 10 değer alınıp denklemde yerlerine yazıldığında gerinim etki katsayısı (c) 0,363 olarak bulunmuştur.

Çizelge 2.6. SMC R65 Malzeme test sonuçları [38]

Tanım	Sembol	Norm	Birim	Sonuç
Özgül ağırlık	ρ	TS EN ISO 3838	g/cm ³	1,9
0°de çekme mukavemeti	σ_{1y}^t	DIN EN ISO 527-4	N/mm ²	215
0°de basma mukavemeti	σ_{1y}^c	ASTM D695-15	N/mm ²	284
0°de elastisite modülü	E ₁₁	DIN EN ISO 527-4	GPa	16,55
0°de çekmedeki uzama	Δl_1	DIN EN ISO 527-4	%	1,65
90°de çekme mukavemeti	σ_{2y}^t	DIN EN ISO 527-4	N/mm ²	163
90°de basma mukavemeti	σ_{2y}^c	ASTM D695-15	N/mm ²	223
90°de elastisite modülü	E ₂₂	DIN EN ISO 527-4	N/mm ²	13,79
90°de çekmedeki uzama	Δl_2	DIN EN ISO 527-4	%	1,5
45° çekme mukavemeti	σ_{12y}^t	DIN EN ISO 527-4	N/mm ²	189
45° basma mukavemeti	σ_{12y}^c	ASTM D695-15	N/mm ²	253
Maksimum Plastik iş	W_p^{max}		J/mm ³	33,34
Plastik sertleşme katsayısı	b			2,67
Plastik Sertleşme üssü	n			0,64
Gerinim Etki Katsayısı	c			0,363

Çizelge 2.7. SMC-R65 Malzeme test sonuçları [38]

Tanım	Sembol	Norm	Birim	Sonuç
Poisson Oranı	ϑ	DIN EN ISO 527-4		0,385
Referans Gerinim oranı [41]	$\dot{\epsilon}_0$		1/sn	1

2.4. Düşen Cisimlere Karşı Üst Koruyucu Yapı (FOPS) Testi

İş makineleri ve ormancılıkta kullanılan traktörlerde düşen cisimlere karşı üst koruyucu yapının (FOPS) olması birçok ülkede zorunluluktur. Bu yapılar operatörün üzerine yukarıdan gelecek taş, kaya veya ağaç dallarından operatörü korumayı amaçlamaktadır. FOPS'ların mukavemet yeterliliği ve uygunluğu OECD kod 10 testine göre belirlenir. FOPS operatör kabınının çatı kısmı olabileceği gibi, yuvarlanmaya karşı kullanılan çerçeveye (ROPS) bağlı bir yapı da olabilir.

Avrupa Direktifi 2013/167/EU, tarım ve orman traktörlerinin sürücüsünün nesnelere düşme riskine karşı korunması için ek güvenlik gereklilikleri getirmiştir. Bu direktif Avrupa Birliği direktiflerini uyan bölgelerde satılan traktörlerin OECD kod 10'un performans gerekliliklerine uyması gerektiğini belirtir. FOPS'un koruma yeterliliği düşen cismin ağırlığına ve düşme yüksekliğine bağlıdır. Koruyucu yapı düşen ağırlığın kinetik enerjisini çarpma esnasında deforme olarak emer. FOPS testi, 45 kg ağırlığındaki düşen metalik bir küre ile yapı arasındaki etkiyi analiz etmekten oluşur. Çarpma anında, düşen kürenin enerjisi 1365 J'e ulaşmalıdır. Avrupa direktifi 2009/104/EC'ye göre, düşen cisimler nedeniyle risk oluşturan iş ekipmanı, bu riske karşılık gelen uygun güvenlik cihazlarıyla donatılmalıdır [30]. Traktörün ormancılık faaliyetlerinde kullanılabilmesi için OECD kod 10'a göre FOPS testinden geçmesi gerekir.

FOPS testi, ROPS testinde olduğu gibi, hava şartları vb durumlarda operatör tarafından sökülen FOPS'un mukavemetine olumlu yönde etki eden parçalar test sırasında çıkarılır. Düşme testi cismi (gülle), 1365 J'lik enerjiyi oluşturmak için yeterli bir yükseklikten düşürülen küresel bir cisim olmalıdır. Deney cisminin (gülle) çarpma yüzeyi deney sırasında deforme olmamalıdır. FOPS ya traktör üzerine bağlı olarak ya da operatörün güvenliğini test edecek traktörden bağımsız sadece FOPS olarak, düşen cisim testine tabi tutulur. Serbest bırakılan cisim deformasyonun en fazla olacak şekilde, operatörün oturma merkezi olan koltuk indeks noktasının (SIP), FOPS'taki iz düşüm noktasına bırakılır [30].

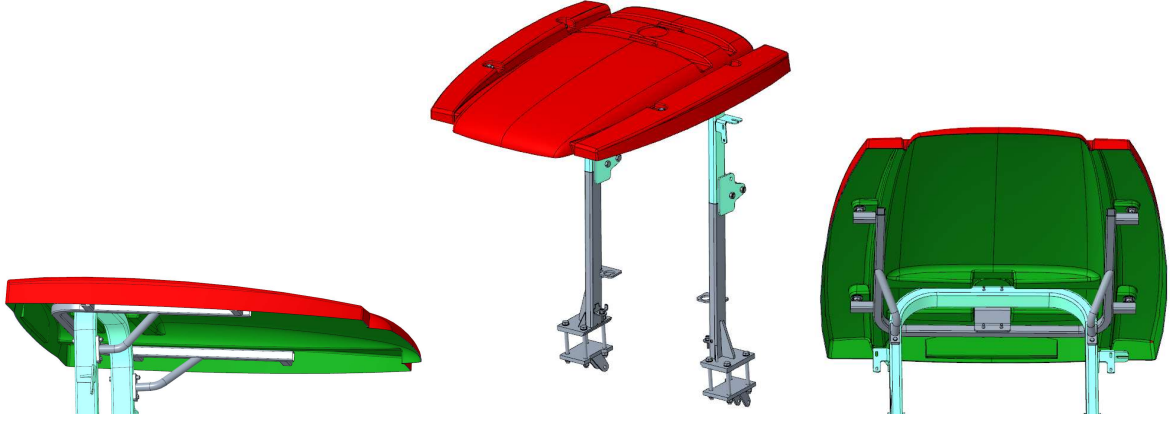
FOPS'un koruyuculuk düzeyini, darbeye karşı dayanım kabiliyeti belirler. FOPS, DLV adı verilen OECD kod 4'te tanımlanan operatörün oturur pozisyonundaki hacminin, düşeydeki izdüşümünü tamamen kapsamaludur [31]. Yani FOPS, kuş bakışında operatörün üzerini tamamen kapatacak şekilde olmalıdır. Deney cisminin ilk ve takip eden darbeleri altında koruyucu yapının herhangi bir parçası DLV içine girmemelidir. Deney cismi FOPS'un içine girmişse, FOPS'un testten geçmediği kabul edilir [30].

Çalışmanın konusu olan FOPS'un güvenlik testi, Şekil 2.25'deki Hattat 3000 serisi traktörde gerçekleştirilmiştir. Bu traktörün üzerinde devrilmeyi önleyici bir adet metal malzemenen yapılan ROPS ve üstten gelecek cisimlere karşı korumak için SMC-R25 malzemenen yapılmış, ROPS a montaj edilmiş bir FOPS vardır. Ancak traktör OECD kod 10 testine tabi olmamıştır. Traktör sadece zirai ve nakliye işlemlerinde kullanıma uygundur. Ormancılık faaliyetleri için OECD kod 10 testini uygulayıp başarılı olması gerekmektedir.



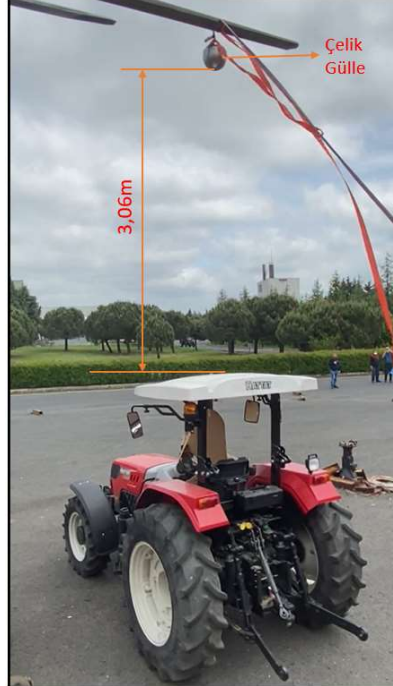
Şekil 2.25. FOPS testinde kullanılacak olan Hattat C 3065 traktör

Traktörün üzerinde bulunan FOPS, SMC-R25 malzemenen yapılmıştır. Boyu 1452 mm eni 1571 mm dir, kalınlığı ise 3,5 mm dir. Şekil 2.26'de görüldüğü üzere FOPS'u ROPS'a bağlayan çelik konstrüksiyon, SMC malzemenen yapılan FOPS'a beş noktadan M16 cıvata ile tutturulmuştur. Kütleinin düşeceği orta bölge ise tamamen desteksizdir. FOPS ve 40X40 mm' lik profil iskelet, 6 adet M10 cıvata ile ROPS a bağlanmıştır.



Şekil 2.26. FOPS testinde kullanılacak olan Hattat C 3065 traktör

Hattat 3080 traktörüne uygulanan FOPS testi, Şekil 2.27’de gösterilen düzenek sayesinde gerçekleştirilmiştir. Çelik gülle OECD kod 10’a uygun olarak darbeyi noktasal uygulaması için güllenin ön yüzeye küresel bir form verilmiştir. Çelik güllenin FOPS’un üzerine düşeceği noktayı belirlemede, operatör koltuğunun merkezi olan SIP noktasının FOPS’un üzerindeki iz düşümü alınmıştır. OECD kod 10 standardında belirlenen 1365 J’lük çarpma enerjisinin elde edilmesi için 45 Kg’lık gülle 3,06m’lik yüksekliğe Şekil 2.27’deki gibi çıkarılmıştır. Belirtilen yükseklikten serbest bırakılan cismin FOPS’a çarpması ile birlikte yapı üzerinde oluşan hasar OECD standartlarında belirtilen DLV bölgesine girişim yapmamalıdır.

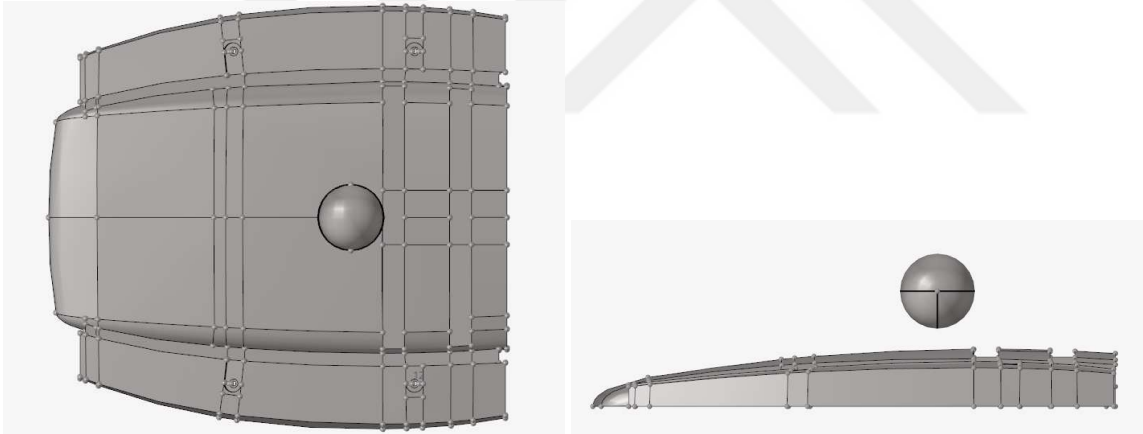


Şekil 2.27. OECD kod 10’a göre FOPS testi

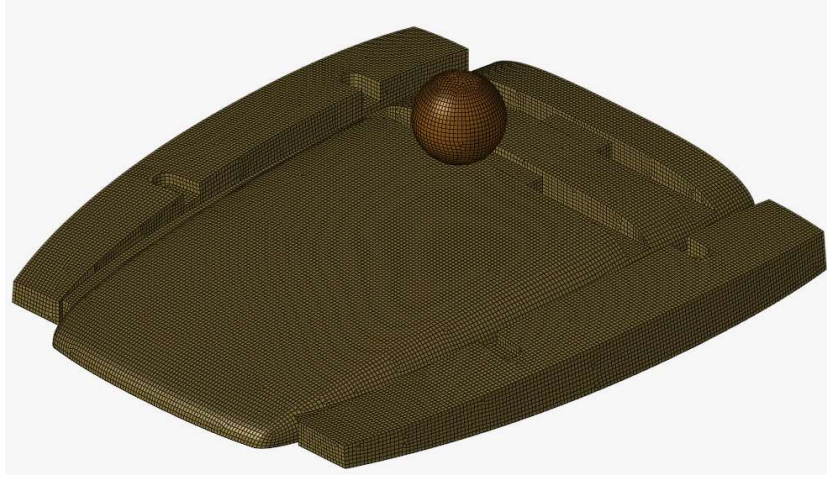
Çelik gülle OECD kod 10'a uygun olarak darbeyi noktasal uygulaması için güllenin ön yüzeye küresel bir form verilmiştir. Çelik güllenin FOPS'un üzerine düşeceği noktayı belirlemede, operatör koltuğunun merkezi olan SIP noktasının FOPS'un üzerindeki iz düşümü alınmıştır.

Bu çalışmada SMC malzemesine sahip FOPS'a, çelik güllenin serbest düşme hareketi ve oluşan çarpmanın etkileri, SEY ile ağ örme işlemi yapan Hyperworks ve explicit çözücü olan Radioss 2021 programı ile incelenmiştir.

Hyperwroks programı ile sonlu elemanlar analizi yapılacak olan çelik gülle ve FOPS'un 3D (üç boyutlu) model genel görünüşü Şekil 2.28'de verilmiştir. Çelik gülle ve FOPS'un Hyperworks içinde oluşturulan mesh yapısı Şekil 2.29'deki gibidir. Simülasyonlarda kullanılmak üzere, SMC-R25, SMC-R65 ve S235JR malzemeleri tanımlanmıştır. Simülasyon sonuçlarında, OECD kod10'da tanımlanan, çelik güllenin düşeceği SIP'nin FOPS'a olan iz düşümü bölgesindeki hasara bakılarak, deneyler sonucu ya da literatür taramasında elde edilen sınır değerlerinin aşıp aşmadığına bakılmıştır.



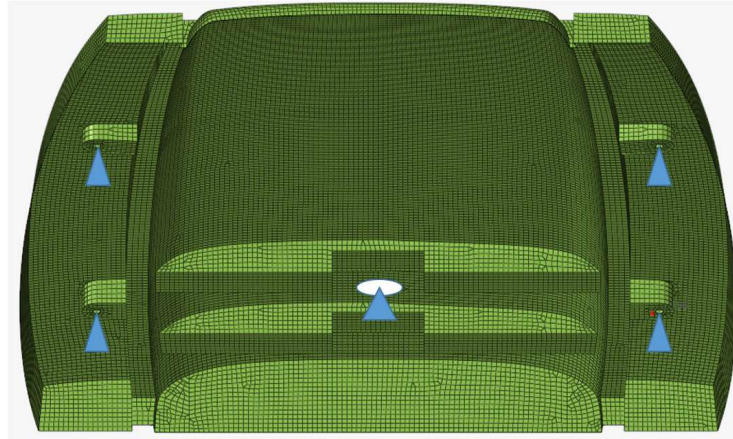
Şekil 2.28. Hyperworks programı ile analiz yapılacak 3D modelin genel görünüşü



Şekil 2.29. FOPS ve çelik güllenin mesh yapısı

FOPS quad kabuk mesh ile kenar uzunluğu 10mm olan 31164 adet ağ elemanı ile örülmüştür. Aynı şekilde gülle 1903 adet quad kabuk mesh ile kenar uzunluğu 10mm ağ elemanı ile örülmüştür.

Şekil 2.30'de görüldüğü gibi FOPS'un, ROPS a bağlanan deliklerine tüm yönler için hareket serbestliği sıfır olan ankastre mesnetler tanımlanmıştır. Şekil 2.31'de gösterildiği üzere çelik güllenin çarpma anındaki maksimum hız çözüme sabit olarak girilmiştir (initial velocity 7,789 m/sn).

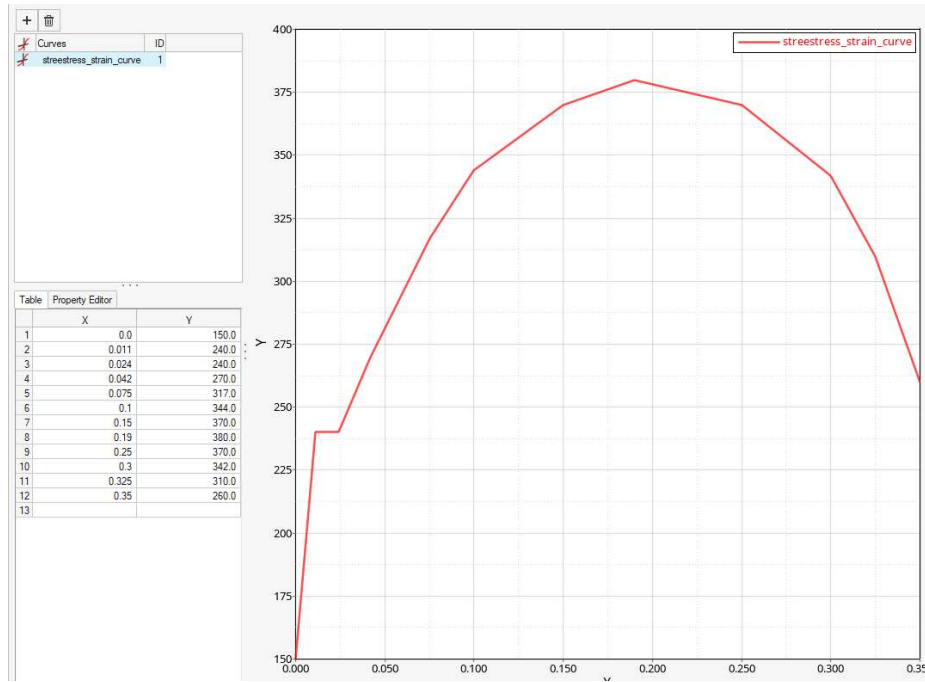


Şekil 2.30. FOPS'un mesnet noktaları



Şekil 2.31. Çelik Güllenin çarpma hızı (mm/sn)

SMC-R25, SMC-R65 malzemeleri için Tsai-Wu kriterine uygun Law 25 malzeme kartı ve Chang-Chang Hasar kriteri kartı seçilmiştir. Kartlara sınır değer olarak Çizelge 2.4. ve Çizelge 2.5.'deki değerler girilmiştir. S235JR(ST 37) malzeme için gerilme-gerinme eğrisini referans alan elasto-plastik malzeme kartı olan Law M36 kartı seçilmiştir. ISO 6892-1 göre yapılan çekme testinden elde edilen S235JR(ST 37) için gerilme-gerinme eğrisi Şekil 2.32'deki gibidir.



Şekil 2.32. S235JR(ST 37) için gerilim-gerinim eğrisi

2.5. Radioss Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Açık Çözüm

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), mühendislik ve matematiksel modellerde sıklıkla kullanılan bir sayısal analiz yöntemidir. SEY; yapı statiği, ısı aktarımı, akışkanlar mekaniği, kütle aktarımı ve elektrik potansiyeli problemlerinde kullanılır. Yöntem, özellikle iki veya üç boyutlu kısmi diferansiyel denklemleri ve sınır değer problemlerinin çözümünde uygulanır [32].

Bir sistemin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi sonlu elemanlar analizi (FEA) olarak bilinmektedir. Yöntem ilk kez 1940'lı yıllarda öne sürülmüş ve 1950'li yıllarda uçak tasarımlarında kullanılmaya başlanmıştır [33]. Yöntemin esas amacı probleme konu olan yapının belirlenen sınır şartlar altında sonlu elemanlar adı verilen küçük parçalara bölünmesi ve diferansiyel denklemler vasıtasıyla bu sonlu elemanları analiz ederek problemin çözülmesidir.

SEY problemlerinde, problemin yapısı zamana bağlı ve zamandan bağımsız olarak ikiye ayrılır. Bu problemleri çözmek için genellikle implicit (kapalı) veya explicit (açık) yaklaşımlar kullanılır. Eğer analiz içerisinde ivme ve hızın bir önemi var ise explicit (açık) yaklaşımlardan yararlanır. Örneğin bir düşme testinde düşen cisim durma noktasına yaklaştığında, uygulayacağı maksimum kuvvet mili saniyeler içerisinde gerçekleşir. Bu örnekteki problemde zamana bağlı hız değişimleri önemlidir.

$$[m] \left\{ \frac{d^2 u}{dt^2} \right\} + C \left\{ \frac{du}{dt} \right\} + K\{U\} = \{F_{\text{ext}}(t)\} \quad (2.3)$$

Burada M kütle matrisidir, C sönümleme matrisi ve K rijitlik matrisidir. Denklem (2.3) konum, hız ve ivmenin ilk duruma göre değişimlerini saptamaktır. Analizinin değerlendirilmesi için gerekli olan sonuçlar (gerilme, gerinme, plastik deformasyon, kontak kuvvetler, enerji sönümleme gibi büyüklükler) bu değişimlerden saptanır.

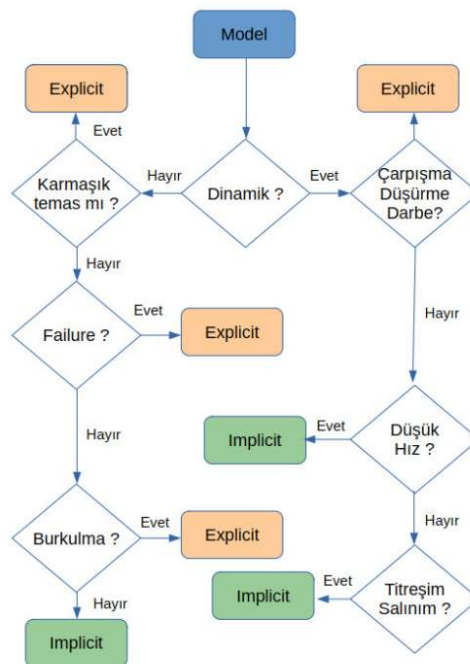
Kapalı (implicit) çözümde yer değiştirme zamandan bağımsızdır. Denklem (2.3)'te hız ve ivmenin türevi kapalı çözümlerde sıfır olmaktadır. Genelde Newmark yöntemi, Newton Raphson yöntemleri kullanılır. Doğrusal olmayan kapalı analizlerde her (t) zaman adımında, çözümün belirli bir tolerans içerisinde olduğunu kontrol etmek için bir dizi iterasyon yapılır. Kapalı yöntemde çözüm yapılırken rijitlik matrisinin tersi alınarak çözüm gerçekleştirilir.

Bazen bu matrisler çok büyük olup terse çevirme işlemleri uzun zaman ve işlem gücü gerektirmektedir. Rijitlik matrisi büyüdükçe tersini alabilmek için gereken zaman, işlem ve donanım gücü de artmaktadır [34].

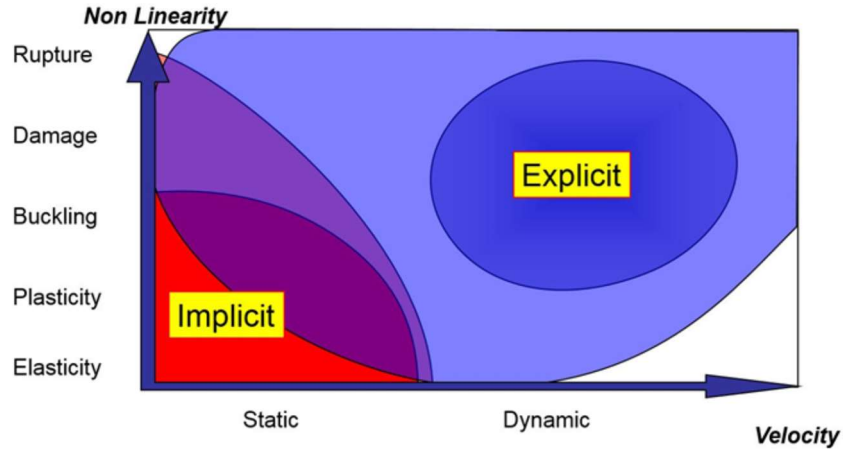
Zamana bağlı olmayan analizleri çözmek için (örn: yapısal statik, harmonik, modal analiz vs.) kapalı çözümler kullanılırken; çarpışma, patlama gibi kısa zamanda yüksek deformasyonların gerçekleştiği durumlarda açık (explicit) çözümler kullanılmaktadır. Açık çözüme konu olan problem genellikle 1 sn'den daha kısa sürer. Gerilme dalgası yayılımı, çarpma veya hızla değişen zamana bağlı yüklerin oluşturduğu problemlere açık çözüm uygundur.

Explicit çözümde, rijitlik matrisinin tersinin alınmasına gerek yoktur. Problem analizinde, kapalı çözümde olduğu gibi iterasyon alınmasına ihtiyaç yoktur. Oysa kapalı çözümlerde ise çözümün doğruluğu için bir dizi iterasyon gerçekleştirilir. Analiz modeli içinde hatalı elemanın bulunup silinmesi yapının bozulmasına neden olmaz.

Analiz yaparken hangi çözücü kullanmamız gerektiğini bilmemiz gerekir. Şekil 2.33' teki şemayı takip edilmesi ve Şekil 2.34'deki grafik karar almaya yardımcı olabilir. Çünkü çözüm için uygun çözücünün seçilmesi vakanın doğru sonuca ulaşması için son derece önemlidir. Kapalı ve açık çözüm için avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.6. verilmiştir.



Şekil 2.33. Kapalı veya açık çözüm için seçim şeması [35]

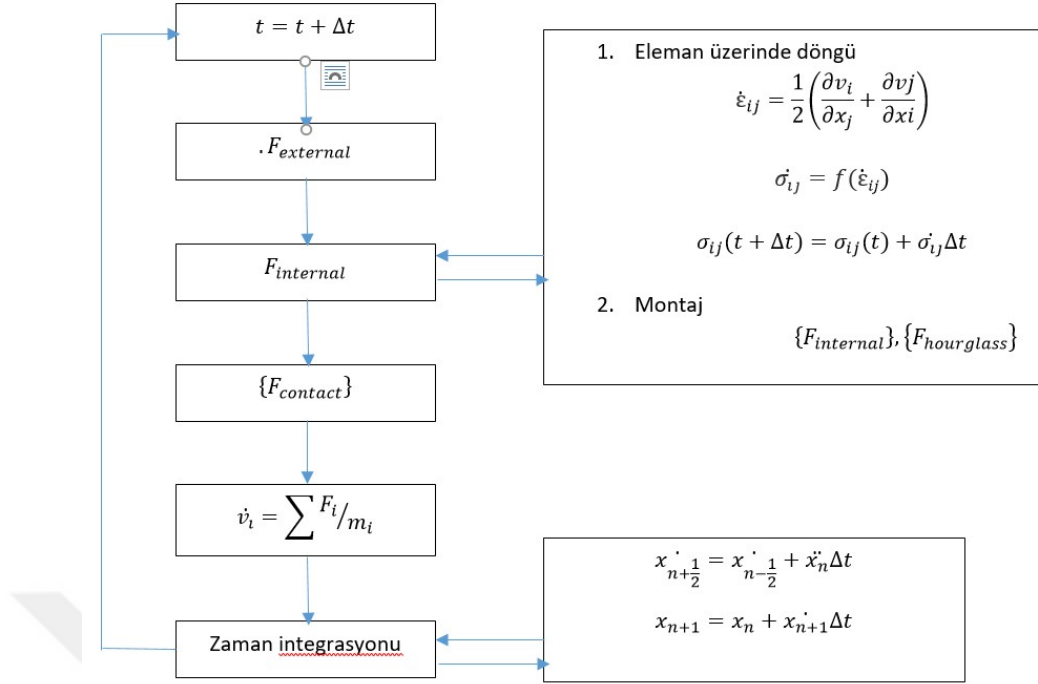


Şekil 2.34. Sayısal yöntem seçimi ile hız değişiminin analiz çözücüsüne etkisi [36]

Çizelge 2.8. Açık ve kapalı çözümlerin artı ve eksi yönleri [36]

Açık (explicit)	Kapalı (implicit)
(-) Koşullu Kararlılık	(+) Her zaman Karalı
(-) Küçük Δt (μs)	(+) Geniş Δt (ms)
(+) Doğruluk	(+) Doğruluk
(+) Diagonal Matris	(-) Non Diagonal Matris
(+) Düşük Hafıza	(-) Yüksek Hafıza
(+) Dinamik ve Şok Problemler	(+) Dinamik ve Statik Problemler
(+) Eleman Eleman Metod Lokal çözüm	(-) Global Çözüm
(+) Düşük Maliyet Düşük bellek ve işlemci kullanımı	(-) Yüksek Maliyet Yüksek bellek ve işlemci kullanımı

Açık çözümde, zaman belirli t aralığına bölünür. Her zaman aralığının girdisi, bir önceki zamanın çıktısıdır. $t+1$ zamandaki çözümün girdisi t zamanındaki çözümdür. Bu çevrim, problemin toplam zamanı boyunca devam eder. t adım miktarı ne kadar artar ise çözümün doğruluk derecesi artacaktır. Ancak çözüme ulaşmak için harcanan enerji ve zaman da artacaktır. Açık çözümün matematiksel olarak ifadesi Şekil 2.35 ve aşağıdaki denklemler (2.4-2.11) ile açıklanmaktadır.



Şekil 2.35. Açık çözümde zamana göre işlem

Burada eğer $\Delta t < \Delta t_{critical}$ ise çözüm stabildir.

Düğüm noktası üzerindeki döngü aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\ddot{x}_n = \frac{f_{ext}(t_n) - f_{int}(t_n)}{m} \quad (2.4)$$

$$x'_{n+1/2} = x'_{n-1/2} + \ddot{x}_n \Delta t \quad (2.5)$$

$$x_{n+1} = x_n + x'_{n+1} \Delta t \quad (2.6)$$

Ağ elemanı üzerindeki döngü:

a. Gerinme

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \rightarrow \varepsilon_{n+1} = \frac{x_2^{n+1} - x_1^{n+1}}{l_0} - 1$$




$$(2.7)$$

b. Gerilme

$$\sigma = E\varepsilon \rightarrow \sigma_{n+1} = E\varepsilon_{n+1} \rightarrow \sigma_{n+1} = E \left[\frac{x_2^{n+1} - x_1^{n+1}}{l_0} - 1 \right] \quad (2.8)$$

Düğüm kuvvetleri:

$$f_1^{n+1} = -A\sigma^{n+1} \quad (2.9)$$

$$f_2^{n+1} = -A\sigma^{n+1}$$


Düğümelerde oluşan kuvvet:

$$f_i(t_{n+1}) = \sum_j f_j(t_{n+1}) \quad (2.10)$$


Düğüm üzerindeki döngü:

$$\ddot{x}_{n+1} = \frac{f_{ext}(t_{n+1}) - f_{int}(t_{n+1})}{m} \quad (2.11)$$

Altair RADIOSS, doğrusal olmayan geçici dinamikler için yeni nesil kapalı ve açık sonlu eleman çözücüsüdür. Bu çok disiplinli çözücü; çarpışma, çarpma, güvenlik, üretilebilirlik konularında verdiği doğru analiz sonuçları vasıtasıyla üreticilere yeni ürünlerin pazara daha hızlı sunmalarına imkân tanır. Çok sayıda malzeme ve hata modeliyle karmaşık doğrusal olmayan davranışı çözmek için donatılmıştır. Radioss, akışkan yapısı etkileşimi ve patlama simülasyonu için çoklu fizik yeteneklerine sahiptir. Sınırlı kapalı çözücü özellikleri yerçekimi dengesini ve Geri Dönüş Analizlerini destekler. Radioss, yapısal ve sistem davranışının simüle edilebildiği çok çeşitli tasarım problemlerini analiz etmek için kullanılır [36].

Radioss'da doğru çözüme ulaşmak için probleme konu olan parçanın malzemesine uygun kartın seçilmesi önemlidir. Aksi takdirde elde edilen sonuç doğru olmaz. Kompozit yapıları tanımlamakta genellikle Law 25 kartı kullanılır. Parçanın geometrisine göre kabuk ve

katı mesh yapıları ile kullanılabilir. Law 25'te, Tsai-Wu ve CRASURV olmak üzere iki adet hasar kriteri seçeneği vardır.

Law 25 kartına girdi olarak çekme, basma yönlerine göre akma sınırları girilir. Law 25'teki hasar kriteri, ortotropik yönlerde maksimum plastik iş veya çekme gerilim değerine dayanmaktadır. Law 25 ile başka bir hasar kriteri kullanılacaksa, ayrıca eklenmelidir. Chang-Chang, Hashin, Puck ve Ladeveze gibi kompozitler için farklı hasar kriterleri mevcuttur [37]. Radioss yardım kılavuzu, kullanıcının Law 15 yerine Law 25'i kullanmasını önermektedir. Dolayısıyla bu projedeki simülasyonlar için Law 25 Tsai –Wu hasar kriteri kullanılmaktadır. İkinci hasar kriteri olarak Chang-Chang kriteri seçilmiştir.

Çalışmada incelen FOPS'un et kalınlığı her yerde aynı olduğundan dolayı kabuk bir yapıya sahip olan Type 9 shell eleman kullanılarak kompozitin sayısal modeli oluşturulmuştur. LAW 25 kartı içerisinde bulunan plastik iş ve gerilmenin fonksiyonu olan Tsai-Wu ile Chang-Chang hasar kriteri seçilerek gerekli simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada materyal olarak kullanılan Law 25 kartı Denklem (2.12-2.33) formülleri ile açıklanmaktadır.

Elastik fazda, ortotropik malzemeyi tanımlamak için 2 elastisite modülü (E_{11}, E_{22}), 1 kayma modülü (G_{12}) ve iki Poisson oranı (ν_{12}, ν_{23}) olmak üzere beş parametre gereklidir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ & -\frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ & & -\frac{1}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{2G_{12}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

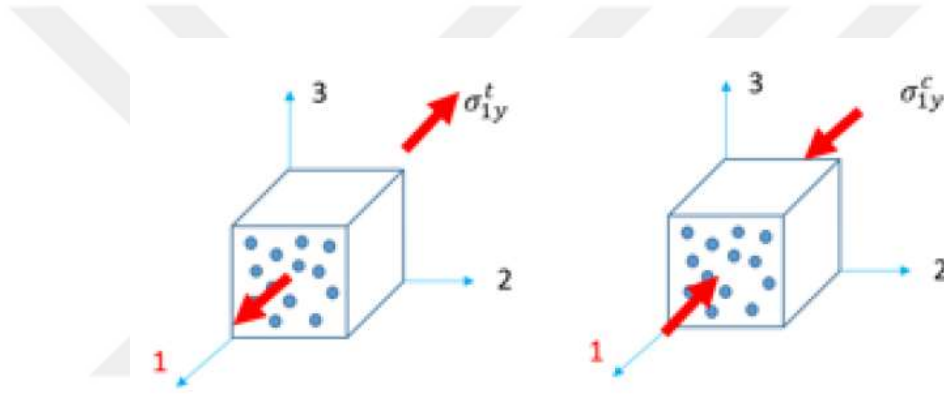
Tsai-Wu hasar kriteri LAW25'te aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$I_{\text{form}} = \mathbf{0}: \text{Tsai} - \mathbf{Wu} \left(F(\sigma) \leq F(W_p, \dot{\epsilon}) \right)$$

$$F(\sigma) = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{44}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1 \cdot \sigma_2 \quad (2.13)$$

Tsai-Wu, malzemenin hasar kontrolü için, her bir gerilme durumunda, $F(\sigma)$ 'yı $F(W_p, \dot{\epsilon})$ ile karşılaştırır. Bu altı katsayı ($F_1, F_2, F_{11}, F_{22}, F_{44}, F_{12}$) aşağıdaki testlerden elde edilen akma değerleri ile belirlenir.

I. Boyuna çekme/basma testleri (fiber ile aynı yönde olan 1 yönünde):



Şekil 2.36. 1 yönünde çekme ve basma gerilmeleri

$$F_1 = -\frac{1}{\sigma_{1y}^c} + \frac{1}{\sigma_{1y}^t} \quad (2.14)$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_{1y}^c \cdot \sigma_{1y}^t} \quad (2.15)$$

$$F(W_p^*, \dot{\epsilon}) = (1 + b(W_p)^n) \cdot \left(1 + \text{cln} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (2.16)$$

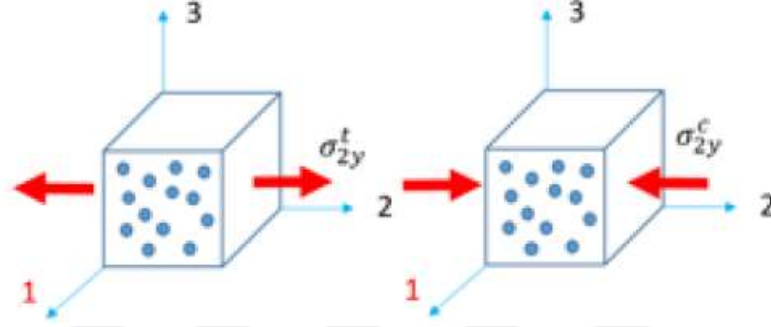
Çekmede plastik iş etkisi:

$$\sigma_{1y}^t(W_p^*, \dot{\epsilon}) = \sigma_{1y}^t \left(1 + b_1^t(W_p)^{n_1^t} \right) \left(1 + c_1^t \text{ln} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (2.17)$$

Basmada plastik iş etkisi:

$$\sigma_{1y}^c(W_p^*, \dot{\varepsilon}) = \sigma_{1y}^c \left(1 + b_1^c (W_p)^{n_1^c}\right) \left(1 + c_1^c \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \quad (2.18)$$

II. Enine çekme/basma testleri (fibere dik olan 2. yönde)



Şekil 2.37. 2 yönünde çekme ve basma gerilmeleri

$$F_2 = -\frac{1}{\sigma_{2y}^c} + \frac{1}{\sigma_{2y}^t} \quad (2.19)$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_{2y}^c \cdot \sigma_{2y}^t} \quad (2.20)$$

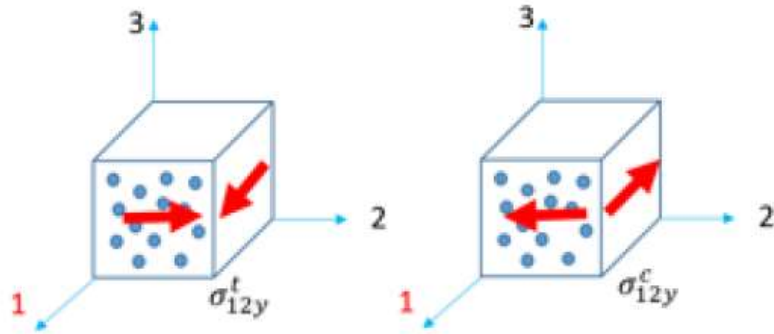
Çekmede plastik iş etkisi:

$$\sigma_{2y}^t(W_p, \dot{\varepsilon}) = \sigma_{2y}^t \left(1 + b_2^t (W_p)^{n_2^t}\right) \left(1 + c_2^t \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \quad (2.21)$$

Basmada plastik iş etkisi:

$$\sigma_{2y}^c(W_p, \dot{\varepsilon}) = \sigma_{2y}^c \left(1 + b_2^c (W_p)^{n_2^c}\right) \left(1 + c_2^c \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \quad (2.22)$$

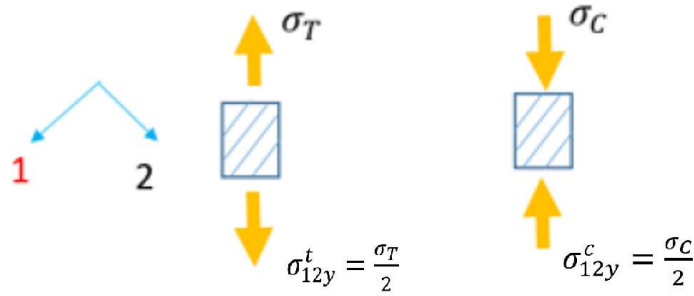
III. Kayma testleri (1-2 düzleminde kayma)



Şekil 2.38. 1-2 düzleminde kayma gerilmeleri

$$F_{44} = \frac{1}{\sigma_{12y}^c \cdot \sigma_{12y}^t} \quad (2.23)$$

σ_{12y}^c ve σ_{12y}^t değerleri numune testlerinden elde edilebilir.



Şekil 2.39. 1-2 düzleminde kayma gerilmeleri çekme testi

Kesmede plastik iş etkisi:

$$\sigma_{12y}(W_p, \dot{\epsilon}) = \sigma_{12} (1 + b_{12}(W_p)^{n_{12}}) \left(1 + c_{12} \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (2.24)$$

σ_{12y} değeri çekme testinden elde edilir

$$F_{12} = -\frac{\alpha}{2} \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}} \quad (2.25)$$

Radioss ta varsayılan redüksiyon faktörü $\alpha=1$ dir.

$$F(W_p, \dot{\epsilon}) = (1 + b(W_p)^n) \cdot \left(1 + c \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right) \quad (2.26)$$

$$F_{12}(W_p, \dot{\epsilon}) = -\frac{\alpha}{2} \sqrt{F_{11}(W_p, \dot{\epsilon}) \cdot F_{22}(W_p, \dot{\epsilon})} \quad (2.27)$$

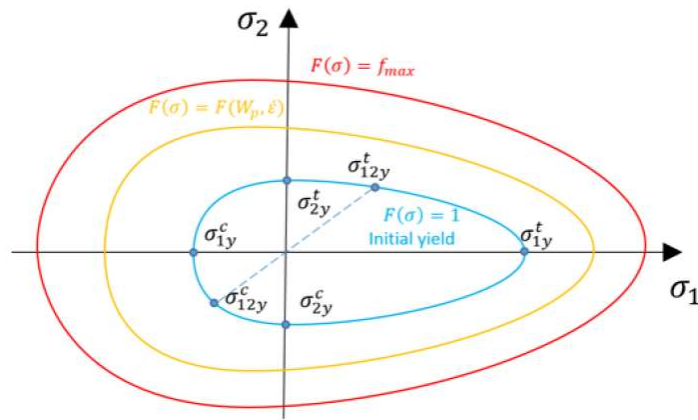
Tsai-Wu'da akma yüzeyini hesaplamak için bağıl plastik iş W_p kullanılmaktadır.

Malzeme elastik durumda ise

$$F(\sigma) \leq F(W_p, \dot{\epsilon}) \quad (2.28)$$

Malzeme plastik durumda ise

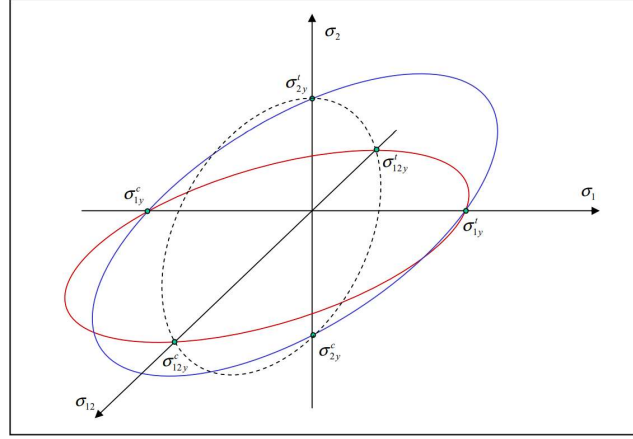
$$F(\sigma) > F(W_p, \dot{\epsilon}) \quad (2.29)$$



Şekil 2.40. Tsai-Wu akma gerilimi sınır eğrileri[36]

$F(W_p^*, \dot{\epsilon})$ Akma stress değeri 1 ile f_{max} arasındadır.

Tsai-Wu kriteri, toplam gerilmenin ve maksimum hasar faktörünün bir fonksiyonudur.

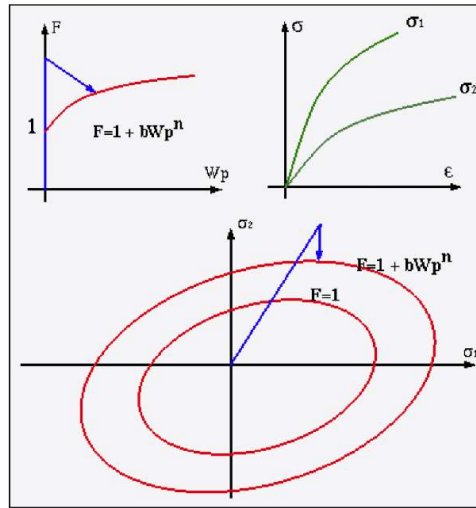


Şekil 2.41. $F(\sigma)=1$ için Tsai-Wu akma yüzeyinin kesitleri [36]

Eğer $F(\sigma) > 1$ ise Denklem (2.32)'i sağlamak için gerilmeler akma yüzeyine yansıtılır. Plastisite bölgede sertleşme esnasında $F(\sigma)$, her plastik iş değerinde W_p , $F(W_p)$ maksimum değeri ile karşılatılır.

$$F(\sigma) = F(W_p) = 1 + bW_p^n \quad (2.30)$$

Plastisite sertleşmesi Şekil 2.42 te gösterildiği gibi izotropiktir.



Şekil 2.42. İzotropik plastisite sertleşmesi [36]

Malzeme, çekme kopma şekil değiştirme sınırı olan ϵ_t 'ye kadar gerildiğinde, hasar faktörleri tabakanın sertliğini düşürmeye başlar. Denklem 2.31, hasar faktörlerinin nasıl hesaplandığını gösterir. Sertlik azaltma, hasar faktörü belirtilen maksimum değerine d_{max} ulaşana kadar devam eder.

$$i = 1,2,3 \text{ ile } \sigma^{\text{reduce}} = \sigma \cdot (1 - d_i) \quad (2.31)$$

Burada d_i hasar faktörüdür. Aşağıdaki gibi formüle edilir.

$$d_i = \min\left(\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{ti}}{\varepsilon_i} \cdot \frac{\varepsilon_{mi}}{\varepsilon_{mi} - \varepsilon_{ti}}, d_{max}\right), i = 1,2 \quad (2.32)$$

$$d_3 = \min\left(\frac{\gamma - \gamma_{ini}}{\gamma_{max} - \gamma_{ini}} \cdot \frac{\gamma_{max}}{\gamma}, d_{3max}\right) \quad (2.33)$$

yön 3'te (delaminasyon)

Delaminasyon kompozit malzemelerde, kompozit yapıyı oluşturan tabakaların birbirinden ayrılmasıdır. Bu malzeme kusuru kompozitin mukavemetini olumsuz etkilere neden olmaktadır. Malzeme içerisindeki veya yüzey kenarlarındaki darbeden kaynaklanan etkiler, geometrik ve malzeme süreksizlik bölgelerindeki gerilme yığılması, kompozit parçaya gelen basma yükleri ile burkulmanın gerçekleşmesi, imalattan kaynaklanan kusurlar ile taşıma, montaj ve servis ömrü sırasında gerçekleşebilecek darbeler delaminasyonun sebepleri arasında sayılabilmektedir [34].

Toplam gerinim $\varepsilon_t < \varepsilon < \varepsilon_f$ arasında ise malzeme yumuşamaya başlar ancak bu hasar tersine çevrilebilir. $\varepsilon > \varepsilon_f$ olduğunda, hasar geri döndürülemez ve $\varepsilon \geq \varepsilon_m$ ise malzemedeki stres 0'a düşürülür.

Hasar elastik veya plastik fazda olabilir. Bu ε_t ve ε_f 'nin hangi fazda tanımlandığına bağlıdır.

Bu çalışmada kullanılan malzeme SMC malzemedir. Bölüm 2.1 de açıklandığı gibi SMC malzemeler tek katmalı bir yapıya sahiplerdir. Reçine içerisinde elyaf kırılmış olarak dağılmıştır. Radioss programından FOPS tanımlanırken, tek katmanlı kompozit yapı olarak girilmiştir.

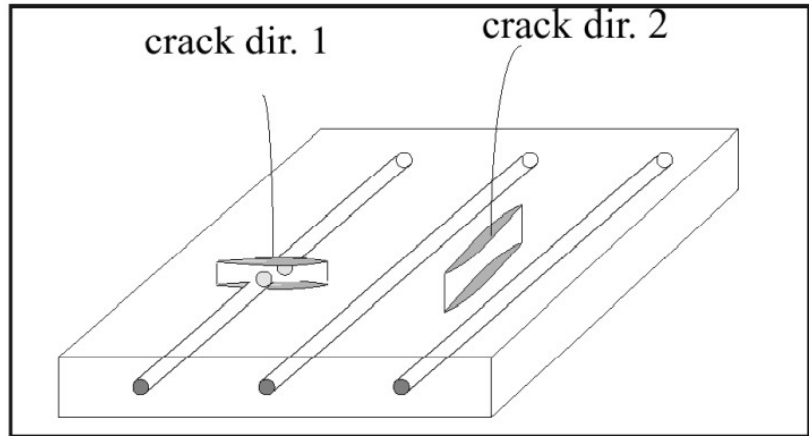
Hasar Durumu:

Tsai-Wu kriterine göre malzeme hasar tahmini iki değişkeninin durumuna göre yapılır.

- Maksimum akma fonksiyonu F_{max}
- Plastik iş limiti W_p^{max}

Yukarıdaki koşullardan biri gerçekleşmesi durumunda hasar meydana gelir. Kriter hem çatlak oluşumunu hem de kırılmayı simüle edebilir. Çatlak Şekil 2.43 te gösterildiği gibi fiber yönünde ve fibere dik gerçekleşebilir. Bir eleman üzerindeki W_p değeri, W_p^{max} 'ın üzerine çıktığında eleman üzerinde hasarın olduğu kabul edilir. Bu durumu hasar meydana gelen elemanı silerek gösterir. Çok katmanlı yapılarda toplam hasar için aşağıdaki sınır durumları kullanıcının tercihine göre dikkate alınır.

- Tek kat için ise, $W_p > W_p^{max}$
- Tüm katmanlar için ise, $W_p > W_p^{max}$
- Her katman için $W_p > W_p^{max}$ veya yön 1'de çekme hasarı varsa
- Her katman için $W_p > W_p^{max}$ veya yön 2 'de çekme hasarı varsa
- Her katman için $W_p > W_p^{max}$ veya yön 1 ve 2'de çekme hasarı varsa
- Tüm katmanlar için $W_p > W_p^{max}$ veya yön 1'de çekme hasarı varsa
- Tüm katmanlar için $W_p > W_p^{max}$ veya yön 2 'de çekme hasarı varsa
- Tüm katman için $W_p > W_p^{max}$ veya yön 1 ve 2'de çekme hasarı varsa



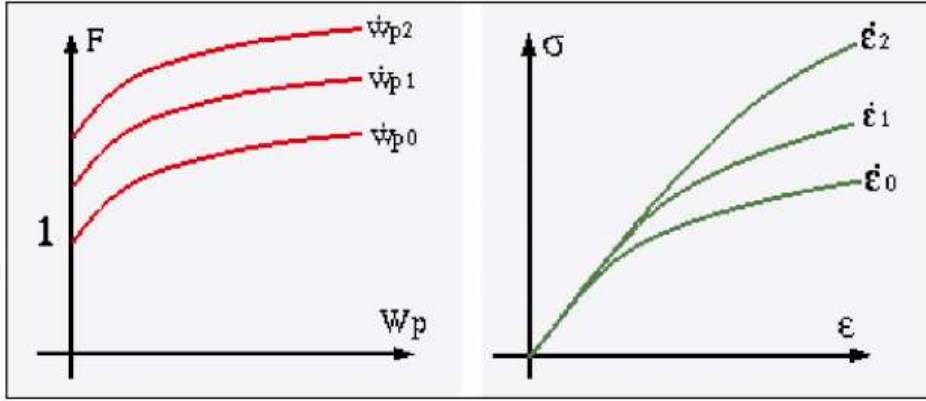
Şekil 2.43. Kırılma Oryantasyonu [36]

Gerinim oran etkisi:

Gerinim oran etkisi denklem 2.16'nın uygulanması ile elde edilir. Denklem sürekli, referans bir gerinim oranı ($\dot{\epsilon}_0$) ile karşılaştırılır.

$$F(W_p, \dot{\epsilon}) = (1 + b(W_p)^n) \cdot \left(1 + c \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right) \quad (2.16)$$

Dinamik etkilerin gerçekleştiği zaman miktarı ne kadar azalır ise Tsai-Wu akma yüzeyinin değeri de artar. Şekil 2.44 gerinim oran etkisi göstermektedir. Çekme testlerinde çekme işlemi hızı artırılırsa akma mukavemetinin değerinde de artış olur. Bu durum malzemeyi daha mukavemetli yapar.



Şekil 2.44. Sertleşme durumunda gerinim oran etkisi [36]

Sonuç olarak Law 25 malzeme kriteri için Radioss'da uygulanan denklemler:

$$F(\sigma) \leq F(W_p, \dot{\epsilon}) : \text{Elastik} \quad (2.27)$$

$$F(\sigma) > F(W_p, \dot{\epsilon}) : \text{Plastik (Nonlinear)} \quad (2.28)$$

$$F(\sigma) = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{44}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1 \cdot \sigma_2 \quad (2.13)$$

Burada F_i değerleri ($i=1,2,11,12,22,44$) aşağıdaki gibidir.

$$F_1 = -\frac{1}{\sigma_{1y}^c} + \frac{1}{\sigma_{1y}^t} \quad (2.14)$$

$$F_2 = -\frac{1}{\sigma_{2y}^c} + \frac{1}{\sigma_{2y}^t} \quad (2.19)$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_{1y}^c \cdot \sigma_{1y}^t} \quad (2.15)$$

$$F_{12} = -\frac{\alpha}{2} \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}} \quad (2.25)$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_{2y}^c \cdot \sigma_{2y}^t} \quad (2.20)$$

$$F_{44} = \frac{1}{\sigma_{12y}^c \cdot \sigma_{12y}^t} \quad (2.23)$$

$$F(W_p, \dot{\varepsilon}) = (1 + b(W_p)^n) \cdot \left(1 + \text{cln} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)\right) \quad (2.16)$$

Sonlu elmanlar yönteminde Hushin kriterinden sonra en fazla kullanılan hasar kriteri olan Chang-Chang hasar kriteri genellikle iki boyutlu kompozit malzemelerde kullanılır. Düşük hızlı darbe deneyleri için uygun olduğundan simülasyonlarda bu kriter seçilmiştir.

Chang-Chang hasar kriteri, kararsızlıklardan kaçınmak için sayısal bir yöntem olarak kullanılarak gerilme bileşenlerini azaltıp hasarın etkilerine odaklanır [37]. Radioss'da law 25 malzeme kartı ile kullanımı uygundur. Altı adet malzeme sınır değeri ($\sigma_1^t, \sigma_2^t, \sigma_1^c, \sigma_2^c, \tau_{12}, \beta$) kullanılan Chang-Chang hasar kriterinin matematiksel eşitlikleri aşağıdaki gibidir.

- 1 yönündeki fiberdeki çekme gerilme değeri $\sigma_{11}^t > 0$ iken

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_1^t}{\sigma_{1y}^t} \right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}^t}{\tau_{12}} \right)^2 - 1 \quad (2.33)$$

olur ve $e_f^2 \geq 0$ ise fiberde hasar olur.

- 1 yönündeki fiberdeki basma gerilim değeri $\sigma_{11}^c < 0$ iken

$$e_c^2 = \left(\frac{\sigma_1^c}{\sigma_{1y}^c} \right)^2 - 1 \quad (2.34)$$

olur ve $e_c^2 \geq 0$ ise fiberde hasar olur.

- 2 yönündeki matristeki çekme gerilim değeri $\sigma_{22}^t > 0$ iken

$$e_{fm}^2 = \left(\frac{\sigma_2^t}{\sigma_{2y}^t} \right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}^t}{\tau_{12}} \right)^2 - 1 \quad (2.35)$$

olur ve $e_{fm}^2 \geq 0$ ise matriste hasar olur.

- İki yönündeki matristeki basma gerilim değeri $\sigma_{22}^c < 0$ iken

$$e_{cm}^2 = \left(\frac{\sigma_2^c}{2\tau_{12}} \right)^2 + \left[\left(\frac{\sigma_{2y}^c}{2\tau_{12}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2^c}{\sigma_{2y}^c} + \left(\frac{\sigma_{12}}{2\tau_{12}} \right)^2 - 1 \quad (2.36)$$

olur ve $e_{cm}^2 \geq 0$ ise matriste hasar olur.

Hasar parametresi 1.0'e eşit veya daha büyükse, sayısal istikrarsızlıkları önlemek için aşağıdaki gibi üstel bir fonksiyon kullanılarak gerilmeler azaltılır.

$$[\sigma(t)] = f(t) * [\sigma_d(t_r)] \quad (2.37)$$

$$f(t) = \exp * \left(-\frac{t-t_r}{T} \right) \text{ ve } t \geq t_r \quad (2.38)$$

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. FOPS Testi

45Kg çelik gülle OECD kod 10'a uygun olarak 3,06 m yükseklikten, operatör koltuğunun SIP noktasının SMC malzemedan yapılmış FOPS üzerindeki iz düşüm noktasına serbest düşme ile bırakılmıştır. Güllenin maksimum hız çarpma esnasında meydana gelmiştir. Denklem (3.1)'de açıklandığı gibi 3,06 m yüksekliğe çıkartılarak 1365 J enerji kazandırılan çelik gülle serbest bırakıldığında 7,789 m/sn lik hıza ulaşır. Bu hızın etkisiyle çarpan çelik gülle Şekil 3.1'deki gibi SMC-R25 malzemedan yapılan, ebatları 1452x1571x3,5 mm olan FOPS'u kırarak DLV bölgesine girişim yapmıştır. 3,5 mm kalınlığındaki SMC-R25, OECD kod 10 testini geçememiştir.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow 1365 = \frac{1}{2}45v^2 \rightarrow v = 7,789 \text{ m/sn} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1. OECD kod 10 testinde çelik güllenin SMC-R25 malzemesi ile çarpışma anı



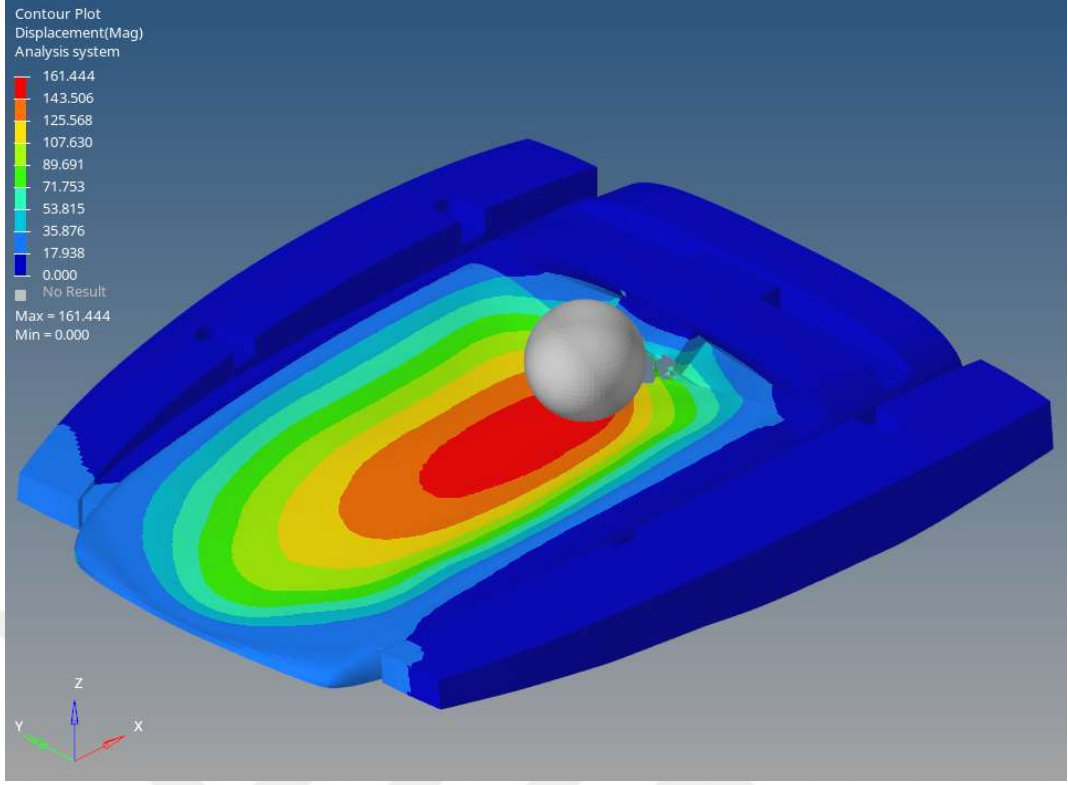
Şekil 3.2. OECD kod 10 testinde, SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'ta oluşan deformasyonlar

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi 3,5 mm kalınlığında SMC-R25 malzemedan yapılan FOPS, ROPS profiline bağlantı noktasının önünden SIP noktasının hemen arkasından kırılarak hasara uğramıştır. Oluşan hasar OECD kod 10 standardı için uygunsuzdur ve böyle bir yapı operatör güvenliği için uygun değildir.

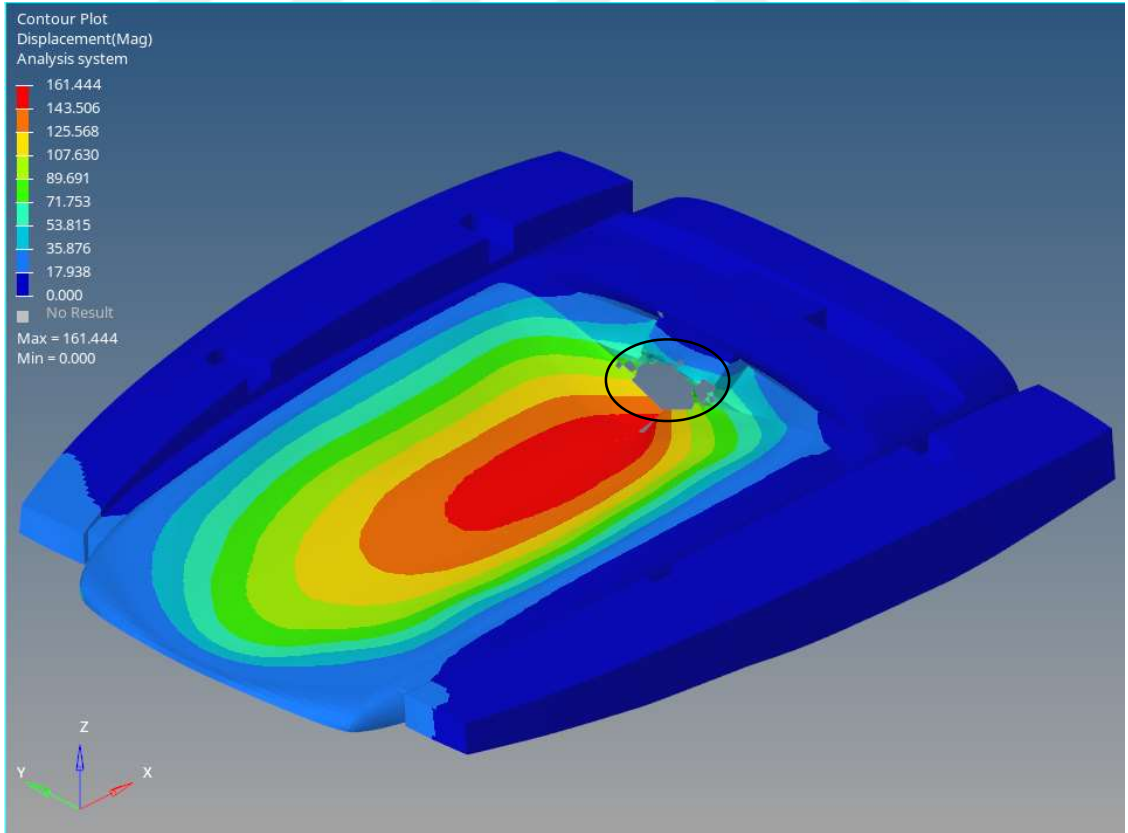
3.2. SMC-R25 İçin Radioss ile Çarpma Simülasyonu

Kısım 2.2'de açıklandığı gibi SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'a üç farklı kalınlık değeri için Radioss programı üzerinden OECD kod 10 testi simülasyonu yapılmıştır. FOPS'un malzeme kartı olarak M25_COMP SH seçilmiş, malzeme sınır değerleri olarak, çekme ve basma testlerinin sonuçları olan Çizelge 2.4'deki değerler girilmiştir. Özellik (Properties) kartı için, kalınlık değeri tüm geometride sabit olduğundan dolayı kabuk (Shell) yapıya uygun ve malzemeye ortotropik özellik kazandıran P9_SH_ORTH seçilmiştir. Bu kart üzerinden bulunan kalınlık (Thickness) değeri olarak sırasıyla 3,5 mm, 7mm, 14mm girilmiştir. Analizler Tsai –Wu (Deplasman, plastik iş) ve Chang-Chang kriterleri ile incelenmiş ve Simülasyon sonuçları Şekil 3.3-3.12'de verilmiştir.

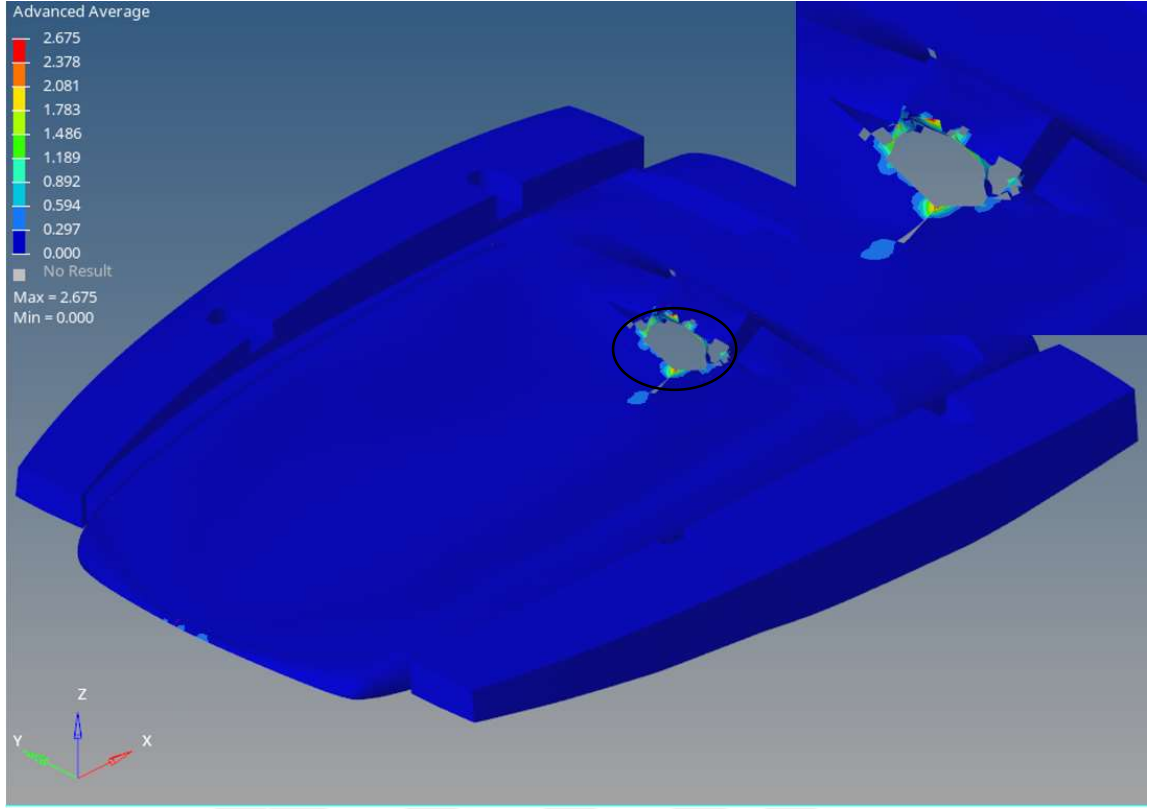
Şekil 3.3 - 3.6 görüldüğü üzere 3,5 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS, OECD kod 10 testi simülasyonunda her iki hasar kriterine göre işaretli kısımdan yırtılarak hasara uğramıştır.



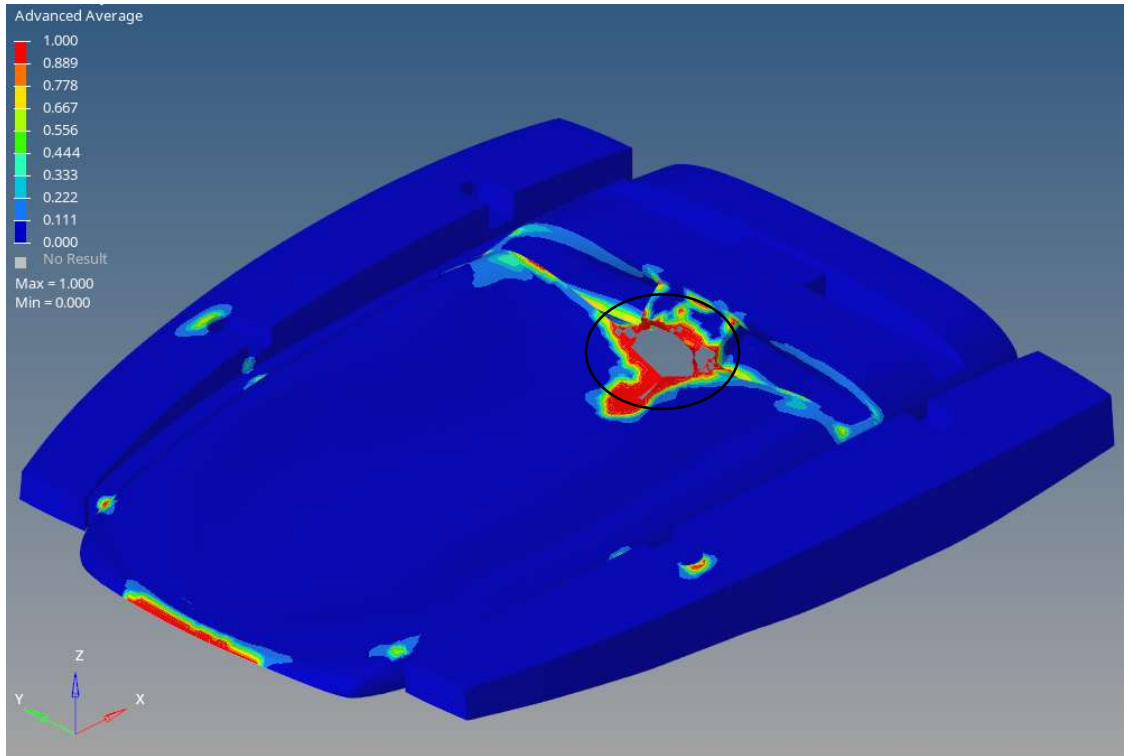
Şekil 3.3. Tsai-Wu hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (gülle ile Deplasman) (mm)



Şekil 3.4. Tsai-Wu hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (gülsüz ile Deplasman) (mm)

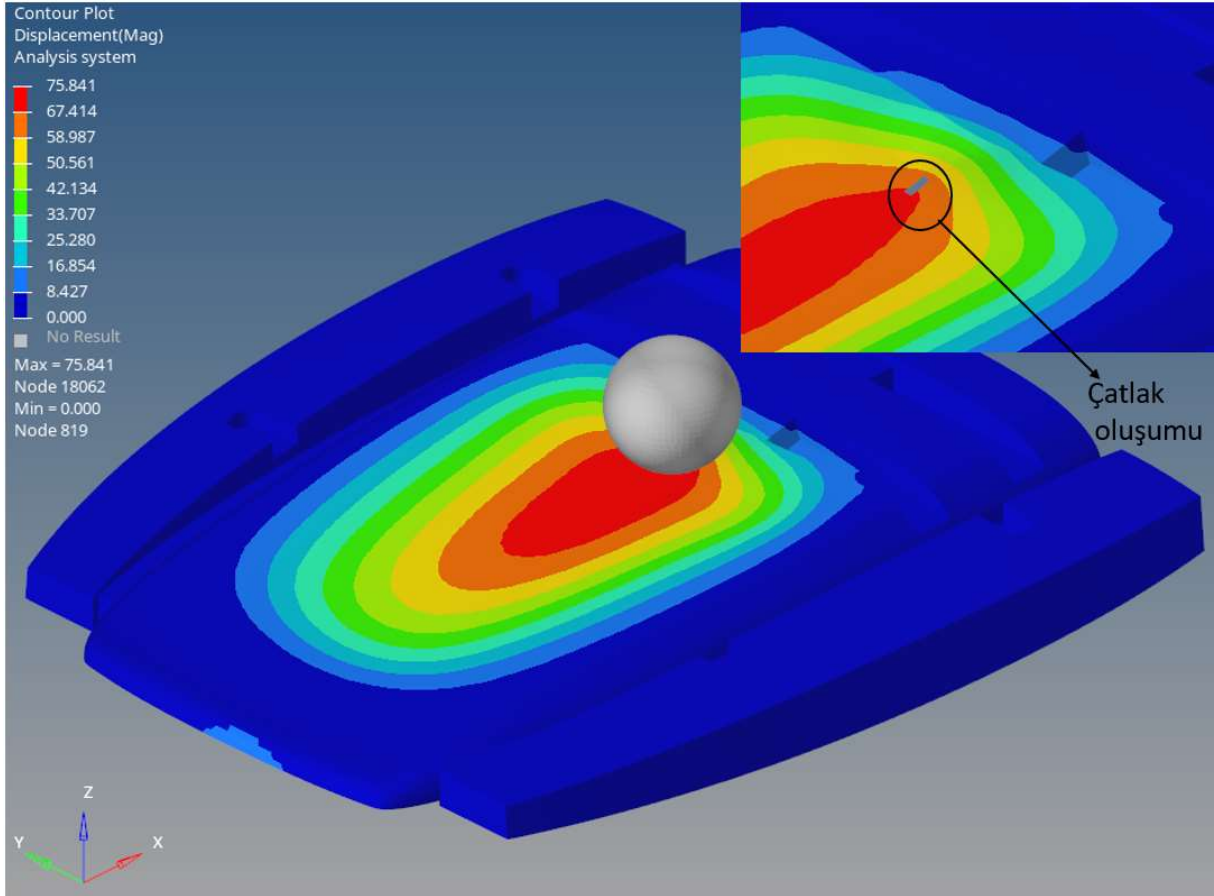


Şekil 3.5. Tsai-Wu hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (Plastik iş)(J/mm^3)

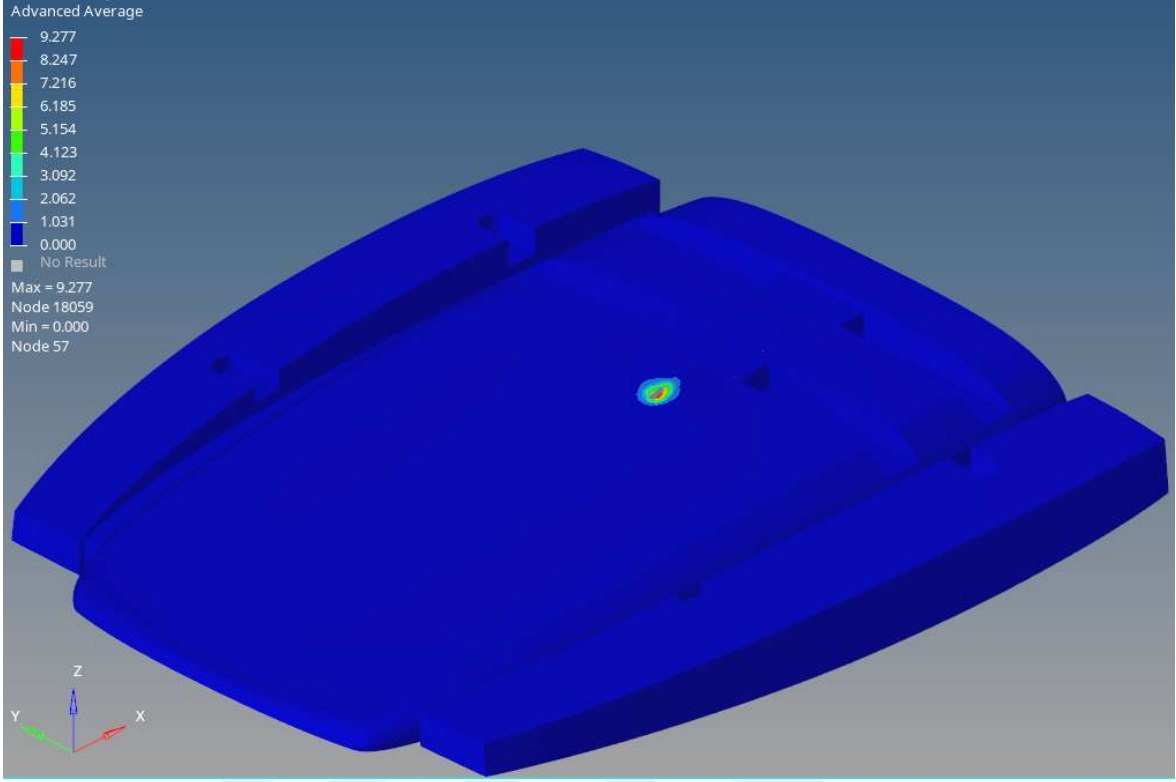


Şekil 3.6. Chang-Chang hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesi sahip FOPS'un simülasyon sonucu

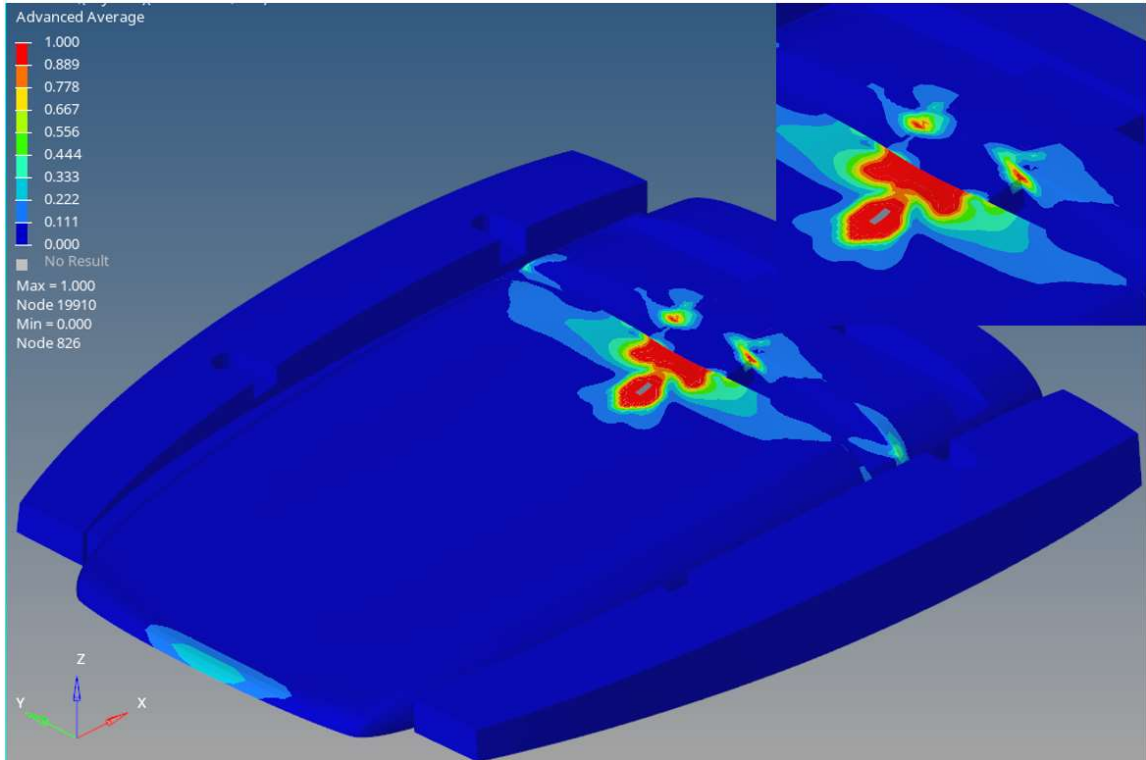
Şekil 3.7-3.9’da görüldüğü üzere 7 mm kalınlıklı SMC-R25 malzemesine sahip FOPS, Tsai-Wu ve Chang-Chang hasar kriterlerine göre Şekil 3.7’de işaretli kısımdan çatlayarak hasara uğramıştır. FOPS’ un kalınlığının 7 mm veya üzerinde olması, FOPS’u yırtmadan FOPS’a çarpıp geri sekmesine neden olmaktadır ve FOPS üzerinde sadece bir çatlak oluşturmuştur. Güllenin çarpması esnasındaki FOPS’ un çökme miktarı, 75 mm’ye kadar azalmıştır.



Şekil 3.7. Tsai-Wu hasar kriterine göre 7 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS’ un simülasyon sonucu (Deplasman)(mm)

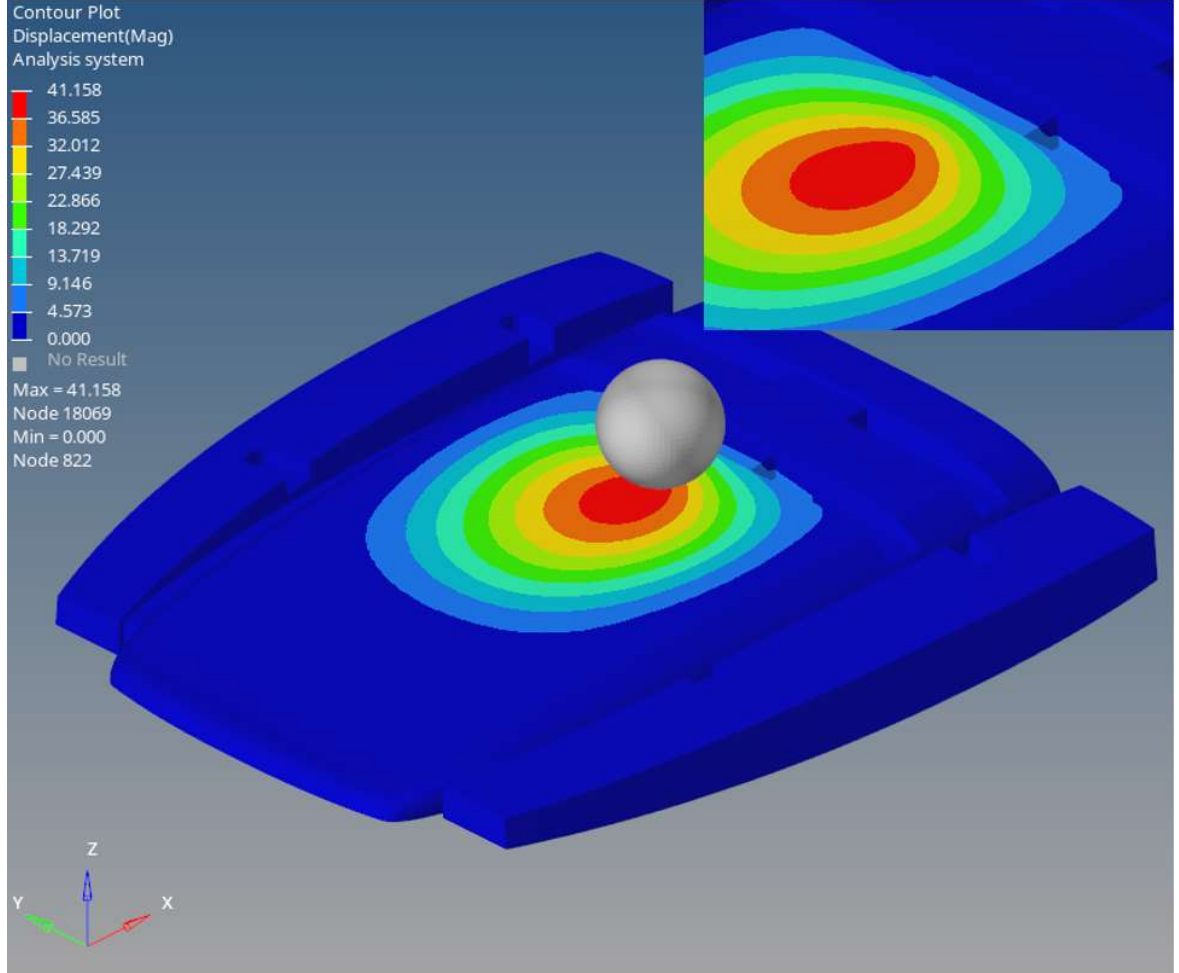


Şekil 3.8. Tsai-Wu hasar kriterine göre 7 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS 'un simülasyon sonucu (Plastik iş)(J/mm^3)

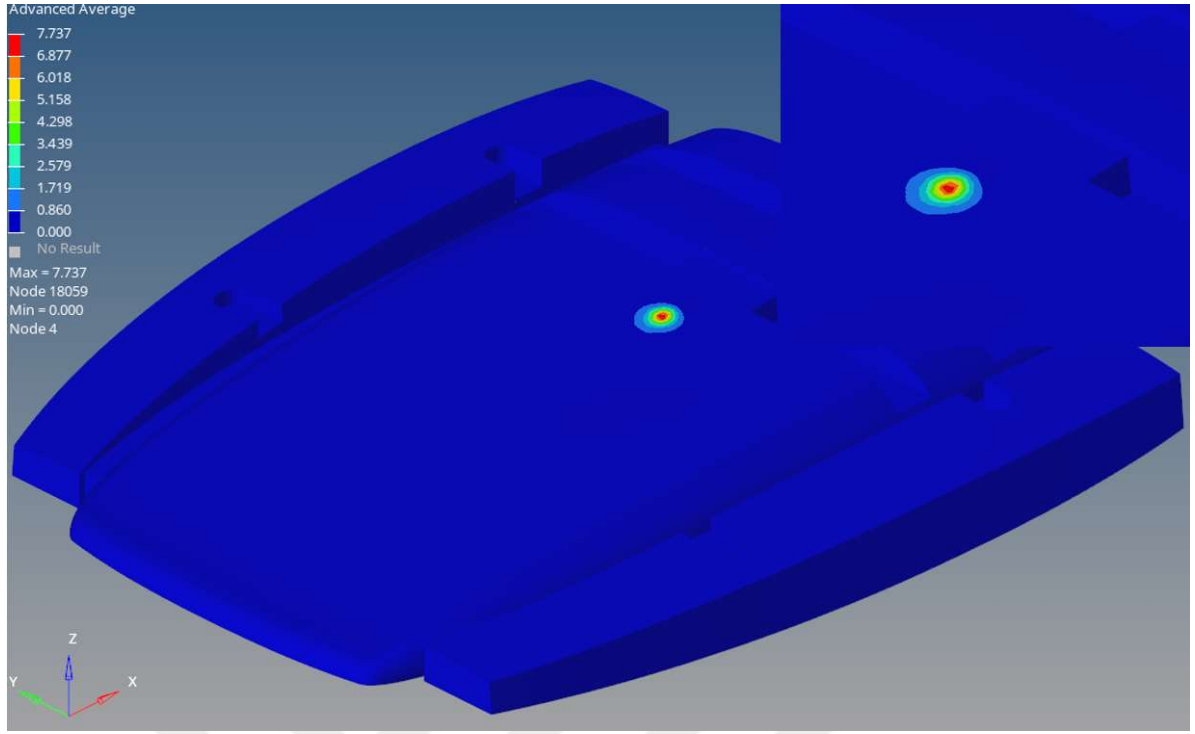


Şekil 3.9. Chang-Chang hasar kriterine göre 7 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS 'un simülasyon sonucu

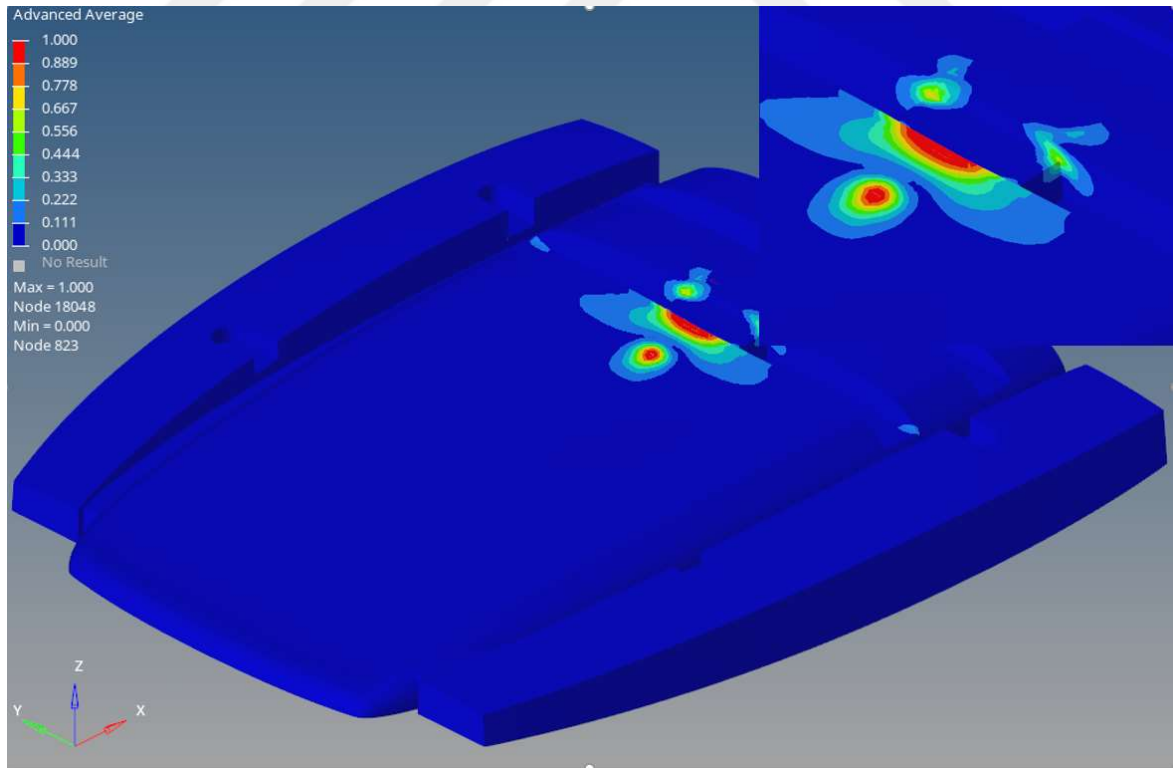
14 mm kalınlıklı, SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un Şekil 3.10-3.12 ile verilen çarpma simülasyonundan görüldüğü üzere her iki hasar kriterine göre FOPS üzerinde herhangi bir çatlak oluşmamıştır. Güllenin çarpma esnasında FOPS'un çökme miktarı 41mm'ye kadar azalmıştır.



Şekil 3.10. Tsai-Wu hasar kriterine göre 14 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (Deplasman)(mm)



Şekil 3.11. Tsai-Wu hasar kriterine göre 14 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (Plastik iş)(J/mm^3)

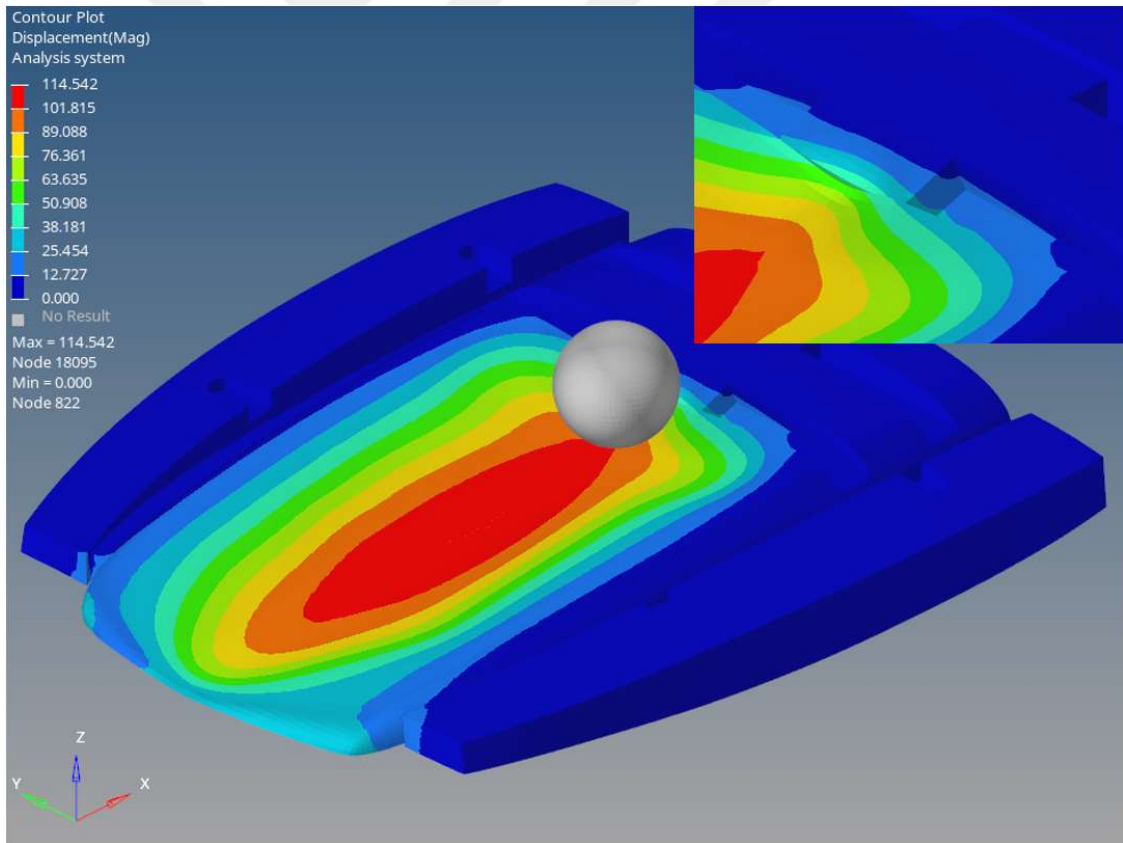


Şekil 3.12. Chang-Chang hasar kriterine göre 14 mm kalınlığındaki SMC-R25 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu

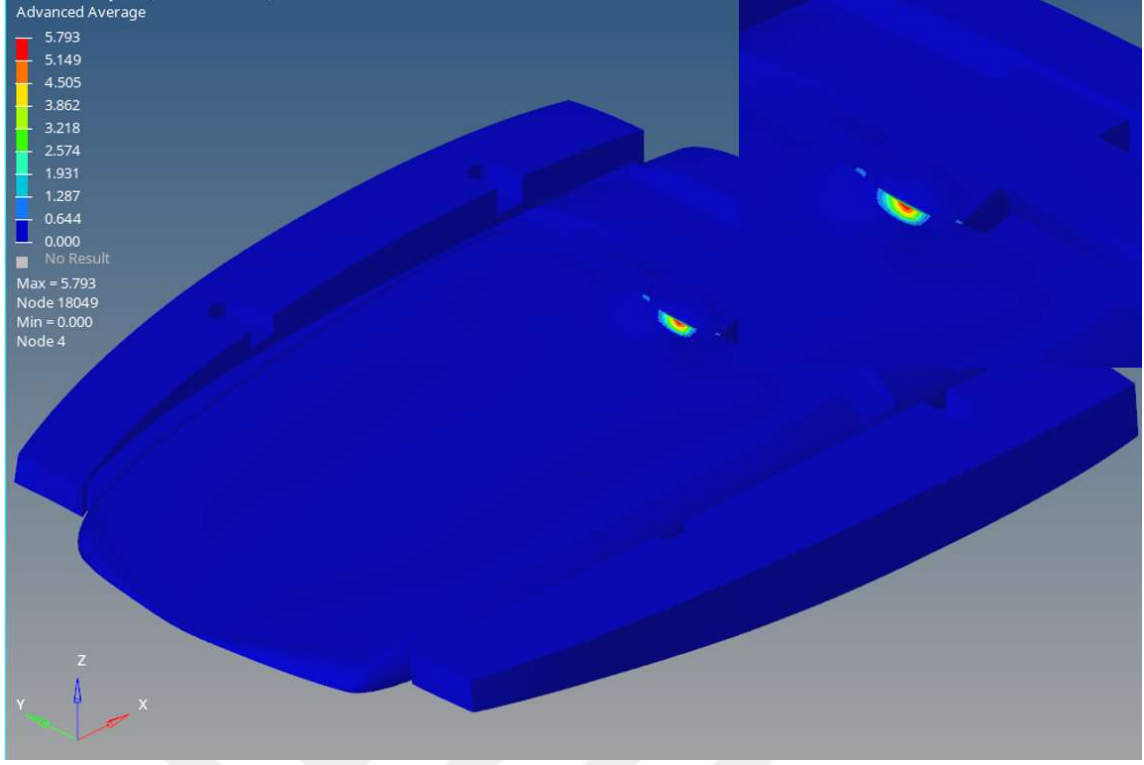
Simülasyon sonucunda SMC-R25 malzemesine sahip ve şekli ve bağlantıları kısım 2.4’te tarif edilen bir yapının, OECD kod 10’a göre kabul edilebilir olması için minimum 14 mm kalınlığa sahip olması gerektiği ortaya çıkmıştır.

3.3. SMC-R65 İçin Radioss ile Çarpma Simülasyonu

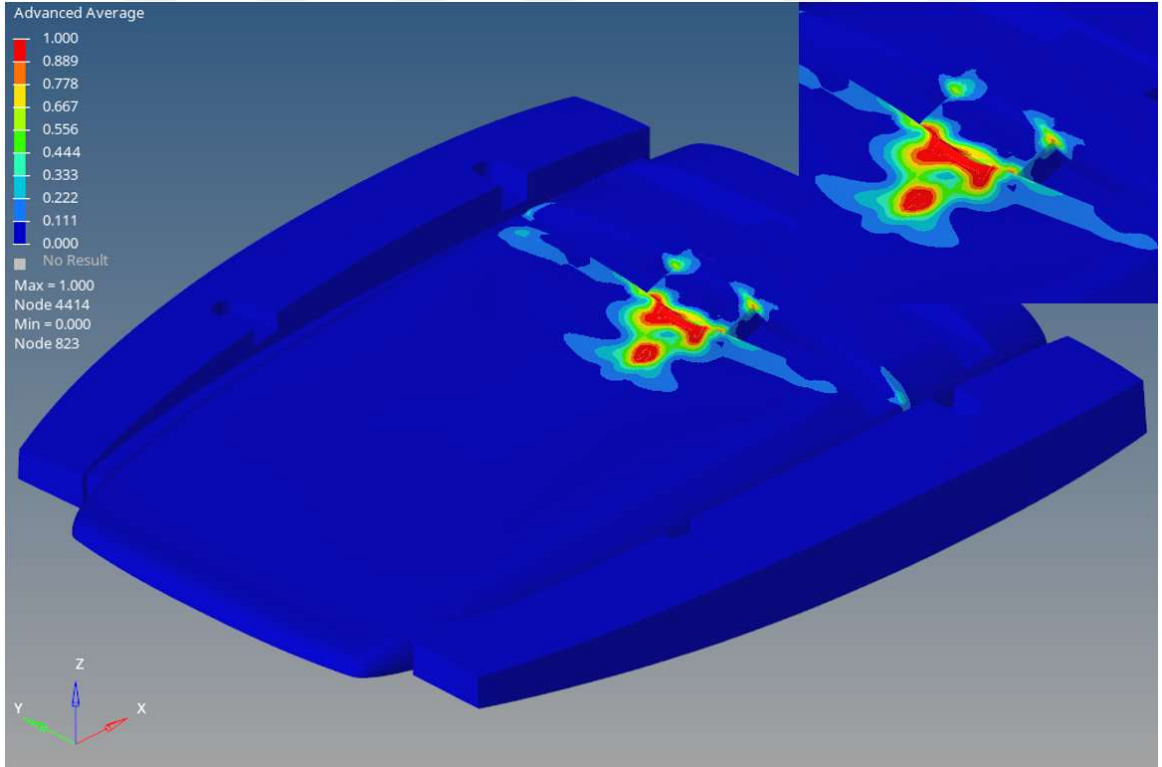
SMC-R65 malzemesine sahip FOPS’a, Radioss programı kullanılarak OECD kod 10 testi simülasyonu yapılmıştır. FOPS’un malzeme kartı olarak M25_COMP SH seçilmiştir. SMC-R65 malzeme için de SMC-R25 için seçilen kabuk (Shell) ve ortotropik yapıya uygun P9_SH_ORTH seçilmiştir. Bu kart üzerinden bulunan kalınlık (Thickness) değeri olarak 3,56 mm girilmiştir. Analiz sonucu Şekil 3.13- 3.15’te görüldüğü üzere çarpma esnasındaki Tsai-Wu deplasman, plastik iş ve Chang-Chang hasar kriteri ile incelenmiştir. Tsai- wu ve Chang-Chang hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki SMC-R65 malzemesine sahip FOPS, OECD kod 10 testini geçmiştir.



Şekil 3.13. Tsai-Wu hasar kriterine göre 3,56 mm kalınlığındaki SMC-R65 malzemesine sahip FOPS’un simülasyon sonucu (Deplasman) (mm)



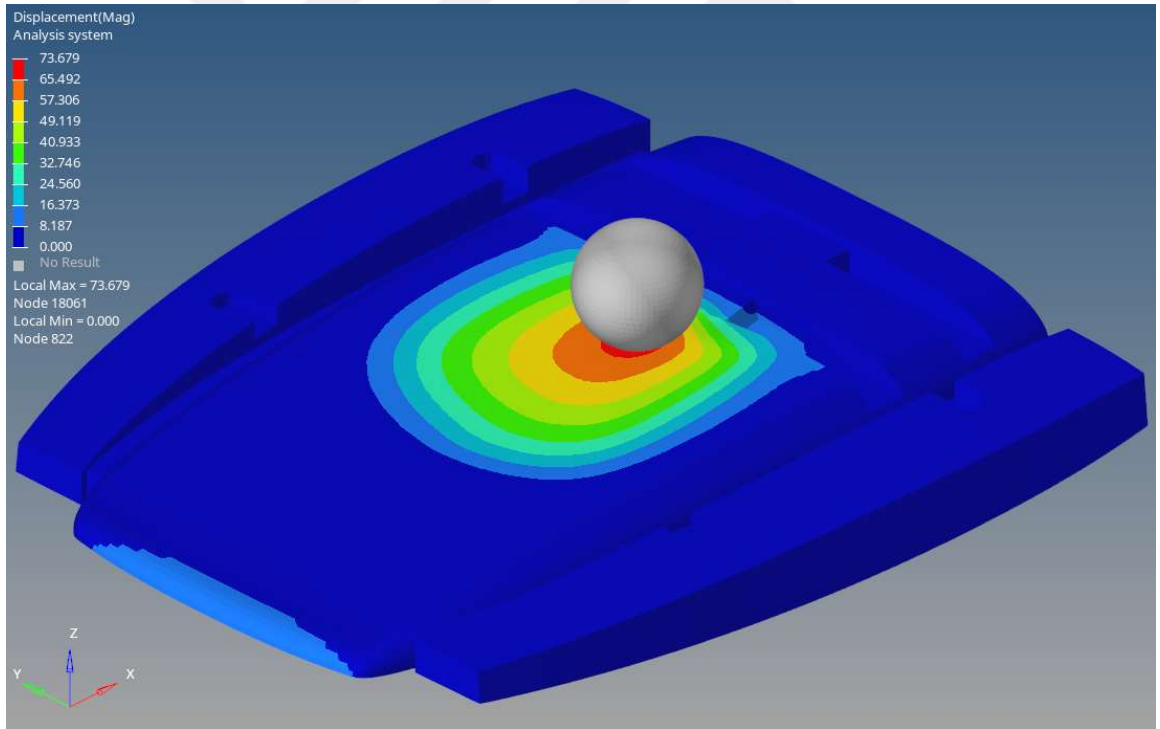
Şekil 3.14. Tsai-Wu hasar kriterine göre 3,56 mm kalınlığındaki SMC-R65 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu (Plastik iş)(J/mm^3)



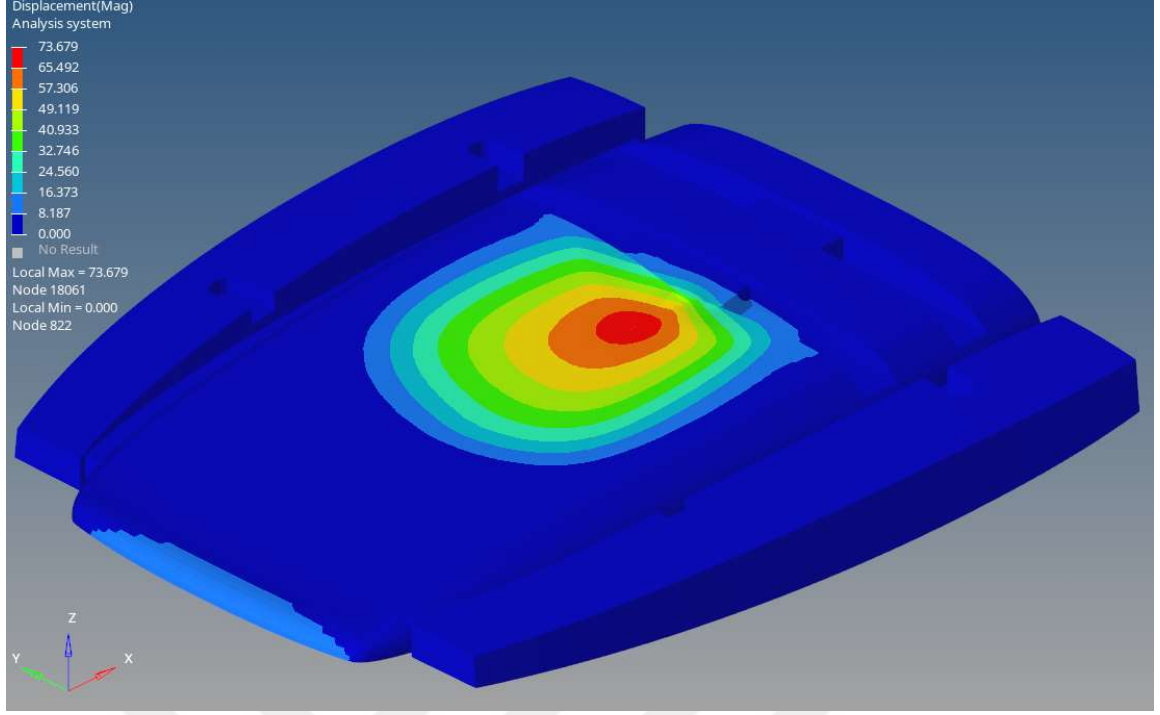
Şekil 3.15. Chang-Chang hasar kriterine göre 3,56 mm kalınlığındaki SMC-R65 malzemesine sahip FOPS'un simülasyon sonucu

3.4. S235JR (St 37-2) İçin Radioss ile arpma Simülasyonu

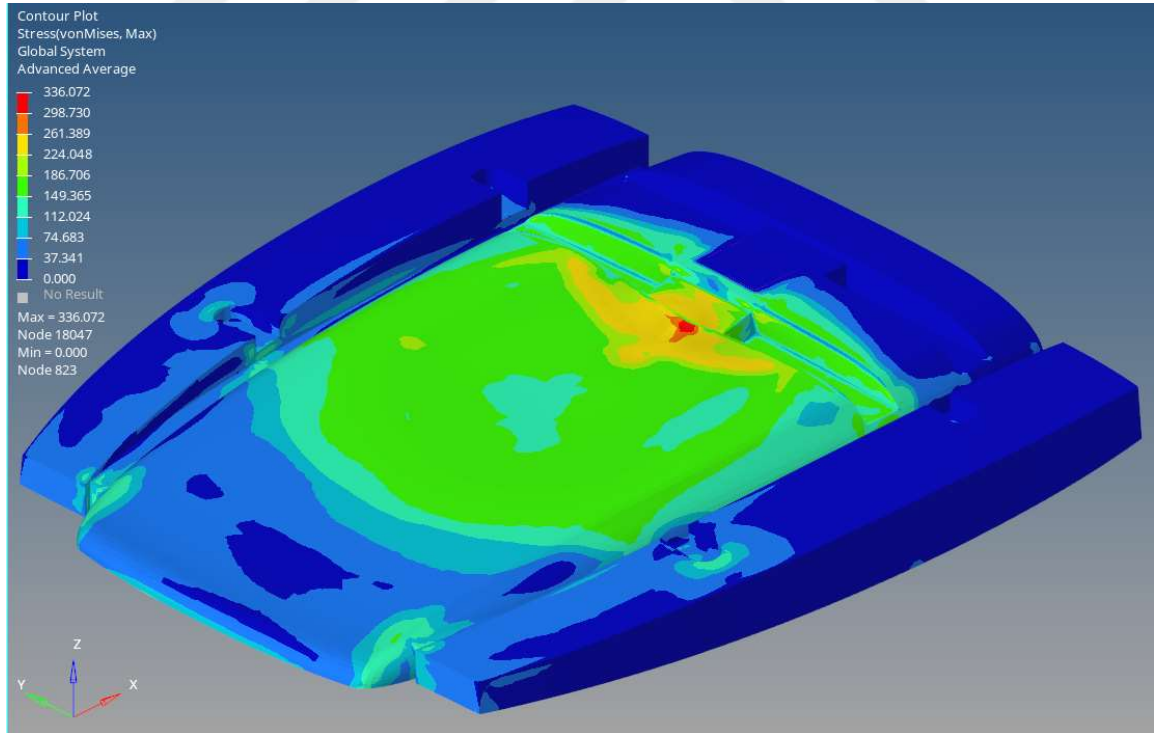
SMC R25 ve SMC R65 kompozit malzemeden yapılan FOPS'a uygulanan OECD kod 10 test simülasyonu, karşılaştırma için aynı geometriye sahip FOPS'a Radioss programında S235JR malzemesi ile tekrarlanmıştır. Malzeme kartı olarak izotropik malzeme için nonlinear çözüme uygun olan M36_PLAS_TAB seçilmiştir. Özellik (Properties) kartı için, kalınlık değeri tüm geometride sabit olduğundan dolayı kabuk (Shell) yapıya uygun ve malzeme izotropik özellik kazandıran P1_SHELL seçilmiştir. Bu kart üzerinde bulunan kalınlık (Thickness) değeri olarak 3,5 mm girilmiştir. Simülasyon sonucu şekil 3.16- 3.18 görüldüğü üzere çarpma esnasındaki deplasman, FOPS üzerindeki maksimum gerilme şeklinde incelenmiştir. Çarpma sonucunda FOPS'ta oluşan toplam çökme miktarı 73,6 mm dir. Kalıcı deformasyon miktarı ise 67.4 mm dir. Eğer FOPS, traktör operatörün üzerinde yeteri yükseklikte ise ve oluşan bu ökme OECD kod 10 tanımlanan DLV alanına girmiyorsa 3,5 mm kalınlığındaki S235JR malzemesi FOPS testini geçmiş kabul edilir.



şekil 3.16. M36_PLAS_TAB hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki S235JR malzemesine sahip FOPS simülasyon sonucu (deplasman, gülle ile) (Deplasman)(mm)



Şekil 3.17. M36_PLAS_TAB hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki S235JR malzemesine sahip FOPS simülasyonu sonucu (deplasman, g llesiz)(Deplasman)(mm)



Şekil 3.18. M36_PLAS_TAB hasar kriterine göre 3,5 mm kalınlığındaki S235JR malzemesine sahip FOPS'un simülasyonu sonucu (Gerilme)(MPa)

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, traktörlerde kullanılan FOPS yapılar için günümüzde kullanılan çelik malzemeye alternatif olacak SMC kompozit malzemeler OECD kod 10 testine tabi tutularak incelenmiştir.

SMC-R25 malzemesine sahip Şekil 2.27-2.28'de açıklanan FOPS'a uygulanan fiziki OECD kod 10 testi, Radioss programı kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyonun verdiği sonuçlar ile gerçekte yapılan OECD kod 10 testi sonuçları benzerdir. Simülasyon sonucunda üst yapıdaki kırılma ve çökme gerçek test ile aynı olmuştur. Böylelikle yapılan simülasyonların doğruluğu kanıtlanmıştır.

SMC-R25 malzemedan yapılan kompozit yapının OECD kod 10'a dayanım sonuçları malzeme kalınlığını değiştirerek Radioss programında tekrar edilmiştir. FOPS'un kalınlığının artırılmasının OECD kod 10 testi sonucuna olumlu etkiler olduğu gözlemlenmiştir. Malzemenin kalınlığı arttıkça test esnasındaki çökme miktarı azalmış ve malzemenin dayanımı artmıştır. Ancak SMC-R25 malzemesinin istenilen dayanıma ulaşması için gerekli kalınlık 14 mm' dir. Bu değer S235JR2 malzemesine kıyasla yüksek ve malzemenin bu kalınlıkta üretilmesi için yüksek yatırım ve birim maliyete neden olacaktır.

Ayrıca SMC malzeme içerisindeki fiber miktarının test sonucuna etkisini gözlemek için SMC-R65 değerleri Radioss programına eklenerek simülasyonlar tekrarlanmıştır. Fiber miktarının artması malzemenin OECD kod 10 testi sonuçlarını olumlu yönden etkilemiştir. SMC-R65 malzemesi OECD kod 10 testini S235JR çelik ile neredeyse aynı kalınlıkta geçmiştir. SMC-R65 kompozit malzemesi, FOPS yapı malzemesi olarak OECD kod10 testi şartlarına göre çelik malzemenin alternatifi olarak kullanılabilir.

OECD kod 10 testi simülasyonu, çelik malzeme olan S235JR malzemesi için de yapılmıştır. Çelik malzemenin sünek olması nedeniyle çarpma esnasındaki plastik yer değiştirme miktarı SMC malzemelerden daha fazladır. Bu özellik OECD kod 10 testi açısından olumlu etki yaratmaktadır. Çarpma esnasında, yapı kırılma yerine uzayarak bütünlüğünü korumaktadır. Bu karşılaştırma W_p^{max} değerinin önemini vurgulamaktadır. Kompozit malzemenin W_p^{max} değerinin artması, malzemeye süneklik özeliğini kazandıracaktır. Kompozit malzeme kırılma yerine esneyerek plastik deformasyona maruz kalacaktır. Böylelikle OECD kod 10 testi sonucunda, malzemenin düşük kalınlıklarda bile olsa hasar olma olasılığı azalacaktır. SMC-R25 ve SMC-R65 için yapılan simülasyonlarda, W_p^{max}

değerinin küçük olmasından dolayı çarpmadan sonra deformasyona uğrayan FOPS, çarpmanın etkisinin kalkması ile oluşan deplasman bir yay gibi ortadan kalkmıştır ve FOPS ilk konumuna dönmüştür. OECD kod 10 testi sonucundan bir kompozit malzemede hasar yoksa, W_p^{max} değerinin küçük olması FOPS'a ekstra bir üstünlük kazandıracığı anlaşılmaktadır. Kompozit malzemenin kalıcı deformasyon özeliğinin düşük olmasından dolayı FOPS, OECD kod 10 testine maruz kalsa bile ilk formuna geri dönecektir. Buda kompozit malzemenin, traktör operatörünü aynı yapıyla düşen cisimlere karşı birden fazla koruyacağı anlamına gelmektedir.

SMC malzemeler FOPS için çelik malzemelere alternatif olarak kullanılabilir. Ancak OECD kod 10 testinin geçebilmesi için SMC malzemesinin kalınlık ölçüsü veya SMC oluşturacak fiber miktarının OECD kod 10 testi için uygun olması gerekmektedir. Bu durum FOPS'un yatırım ve birim maliyetini artırmasına neden olabilir. Ayrıca FOPS'u ROPS a bağlayan konstrüksiyonu, güllenin darbe etkisini azaltacak şekilde tasarlanmanın olumlu etkileri olacaktır.

SMC malzemenin elastikliğinin, FOPS olarak kullanılan çelik malzemelere göre daha yüksek olması, SMC malzemenin yapılan FOPS'un darbe sonrası kalıcı deformasyonu, FOPS olarak kullanılan çelik malzemelere göre çok daha az olacaktır. Bu durum operatörü aynı FOPS ile birden fazla düşen cisim tehlikesine karşı koruyacaktır. Çelik malzemeler testi geçmiş olsa bile korozif etkilere dayanıklılığının düşük olmasından dolayı, zamanla koruyuculuk yeteneğini kaybedecektir. Ancak SMC malzemeler yüksek korozyon dayanıklılığı sebebiyle, düşen cisimlere karşı koruma kabiliyetini uzun süre saklayacaktır. SMC malzemesinin bu iki özeliği nedeniyle FOPS'larda kullanılması çelik malzemelere göre FOPS'un daha uzun ömürlü olmasına neden olacaktır. Bu durum firmaların satış sonrası hizmetler ve işletme maliyetlerini azaltacaktır.

SMC yöntemi ile kompozit üretimi, otomasyon ve seri üretim için uygun olmasından dolayı, otomotive ve traktör firmalarını sürekli çalışan bantlarını tedarik anlamında sürekli beslemesi açısından da, çelik malzemeler için alternatif oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] R. Güven, "İş sağlığı ve Güvenlik Kanun Tasarısı ve Tarım Çalışanları" *Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı Türk tarım Dergisi*, Sayı 205, ss. 66-67. ISSN 1303- 2364. Ankara. 2012
- [2] D.L. Hard, J. R. Myers, and S. G. Gerberich, "Traumatic injuries in agriculture," *Journal of Agricultural Safety and Health* 8., 2002
- [3] M.Gölbaşı, "Tarım alet-makine ve traktörlerin kullanımından kaynaklanan iş kazaları nedenlerinin ve tahmini kaza maliyetleri indeksinin belirlenmesi," Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara. 236 s. 2002.
- [4] D. Blanco, C. Martin, A, Ortalde, "Virtual rops and fops testing on agricultural tractors according to oecd stand-ard code 4 and 10." *14th International LS-DYNA Users Conference*, 2016.
- [5] L.Al-Bassit, N. Tricot and S. Sayegh, "Falling-object protective structure for tractors in service: Prototype design and validation." *Biosystems Engineering* 185, pp.76-87, 2019
- [6] E. Cavallo, and A. Facello. "Effectiveness of innovative materials for the protection of driver of agricultural tractors against falling objects risk." *Ergonomics, Safety, and Health. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier Life, Valencia, Spain, 8-12 July 2012*. CIGR-EurAgEng, 2012.
- [7] A.Bonanno, V. Crupi, G. Epasto and E. Guglielmino, "Aluminum honeycomb sandwich for protective structures of earth moving machines." *Procedia Structural Integrity* 8 pp.332-344, 2018.
- [8] P.Dumitrache and A. M. Goanță. "Validation by numerical simulation of the behaviour of protective structures of machinery cabins subjected to standardized shocks." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 227, No. 1, IOP Publishing, 2017.
- [9] D.Lebedev, A.Okunev, M. Aleshin, K. Ivanov, O. Klyavin, S. Nikulina, O. Rozhdestvenskiy, A. Borovkov "Applicability of polymer composite materials in the development of tractor falling-object protective structures (FOPS)," *Materials Physics and Mechanics* 34,pp. 90-96, 2017.
- [10] A.Bonanno, "Application of innovative materials in operator's protective structures for agricultural and earth moving machinery," *Proceedings of the 16th International Conference of the ISTVS-Turin*, Vol. 25, 2008.
- [11] A. Nazarenko, D. Pakharau, U. Ausianka, S. Huseu, A. Piatrouski "Simulation technologies at FOPS design phase for "AMKODOR" machines: application experience," *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 61.1, 2016.
- [12] R.M. Wang, S.R. Zheng and Y.P.G. Zheng, *Polymer matrix composites and technology*, Philadelphia USA, Woodhead Publishing Limited, 2011.

- [13] L.Orgéas, P. J. J. Dumont, and L. Nicolais, "Sheet molding compounds," *In: Wiley Encyclopedia of Composites*, USA: John Wiley & Sons, Inc. 2011, pp.1-36.
- [14] K. Çavdar ve M. Bingöl, "Farklı Takviye Malzemelerinin Kompozit Malzeme Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesine Etkisi." *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering* 21.2, ss.123-132, 2016.
- [15] A Design And Technology Manual For SMC, BMC, [Çevrimiçi], erişim adresi: https://smcbmc-europe.org/design_for_success/rapport_design_for_success.pdf , [Erişim tarihi: 06 Haziran 2022].
- [16] V.Massardier-Nageotte, F. Cara, A. Maazouz, G. Seytre, "Prediction of the curing behavior for unsaturated polyester–styrene systems used for monitoring sheet moulding compounds (SMC) process," *Composites Science and technology* 64.12, ss. 1855-1862 2004.
- [17] Z.Gülten, "SMC yöntemi ile kompozit üretimi", Doktora tezi, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2003.
- [18] T.H. Le, P. Dumont, L. Orgéas, D. Favier, L. Salvo, and E. Boller, "X-ray phase contrast microtomography for the analysis of the fibrous microstructure of SMC composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39.1, pp.91-103 2008
- [19] J.Kim, Y.C. Shiau, L.J. Lee, and Y.T. Im, "Compression Molding Simulation Of Chopped Fiber Reinforced Polymeric Composites In Plate–Rib Type Geometry," *Polymer Composites* 13(2), pp. 97–107, 1992.
- [20] L.M. Abrams, "Processing studies in sheet molding compound compression molding," The Ohio State University, 2001.
- [21] D. Bücheler, "Locally Continuous-fiber Reinforced Sheet Molding Compound," Fraunhofer Gesellschaft, Germany, BoD–Books on Demand, 2018.
- [22] "Poliya firmasının internet sitesi" erişim adresi: <https://www.poliya.com/tr/smc-ve-bmc-sicak-pres> [Erişim tarihi 08 Haziran 2022].
- [23] M.Bruderick, D. Denton, M. Shinedling, "Carbon Fiber Composite Body Structures For The 2003 Dodge Viper," *DaimlerChrysler Corporation and Michael Kiesel, Quantum Composites Inc*, 2002.
- [24] T. Mei, and M. R. Piggott. "Mesostructure development during molding of sheet molding compounds," *Polymer composites* 17.4, pp. 548-555, 1996.
- [25] M.G. Bader, "Selection of composite materials and manufacturing routes for cost-effective performance," *Composites Part A: Applied science and manufacturing* 33.7 pp. 913-934, 2002.
- [26] M. Bingöl ve K. ÇAVDAR. "Sheet Molding Compound (Smc) Yöntemi İle Kompozit Malzeme Tasarımı Ve Üretimi." *3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, 2012.

- [27] S. Mazumdar, *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*, 1st Edition, Florida USA, CrC press, 2001.
- [28] B. V. Voorn, H. H. G. Smit, R. J. Sinke and B. De Klerk, B. "Natural Fibre Reinforced Sheet Moulding Compound," *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 32(9), pp.1271-1279, 2001.
- [29] Z. Jendli, F. Meraghni, J. Fitoussi and D. Baptiste, "Multi-scales modelling of dynamic behaviour for discontinuous fibre SMC composites," *Composites Science and Technology* 69.1, 2009, pp. 97-103.
- [30] *OECD Code 10 Standard Code For The Official Testing Of Protective Structures On Agricultural And Forestry Tractors*, Or-Ganization For Economic Co-Operation And Development, 2012.
- [31] *OECD Code 4 Standard Code For The Official Testing Of Protective Structures On Agricultural And Forestry Tractors*, Or-Ganization For Economic Co-Operation And Development, 2012
- [32] O. C. Zienkiewicz, R. L Taylor, J.Z. Zhu , *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 6th edition, England, Elsevier Butterworth Heinemann, 2013.
- [33] Jian-Ming Jin, *The finite element method in electromagnetics*, 4th edition, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, 2015.
- [34] Serdar Korkut "Serdar Korkut internet sitesi." [Çevrim içi]. Erişim adresi: <https://www.serdarkorkut.com/2017/05/11/implicit-ve-explicit-arasindaki-farklar/> [Erişim tarihi 06 Haziran 2022].
- [35] Altair Türkiye distribütör firması müşteri form sayfası. [Çevrim içi]. Erişim adresi: <https://blog.s-t.com.tr/2021/05/24/implicit-veya-explicit-analiz/> [Erişim tarihi 06 Haziran 2022].
- [36] Rahul Ponginan, Introduction to Explicit Analysis with Altair RADIOSS, Available: [Online], Erişim adresi: <https://altairuniversity.com/28068-free-ebook-introduction-to-explicit-analysis-using-radioss-a-study-guide-revision/>, [Erişim tarihi: june 06, 2022].
- [37] M.Andersson, and P. Liedberg "Crash behavior of composite structures-A CAE benchmarking study," MS thesis, Department of Applied Mechanics Division of Material and Computational Mechanics, Chalmers University Of Technology, Goteborg, Sweden 2014.
- [38] D. G. Taggart, R. B. Pipes, R. A. Blake, J. W. Gillespie Jr, and R. Prabhakaran, R. "Properties of SMC Composites, " Delaware Univ Newark Center For Composite Materials. 1979.
- [39] N.J. Den Uijl, and L. J. Carless. "Advanced metal-forming technologies for automotive applications," *Advanced materials in automotive engineering*, 2012, pp. 28-56.
- [40] P.K. Mallick, "Failure of polymer matrix composites (PMCs) in automotive and transportation applications." *Failure Mechanisms in Polymer Matrix Composites*. Woodhead Publishing, 2012, pp. 368-392.

- [41] H. Zamanian, B. Marzban, P. Bagheri, and M. Gudarzi, "On stress concentration factor for randomly oriented discontinuous fiber laminas with circular/square hole." *Journal of Science and Engineering* 3.1, 2013, pp. 7-18.
- [42] *İzotropik ve ortotropik elyaf takviyeli plâstik kompozitler için deney şartları*, Türk Standartlar Enstitüsü TS EN ISO 527-4, 2022.
- [43] *Standard Test Method for compressive properties of rigid, Plastics* American Society for Testing and Materials ASTM D695-15,
- [44] *Yoğunluk ve bağıl yoğunluk tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü TS EN ISO 3838
- [45] *Plastiklerde su absorpsiyosunun Tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü TS EN ISO 62
- [46] *Determination of the textile-glass and mineral-filler content*, International Organization for Standardization ISO 1172,1996
- [47] *Plastics. Determination of Charpy impact strength*, , International Organization for Standardization DIN EN ISO 179
- [48] *Metalik Malzemeler Çekme Deneyi*, International Organization for Standardization ISO 6892-1