

**TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARDA DÜŞÜK HIZLI DARBE ETKİSİNİN
SAYISAL ANALİZİ**

Mak.Müh. Mustafa ALBAYRAK

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR

OCAK-2013

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARDA DÜŞÜK HIZLI DARBE ETKİSİNİN
SAYISAL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ALBAYRAK

101120104

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:27.12.2012

Tezin Savunulduğu Tarih:11.01.2013

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Aydın TURGUT

Yrd. Doç. Dr. Mete Onur KAMAN

OCAK – 2013

ÖNSÖZ

Yüksek lisans ve tez çalışmamın gerçekleşmesi süresince tezimin planlanıp yürütülmesinde üstün bir titizlik, sabır ve özveriyle desteklerini esirgemeyen ve yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm kıymetli danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ders dönemim boyunca kendilerinden ders alma fırsatı bulduğum, üstün bilgi ve tecrübelerinden faydalanarak fikir alışverişinde bulunduğum, yaptığı çalışmalarla mekaniğin geleceğine ışık tutan saygı değer hocam Sayın Prof. Dr. Aydın TURGUT'a, sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans ve tez çalışmam boyunca bu yolda yoluma ışık tutan saygı değer hocam Sayın Yrd. Doç. Dr Mete Onur KAMAN'a sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisansım boyunca yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Yavuz SOLMAZ'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Yüksek lisansım boyunca gerek ders döneminde gerekse tez döneminde olsun beni sabırla destekleyen Merve APAYDIN'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Mustafa ALBAYRAK
Makine Mühendisi
ELAZIĞ- 2013

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLOLAR LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ.....	X
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	2
3. DARBE TEST YÖNTEMLERİ.....	10
3.1. Sarkaç (Çentik Darbe) Testleri.....	10
3.1.1 İzod Darbe Testi	12
3.1.2 Charpy darbe test.....	12
3.1.3 Yüksek Hızlı Darbe Testi.....	13
3.2 Düşük Hızlı Darbe Testi.....	13
4. DARBE SONUCU OLUŞAN HASAR TİPLERİ.....	14
5. DARBE MEKANİĞİ.....	17
5.1 Düşük Hızlı Darbenin Kinematik Analizi.....	17
6. DİNAMİK TESİRLER.....	20
7. ARAŞTIRMA BULGULARI	27
7.1. Problemin Tanımı.....	27
7.2 Ansys Ls –Dyna Yazılımının Kullanımı Ve İşlem Adımları.....	28
7.3 Modelin Mekanik Ve Geometrik Özellikleri.....	32
7.3.1 Levhanın Mekanik Ve Geometrik Özellikleri.....	32
7.3.2 Yapıştırıcının Mekanik Ve Geometrik Özellikleri.....	34
7.3.3 Yamanın Mekanik Ve Geometrik Özellikleri.....	36
7.3.3 Vurucunun Mekanik Ve Geometrik Özellikleri.....	38
7.4 Sayısal Çözüm Tekniğinin Kontrolü.....	47

7.4.1	Levhanın Mekanik Özellikleri.....	47
7.4.2	Vurucunun Mekanik Özellikleri.....	49
8.	SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	53
8.1	Vurucu Hızının Darbe Davranışına Etkisi.....	55
8.2	Levha Delik Çapının Darbe Davranışına Etkisi.....	62
8.3	Levha Delik Tipinin Darbe Davranışına Etkisi.....	63
8.4	Yapıştırıcı Malzemesinin Darbe Davranışına Etkisi.....	64
8.5	Yapıştırıcı Kalınlığının Darbe Davranışına Etkisi.....	65
8.6	Yama Boyutunun Darbe Davranışına Etkisi.....	66
8.7	Yama Tipinin Darbe Davranışına Etkisi.....	67
8.8	Vurucu Tipinin Darbe Davranışına Etkisi.....	68
8.9	Sınır Şartlarının Darbe Davranışına Etkisi.....	69
9.	TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	82
	KAYNAKLAR.....	85
	ÖZGEÇMİŞ.....	89

ÖZET

Bu çalışmada, düşük hızlı darbe yüklerine maruz tabakalı kompozit levhaların darbe davranışları *ANSYS LS-DYNA* yazılımı kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada, ortasında dairesel delik bulunan tabakalı kompozit levhaya çeşitli yapıştırıcılar vasıtasıyla yama takviye edilmiştir. Yama ile takviye edilen tabakalı kompozit levha üzerine farklı geometri ve hızlara sahip vurucular düşürülerek kompozit malzemenin darbe davranışı incelenmiştir. Yapılan çalışmada levha ve yama malzemesi olarak tabakalı kompozit levha kullanılmış olup oryantasyon açıları levha için : $[0^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ]$, yama için: $[0^\circ/45^\circ]$ 'dir. Çalışmada dikkate alınan, vurucu ucu, vurucu hızı, yapıştırıcı malzemesi, yapıştırıcı kalınlığı, delik boyutu, delik şekli, yama malzemesi, yama kalınlığı, yama boyutu, sınır şartları parametrelerinin tabakalı kompozit malzemenin darbe davranışı üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler ile sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tabakalı kompozit malzeme, Sonlu elemanlar metodu, Düşük hızlı darbe, Temas kuvvet.

SUMMARY

Numerical Analysis of Effect of Low Velocity Impact on Laminated Composite Plates

In this study, mechanical behaviors of laminated composite plates under low-velocity impact loads have been investigated using *ANSYS*® *LS-DYNA* finite element software. The laminated composite plate having circular hole is repaired with composite patch with using various adhesives. Impact behavior of the laminated composite plate is analyzed for different strikers having various geometries and velocity. The plate material is laminated composite plate having $[0^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ]$ orientation angle. The composite patch is reinforced in $[0^\circ/45^\circ]$ angles. The effect of adhesive material, adhesive thickness, hole size, hole shape, the patch material, thickness of the patch, patch size, boundary conditions of composite plate and striker geometry on contact forces is determined. Obtained results are represented with graphs.

Keywords: Laminated composite plates, finite element method, low velocity impact, contact force.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Sarkaç tipi darbe test cihazı.....	11
Şekil 3.2. Ağırlık düşürme test düzeneği.....	14
Şekil 4.1. Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar tipleri.....	15
Şekil 4.2. Matris çatlakları.....	16
Şekil 5.1. Darbe başlangıç anı.....	18
Şekil 5.2. Düşük hızlı darbenin kuvvet-zaman grafiği.....	18
Şekil 6.1. Üzerine düşen ağırlıktan dolayı bir çubuğun çökmesi.....	21
Şekil 6.2. Ani yükleme durumu.....	24
Şekil 7.1. Model izometrik görünüm.....	29
Şekil 7.2. Levha modeli.....	29
Şekil 7.3.Yapıştırıcı modeli.....	30
Şekil 7.4.Yama modeli.....	30
Şekil 7.5.Levha, yapıştırıcı, yama modeli.....	30
Şekil 7.6.Sonlu elemanlara ayrılmış modelin mesh yapısı ve yer çekimi ivmesi.....	31
Şekil 7.7. Dört kenarı ankastre mesnet levhanın sınır şartları.....	31
Şekil 7.8. Ortasında dairesel delik bulunan levhaya ait teknik resim.....	32
Şekil 7.9. Ortasında kare delik bulunan levhaya ait teknik resim.....	33
Şekil 7.10. Ortasında altıgen delik bulunan levhaya ait teknik resim.....	33
Şekil 7.11. Yapıştırıcı modeline ait teknik resim.....	36
Şekil 7.12. Kare tip yama modeline ait geometrik özellikler.....	37
Şekil 7.13. Dairesel tip yama modeline ait geometrik özellikler.....	37
Şekil 7.14. Altıgen tip yama modeline ait geometrik özellikler.....	38
Şekil 7.15 0 mm ² kontak alanına sahip vurucu modeline ait katı model.....	39
Şekil 7.16 0 mm ² kontak alanına sahip vurucu modeline ait mesh yapısı.....	39
Şekil 7.17 0 mm ² kontak alanına sahip vurucu modeli ölçüleri.....	40
Şekil 7.18.. Yarı küresel uçlu vurucu modeline ait katı model.....	41
Şekil7.19 Yarı küresel uçlu vurucu modeline ait mesh yapısı.....	41
Şekil 7.20 Yarı küresel uca sahip vurucu modeli ölçüleri.....	42

Şekil 7.21 Kare uçlu vurucu modeline ait katı model.....	43
Şekil 7.22 Kare uçlu vurucu modeline ait mesh yapısı.....	43
Şekil 7.23 Kare uca sahip vurucu modeli ölçüleri.....	44
Şekil 7.24 Üçgen uçlu vurucu modeline ait katı model	45
Şekil 7.25 Üçgen uçlu vurucu modeline ait mesh yapısı.....	45
Şekil 7.26 Üçgen uca sahip vurucu modeli ölçüleri	46
Şekil 7.27 180x50 mm ² boyutlarına sahip levha modeli.....	48
Şekil 7.28 180x50 mm ² boyutlarına sahip levha modeli mesh yapısı.....	48
Şekil 7.29 Yarı küresel uca sahip vurucu modeli ölçüler.....	49
Şekil 7.30 Yarı küresel uca sahip vurucu modeline ait katı model.....	50
Şekil 7.31 Yarı küresel uca sahip vurucu modeline ait mesh yapısı	50
Şekil 7.32 Levha sınır şartları	51
Şekil 7.33 Model izometrik görünüm.....	51
Şekil 8.1 Sonuçların literatürle karşılaştırılması	52
Şekil 8.2 Düğüm sayılarının değişimine bağlı olarak kuvvet – zaman diyagramı.....	53
Şekil 8.3 Çıktı aralıkları değişimine bağlı olarak kuvvet – zaman diyagramı.....	54
Şekil.8.4 Darbe hızı değişimine bağlı olarak kuvvet – zaman diyagramı.....	56
Şekil 8.5 Darbe hızı değişimine bağlı olarak x yönünde çekme gerilmesi - zaman diyagramı..	57
Şekil 8.6 Darbe hızı değişimine bağlı olarak x yönünde .basma gerilmesi - zaman diyagramı..	57
Şekil 8.7 Darbe hızı değişimine bağlı olarak y yönünde çekme gerilmesi - zaman diyagramı..	58
Şekil 8.8 Darbe hızı değişimine bağlı olarak y yönünde basma gerilmesi - zaman diyagramı..	58
Şekil 8.9 Darbe hızı değişimine bağlı olarak z yönünde çekme gerilmesi - zaman diyagramı...	59
Şekil 8.10 Darbe hızı değişimine bağlı olarak z yönünde basma gerilmesi – zaman diyagramı	59
Şekil 8.11 Darbe hızı değişimine bağlı olarak toplam enerji - zaman diyagramı.....	60
Şekil 8.12 Darbe hızı değişimine bağlı olarak numunedeki hız - zaman diyagramı.....	60
Şekil 8.13 Darbe hızı değişimine bağlı olarak Z yönündeki yer değişimi - zaman diyagramı...	61
Şekil 8.14 Levha delik çapı değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı.....	62

Şekil 8.15 Levha delik tipi değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zamandiyagramı.....	63
Şekil 8.16 Yapıştırıcı malzemesi değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı...	64
Şekil 8.17 Yapıştırıcı kalınlığı değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı.....	65
Şekil 8.18 Yama boyutunun değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zamandiyagramı.....	66
Şekil 8.19 Yama tipinin değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı.....	67
Şekil 8.20 Vurucu uç tipinin değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı.....	68
Şekil 8.21 Sınır şartlarının değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı	69
Şekil 8.22 1 m/s hızı sahip vurucu için x yönünde gerilme değerler (ön görünümü).....	70
Şekil 8.23 1 m/s hızı sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri (alt görünümü).....	70
Şekil 8.24 1 m/s hızı sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri (izometrik görünümü)...	71
Şekil 8.25 1 m/s hızı sahip vurucu için y yönünde gerilme değerler (ön görünümü).....	72
Şekil 8.26 1 m/s hızı sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri (alt görünümü).....	72
Şekil 8.27 1 m/s hızı sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri (izometrik görünümü)....	73
Şekil 8.28 1 m/s hızı sahip vurucu için z yönünde gerilme değerler (ön görünümü).....	74
Şekil 8.29 1 m/s hızı sahip vurucu için z yönünde gerilme değerler (alt görünümü).....	74
Şekil 8.30 1 m/s hızı sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri (izometrik görünümü)....	75
Şekil 8.31 2 m/s hızı sahip vurucu için x yönünde gerilme değerler (ön görünümü).....	76
Şekil 8.32 2 m/s hızı sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri (alt görünümü).....	76
Şekil 8.33 2 m/s hızı sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri (izometrik görünümü)...	77
Şekil 8.34 2 m/s hızı sahip vurucu için y yönünde gerilme değerler (ön görünümü).....	78
Şekil 8.35 2 m/s hızı sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri (alt görünümü).....	78
Şekil 8.36 2 m/s hızı sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri (izometrik görünümü)....	79
Şekil 8.37 2 m/s hızı sahip vurucu için z yönünde gerilme değerler (ön görünümü).....	80
Şekil 8.38 2 m/s hızı sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri (alt görünümü).....	80
Şekil 8.39 2 m/s hızı sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri (izometrik görünümü)....	81
Şekil 8.40 3m/s hızı sahip vurucu için x yönünde gerilme değerler (ön görünümü).....	82
Şekil 8.41 3 m/s hızı sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri (izometrik görünümü)...	83.
Şekil 8.42 3m/s hızı sahip vurucu için y yönünde gerilme değerler (ön görünümü).....	84
Şekil 8. 3 m/s hızı sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri (izometrik görünümü).....	84
Şekil 8.44 3m/s hızı sahip vurucu için z yönünde gerilme değerler (ön görünümü).....	85
Şekil 8.45 3 m/s hızı sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri (izometrik görünümü)....	85

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 7.1 Kompozit levha ve yama malzemesine ait mekanik özellikler.....	34
Tablo 7.2 FM 73 yapıştırıcısına ait mekanik özellikler.....	35
Tablo 7.3 EN11343 Yapıştırıcısına ait mekanik özellikler.....	35
Tablo 7.4 EA9395 yapıştırıcısına ait mekanik özellikler.....	35
Tablo 7.5 Vurucuya ait mekanik özellikler.....	38
Tablo 7.6 Kompozit levhaya ait mekanik özellikler.....	47
Tablo 7.7 Vurucuya ait mekanik özellikler.....	49

SEMBOLLER LİSTESİ

J	: Joule
kN	:Kilo-Newton
m	:Metre
mm	:Milimetre
MPa	:Mega Paskal
ms	: Milisaniye
σ_{statik}	: Statik etkenlerden doğan gerilmeler
σ_{dinamik}	: Dinamik etkenlerden doğan gerilmeler
s	:Saniye
S_i	: i. Kenar
Ø	: Dinamik çarpan
δ	: Çökme miktarı
δ_{statik}	: Statik çökme
δ_{dinamik}	: Statik çökme
U₁	: Potansiyel enerji
U₂	: Şekil değiştirme enerjisi
V₀	: Darbe başlangıç hızı
V_y	:Yumuşak bir cisimde plastik akmayı başlatmak için gerekli en düşük izafi hız
η	: Çarpışmadaki enerji kaybı

1. GİRİŞ

Tabakalı kompozit malzemeler yüksek mukavemet, kolay şekillendirebilme, ısıya ve neme karşı dayanıklılık ve titreşimi sönümleme gibi özelliklerinin iyi olmasından dolayı bir çok mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler uygulama yada kullanım alanlarında her an değişik sebeplerle darbe etkisine maruz kalabilirler.

Darbelerle bağı olarak oluşan; hasar, üretim, bakım ve servis işlemleri sırasında da çıkabilir. İmalat, montaj ve bakım sırasında kullanılan takımlar yapı üzerine düşürülebilir. Bu durumda darbe hızları küçük fakat etkisi büyüktür.

Tabakalı kompozitlerde darbe, iç hasarlara sebebiyet vermektedir. İç hasarlar ise malzeme dayanımı ve ömrü üzerinde büyük rol oynamaktadırlar. Bütün bu tip oluşan hasarlardan dış darbelerin etkileri anlaşılmalıdır ve tasarım aşamasında gerekli önlemler alınmalıdır.

Ayrıca imalat veya üretim aşamalarında da darbe mukavemetini artırıcı çalışmaların yapılması önem arz etmektedir. Bu sebeple bu çalışmada tabakalı kompozit malzemelerde düşük hızlı darbe ile ilgili sayısal çalışma yapılırken aynı zamanda bu çalışmanın ışığında darbeye karşı dayanıklılığı hangi yöntem ve işlemlerle artırılabilirlik sorusuna da cevap aranacaktır.

Bu çalışmada, ortasında farklı geometrilere sahip tabakalı kompozit levhaya çeşitli yapıştırıcılar vasıtasıyla yama ile tamir edilmiştir. Yama ile tamir edilen tabakalı kompozit levha üzerine farklı geometri ve hızlara sahip vurucular düşürülerek kompozit malzemenin darbe davranışı incelenmiştir. Tabakalı kompozit levha 4 tabakalı olup fiber oryantasyon açıları: $[0^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ]$ dır.

Çalışma sonucunda zamana bağı olarak temas kuvveti, yer değiştirme, toplam enerji, çeki ve bası gerilmeleri, vurucu hızlarının değişimi gibi etkenler grafiklerle sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tabakalı kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe ile ilgili birçok deneysel çalışma yapılmıştır ve analitik yöntemler geliştirilmiştir.

Goo ve Kim [1] düşük hızlı darbe altında tabakalı kompozit plakaların dinamik temas analizini yapmışlardır. Düzeltilmiş Hertz temas kanunu gibi basit kanunlar, kompozit plakaların dinamik temas durumuna uyarlamak için kullanılmıştır.

Lee ve ark. [2] rijit bir küre ile darbe yapılan kompozit sandviç plakanın dinamik davranışını sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır.

Wang ve Vukhann [3] karbon fiber bulunan PEEK çapraz katlı tabakaların düşük hızdaki darbesini iki basit yaklaşım kullanarak araştırmıştır.

Whittingham ve ark. [4] ön gerilme altındaki karbon fiber/epoksi tabakaların düşük hızlı darbe durumunu araştırmışlardır. Ön gerilme altındaki numunede oluşan vurucu dalma miktarı, vurucu delme miktarı, yutulan enerji ve en büyük darbe kuvveti deneysel olarak tespit edilmiştir.

Belingardi ve Vadori [5] karbon-fiber/epoksi kompozit malzemelerde plaka kalınlığının düşük hızlı darbe davranışına etkilerini araştırmışlardır. Üç farklı kalınlıktaki deney numunelerine yarı-statik ve dinamik darbe yükleme yapılmıştır. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri çıkarılarak numunelerin farklı darbe hızlarındaki enerji yutma kabiliyetlerini araştırmışlardır.

Mitreveski ve ark. [6] farklı vurucu geometrilerinin kompozit malzeme üzerindeki darbe etkilerini incelemişlerdir. Karbon-epoksi tabakalara yarı küresel, konik ve sivri vurucularla darbeler yapmışlardır. Kuvvet-zaman değişimini ve numunelerin yuttuğu enerji miktarlarını deneysel olarak tespit ederek vurucu geometrilerinin etkilerini değerlendirmişlerdir.

Hosseinzadeh ve ark. [7] fiberle güçlendirilmiş kompozit levhaların düşen ağırlık darbelerindeki hasar durumunu incelemişlerdir. Dört farklı fiberle güçlendirilmiş tabakalı kompozit plakalara düşük hızlı darbeler yapmışlardır. Numunelerdeki hasar bölgelerinin haritalarını çıkararak darbe enerjisi hasar çapı değişimi elde etmişlerdir. Farklı numunelerdeki değişimleri rapor etmişlerdir.

Sugun ve Rao [8] cam, karbon ve kevlar takviyeli kompozitlere tekrarlı düşürme testleri yaparak düşük hızlı darbe karakteristiklerini çalışmışlardır. Kompozit plakalar üzerine delinme oluncaya kadar tekrarlı darbeler yapmışlardır. En büyük kuvvet-darbe sayısı değişimi ve darbe enerjisi-darbe sayısı değişimlerini deneysel olarak tespit etmişlerdir. Son darbeden sonra numunelerdeki hasar bölgelerinin haritaları çıkarılarak incelenmiştir.

Gür ve Örçen [9] ortasında eliptik delik bulunan termoplastik tabakalı kompozit plakalarda elastik ve elasto-plastik gerilme analizini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapmışlardır.

Mili ve Necip [10] E-camı/epoksi tabakalı kompozit plakaların darbe altındaki davranışını deneysel olarak çalışmışlardır. Ağırlık düşürme darbe cihazı kullanmışlardır. Vurucu hızlarının ve tabakalanma sırasının kompozit plağın davranışına etkilerini değerlendirmişlerdir.

Aslan ve ark. [11] ile Aslan ve Karakuzu [12] düşük hızlı darbeye maruz fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin dinamik davranışını değerlendirmişlerdir. Cam fiber/epoksi kompozitin zamana bağlı analizi üzerine deneysel ve nümerik araştırma yapmışlardır. Nümerik olarak hesaplanan temas kuvveti-zaman değerleri, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerde darbe hızının, darbe kütlelerinin, kompozit plağın boyutlarının ve kalınlığının önemini belirlemişlerdir.

Baucom ve Zikry E camı kompozit sistemlerde düşük hızlı darbedeki hasar ilerlemelerini incelemişlerdir. Numunede delinme oluşuncaya kadar aynı enerji seviyesinden düşük hızlı darbeler yapılmış ve buna bağlı olarak en büyük temas kuvveti-darbe sayısı ve enerji dağılımı-darbe sayısı arasındaki ilişkileri incelemişlerdir [13].

Belingardi ve Vadori cam fiber epoksi matris kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişlerdir. Tek yönlü ve örgülü olarak üç farklı yönlenmeye sahip kompozit malzemeye serbest düşürme cihazı ile testler yapmışlardır. Bu çalışmada, düşük hızlı darbe etkisi altında tabakalandırılmış kompozit malzemelerin mesnet tiplerinin hasara etkisi incelenmiştir. Darbe testlerinin sayısal olarak çözümü için sonlu elemanlar paket programı *ANSYS LS-DYNA* kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe testi, tabakalı kompozit levhaya belirli bir yükseklikten vurucu (impaktör) düşürülerek gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 16 tabakalı [0/90]_s oryantasyon açılara sahip kompozit levha kullanılmıştır. Farklı mesnet tiplerinde temas kuvvetleri, gerilme ve yer değiştirme sonuçları elde edilmiş olup sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur [14].

Abatan vd. tarafından yapılan çalışmada, Fourier açılımına dayalı nümerik yaklaşımla hibrid kompozit levha ve metal plakaların darbe direncini araştırmışlardır. Çalışmalarında Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanarak sonuçlarını desteklemiş ve kayma deformasyon teorisi üzerinde çözüm geliştirerek, klasik plaka teorisi ile arasında karşılaştırma yapmışlardır [15].

Akın ve Şenel yaptıkları çalışmada, düşük hızlı darbe yüklerine maruz tabakalı plakların, farklı darbe enerjileri altında davranışını incelemişlerdir. Ağırlık düşürme test makinesinde yaptıkları çalışmada kullandıkları numuneler, 8 tabakalı, üç farklı istifleme açıları ($[0/90]_{2s}$, $[-30/30]_{2s}$, $[-45/45]_{2s}$) olan, 140x140 mm boyutlarında, E-cam/epoksi kompozit malzemelerdir. Hasar dirençlerini, hasar başlangıcından itibaren son delinmeye kadar incelemişlerdir. Kompozit plakaların farklı sınır şartlarında, oryantasyon açılarının ve darbe enerjisinin etkisi araştırılmıştır [16].

Aslan ve Karakuzu ile Aslan vd. çalışmalarında fiber takviyeli Ecam/epoksi tabakalı kompozit malzemenin, düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Farklı hız ve kütleye sahip vurucu ile çalışmalarını yapmışlardır. Sonlu eleman analizi için *3DIMPACT* kullanmışlardır. Sayısal olarak hesaplanan değerler ile deneysel sonuçları karşılaştırarak, temas kuvvetleri, darbe hasarı ile plak boyutlarının darbe davranışına etkilerini değerlendirmişlerdir [12,17].

Baucom and Zikry yaptıkları çalışmada tekrarlı ve düşük hızlı darbe yükü etkisindeki örgülü elyaf kompozit malzemenin hasar ilerlemesi durumunu ortaya koymuşlardır. Hasar oluşuncaya kadar darbe sayısının, temas kuvveti-enerji durumlarıyla meydana gelen hasar miktarlarını incelemişlerdir [18].

Belingardi and Vadori çalışmalarında farklı yönlenmeye sahip cam fiber epoksi kompozit malzemesinin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Deneysel testleri ağırlık düşürme test makinesi kullanılarak *ASTM* standartlarına göre yapmışlardır. Malzemenin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını darbe enerjisi, hasar derecesi ve temas kuvveti değişimleriyle ifade etmişlerdir [19].

Cantwell and Morton çalışmalarında, sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin darbe direncini değerlendirmişlerdir. Araştırmalarında kompozit malzemelerin darbe direncini belirleyen temel parametreleri tespit etmişlerdir. Lif ve matris özelliklerinin, yükleme hızının ve geometri değişiminin, dinamik yüklemeye etkileri incelenmiştir [20].

Caprino et al. yaptıkları çalışmada, ağırlık düşürme test makinesi kullanarak düşük hızlı darbe yükü altındaki fiberglas-alüminyum kompozit plakaların davranışını ve darbe hızı, kütle, enerji parametrelerinin malzeme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin darbe enerjisine bağlı olduğunu ve fiberglas-alüminyum kompoziti ile alüminyum için absorbe edilen enerji miktarını değerlendirmişlerdir. Numunelerde darbe sonucu oluşan hasarı ultrasonik tarama ve kimyasal yöntemlerle tespit etmişlerdir [21].

Chakraborty 3D sonlu elemanlar metodu ile düşük hızlı darbe yükü altındaki grafit / epoksi kompozit malzemelere, birden fazla silindirik vurucunun malzeme üzerinde yarattığı delaminasyon hasarının değerlendirmesini yapmıştır. New mark-b metodu ve Hertz temas yasasını birlikte kullanılarak, sonlu eleman analizi için farklı zamanlarda birden fazla etki altındaki tabakalı plakaların tepkisini belirlemek için algoritma geliştirmişlerdir. Ayrıca uygun bir delaminasyon kriterini, delaminasyon büyüklüğünü ve yerini değerlendirmede kullanmıştır. Temas kuvvetinin büyüklüğünün yanı sıra, birden fazla darbenin kısa zaman aralığında etkimesi sonucunda delaminasyon hasarının oluştuğu tespit edilmiştir [22].

Chiu et al. ön gerilmeli tabakalı kompozit malzemelerin düşük darbe yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Kompozit malzemelerin mukavemeti ve sertliğinde değişikliğe neden olabilecek etkilerde, düzlem dışı darbe yüklerine karşı kompozit malzemenin son derece savunmasız kalabileceğini ifade etmişlerdir. Yarı izotropik T- 300/976 grafit/epoksi laminantlarına düşük hızda yük uygulamışlardır. Kompozit numunelerdeki hasarın boyutunu ölçmek için ultrasonik tarama yapmışlardır. Sonuç olarak ön gerilmenin, kompozit malzemenin davranışında önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır [23].

Dhakal et al. doymamış polyester ile kenevir takviyeli malzemeleri, dokuma olmadan meydana getirilmiş kompozit malzemenin, düşük hızlı darbe testlerindeki davranışını araştırmışlardır. Eşdeğer hacim oranına sahip E-cam elyaf takviyeli numuneleri de test ederek diğer kompozit malzemelerle karşılaştırma yapmışlardır. Bu numunelerin darbe sonrası hasar tespiti için taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Malzemelerin yük taşıma kapasitesi ve enerji absorblama yeteneklerinin fiber hacim oranlarıyla ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir [24].

Dobyns basitçe desteklenmiş ortotropik plakaların, statik ve dinamik yükleme koşullarında malzemenin davranışı için nümerik çalışma yapmıştır. Çalışmada düşük hızlı darbe analizi için kullanışlı nümerik yöntemler sunmuştur [25].

Chandekar et al. çalışmalarında, düşük hızlı darbe etkisi altındaki örgülü fiberglas/epoksi kompozit malzemelerin davranışını, *LS-DYNA* yazılımını kullanarak ve *Instron dynatup 8250* test cihazıyla deneysel olarak incelemişlerdir. Tabakalı, sepet örgü desenli cam elyaf kumaşı temsil eden, mozaik 3 boyutlu katı elemanlar kullanılarak modellemişlerdir. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri klasik mikromekanik teorisi kullanılarak hesaplanmış ve ortotropik elastik malzeme modeli kullanarak elemanlara atamışlardır. LS-DYNA ile ileri kompozit hasar modeli kullanılarak artan darbe enerjisinin hasar oluşuma neden olduğunu gözlemlemiştir. Araştırma sonuçlarının değerlendirmeleri yük taşıma kapasitesi ve absorbe edilen enerji miktarı olarak vermişler ve karşılaştırma sonucunda SEM ile deneysel çalışmanın uyum sağladığını elde etmişlerdir [26].

Gong and Lam tarafından yapılan çalışmada düşük hızlı darbe etkisine maruz kalan kompozit levhanın davranışını tanımlamak için plaka ve takviye elemanlarının kombine hareketinin yanı sıra kontak kuvveti ve enine kayma deformasyon etkilerini içeren yaklaşık bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında sonlu elemanlar yaklaşımını da kullanmışlardır. Ayrıca sertleştirici aralığı, kalınlığı, anizotropik malzeme özellikleri, darbe kütlesi ve kontak rijitliği etkilerini ele almışlardır [27].

Goo and Kim tabakalı kompozit plakaların düşük hızlı darbe etkisindeki davranışını incelemişlerdir. Hertz temas kanununu uyarlayarak tabaka istifleme yönü, kalınlık ve dinamik kontak davranışı gibi durumları açıklamışlardır. Kompozit laminantların dinamik davranışlarının simülasyonu için SEM kullanmışlardır [28].

Guan and Yang düşük hızlı darbe etkisindeki tabakalı kompozit malzemelerin hasar durumu üzerinde araştırma yapmışlardır. Tabakalı kompozit malzemelerin düşük darbe hızı etkisiyle oluşan hasar simülasyonu ile ilgili sönümlleme, sertlik değişimi ve hasar başlatılması üzerinde inceleme yapmışlardır. Malzemelerin mekanik özelliklerini değiştirerek, hasar gören malzemeler için sürekli hasar mekaniği yöntemini kullanmışlardır. *Fortran* sonlu elemanlar programıyla tabakalı kompozit malzemeyi temsil edecek elemanlara, hasar durumuna göre değişken malzeme katsayılarını atayarak hasar hesaplaması yapmışlardır. Matris çatlaması, delaminasyon ve fiber kırılması gibi hata modlarıyla hasarı analiz etmişlerdir [29].

Hosseinzadeh et al. farklı elyaf takviyeli kompozit levhalara, farklı çarpma enerjisi ve moment ile standart bir ağırlık düşürme testi uygulamışlardır. Hasar bölgelerini tahribatsız muayene yöntemiyle tespit etmişlerdir.

Karbon fiber takviyeli kompozit levha, düşük hızlı darbe yükü altında uygun yapısal davranış gösterirken, hibrid karbon/cam elyaf plakaları ise yüksek darbe enerjisi altında uygun davranış göstermiştir. Tüm plakalara uygulanan test koşulları *ANSYS LS DYNA* yazılımında modellenerek gerçekleştirmiş ve deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir [30].

Hosur et al. çalışmalarında, örgülü karbon/epoksi kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Farklı oryantasyon açılarına sahip kompozit malzemelere, farklı darbe enerjileri uygulanmıştır. Numunelerin hasar boyutlarını belirlemek için ultrasonik tarama yapılmıştır. Uygulanan enerji değerlerine bağlı olarak hasar oluşum miktarlarını tespit edilmiş ve $0/\pm 45$ oryantasyon açısına sahip malzemede yüksek hasar meydana geldiği tespit edilmiştir [31].

Jih and Sun düşük darbe hızı altındaki tabakalı kompozit malzemelerin delaminasyon durumunu tahmin etmek için çalışma yapmışlardır. Statik kırılma tokluğu değerlerini kullanarak, darbe koşulları altındaki delaminasyon durumunu açıklamışlardır. Delaminasyon boyutunun tahmininde, statik kırılma tokluğunu değerleri ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır [32].

Karakuzu vd. yaptıkları çalışmada, darbe yüklerine maruz cam/epoksi plakaların hasar tahmini için çalışma yapmışlardır. $[0/\pm 0/90]_s$ takviye açısına sahip cam/epoksi kompozit malzemelere darbe uygulanmış ve istifleme dizisinin etkisini incelemek için $\pm \theta$ açısı 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° olarak seçilmiştir. Farklı kalınlıklarda cam/epoksi kompozit numuneler kullanarak, kalınlığın darbe davranışına etkisini incelemişlerdir. SEM için *3DIMPACT* kullanarak elde edilen sonuçların, deneysel sonuçlar uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır [33].

Kim and Kang yaptıkları çalışmada, enine darbeye maruz cam/epoksi kompozit plakaların darbe kuvvetini tahmin etmek için yeni bir analitik yöntem geliştirmişlerdir. Bu çalışmayı iki varsayımla yapmışlardır. Dikdörtgen plakaya, Rayleigh–Ritz enerji yöntemi ve Lagrange prensibi uygulayarak denklemler elde etmişler ve bu denklemleri uygun bir teknikle ile çözmüşlerdir. Ayrıca analitik yöntemi doğrulamak için çeşitli kalınlıklarda, düz örgülü cam/epoksi kompozit levhaya darbe testleri uygulamışlardır. Bu analitik yöntemle elde edilen çarpma kuvvetleri ile uygulanan deneysel sonuçların uyuşmakta olduğu sonucuna varılmıştır [34].

Lal grafit-epoksi kompozit plakaların, düşük hızlı darbe yükü etkisindeki davranışını incelemiştir. Farklı çaplarda çelik toplarla çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Numunelerin hasar bölgelerini belirlemek için ultrasonik tarama yapmıştır. Hasar oluşturan darbe enerjisinin eşik değerini tespit etmiştir [35].

Lee et al. tarafından yapılan çalışmada sandviç kompozit plakanın dinamik davranışını, deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Sandviç plaka için grafit-epoksi [O2/902/O2/FOAM]s ve FR10110 sert köpük kullanılmıştır. Dinamik gerilme durumlarını tanımlamak için strain-gage ile teorik analiz yapmışlardır. Sandviç kompozit plakaların düşük hız etkisindeki dinamik davranışını teorik bir model ile açıklamışlardır [36].

Lee et al. çalışmalarında düşük hızlı darbe etkisindeki hibrid tabakalı kompozit plakaların davranışını, kayma deformasyon teorisini kullanarak açıklamışlardır. Aynı bileşen oranına sahip iki hibrid kompozit levhanın istifleme sırasının değişimine göre enerji kaybının farklı değerler aldığını ve Grafit-Kevlar-Grafit plakada düşük enerji kaybı, Kevlar-Grafit Kevlar plakada ise yüksek enerji kaybının olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca sonuçların malzeme yüzey özelliklerine göre farklılık gösterebileceğini incelemişlerdir [37].

Düşük darbe hızı etkisindeki çeşitli nanopartikül dolgulu kompozitlerin mekanik davranışını Lin et al. incelemişlerdir. Çalışmalarında nano-kompozit malzemelerin kırılma morfolojisi ve malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Farklı hızlarda gerçekleştirilen deneylerde hasar derecesini ve mekanik davranışını etkileyen parametreleri ortaya koymuşlardır [38].

Liu et al. yapısal yoğunluk yaklaşımı ile düşük hızlı darbe yükü altındaki plakaların dinamik davranışını incelemişlerdir. Dinamik temas etkisini Lagrangian yaklaşımına dayanan algoritma ve denklemler ile gerçekleştirerek, yapısal yoğunluk yaklaşımının, malzemenin dinamik davranışının araştırılması için verimli bir yaklaşım olduğunu ifade etmişlerdir [39].

Luo et al. karbon/epoksi kompozit plakaların hasar analizi konusunda yaptıkları çalışmada hasar başlaması ve hasarın yayılma durumlarını değerlendirmişlerdir. Hasar simülasyonu için hata modlarını uygulamaya koyarak, simülasyon ve deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır [40].

Mili ve Necip çapraz katlı tabakalı kompozit plakaların, düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Ağırlık düşürme test cihazıyla, [0₂/90₆/0₂], [0₃/90₄/0₃] ve [0₄/90₂/0₄] şeklinde istiflenmiş E-camı/epoksi tabakalı kompozit malzemelere, farklı hızlardaki impektör ile düşük hızlı darbe yükü uygulamışlardır. İmpektör hızlarının ve tabaka dizilimlerinin, kompozit levhanın darbe davranışına etkilerini

incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarını doğrulamak amacıyla teorik model oluşturarak, Hertz temas yasasını kullanmışlardır [41].

Mitreviski et al. yaptıkları çalışmada darbe yükü altındaki karbon/epoksi tabakalı kompozit malzemesine, yarı küresel, sivri ve konik şeklindeki impektör geometrilerinin darbe davranışına etkilerini incelemişlerdir. Farklı enerjilere sahip impektör ile yapılan çalışmada farklı impektör geometrilerinin enerji absorblama, oluşturduğu hasar ve temas süreleri bakımından karşılaştırmalarını yapmışlardır. İç hasar mekanizmalarını ve hasar alanlarını belirlemek için tahribatsız muayene tekniklerini kullanmışlardır [42].

Literatür çalışmalarında kompozit malzemenin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışı hakkında birçok deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kompozit malzemede oluşan hasar modları, temas kuvveti, absorblanan enerji ve yer değiştirme miktarı gibi vb. sonuçlar ortaya konulmuştur. Ayrıca darbe yüklemeinde, darbe davranışını karakterize eden parametreler sunulmuştur. Bu çalışmada, *ANSYS LS-DYNA* yazılımı ile tabakalı kompozit malzemenin düşük hızlı darbe yükü altındaki mekanik davranışı ele alınmıştır. Tabakalı kompozit malzemenin tamirinde kullanılan yapıştırıcı tipi ve kalınlığı, yama geometrisi, sınır şartlarının ve yüzey alanının değişimi gibi durumlarda düşük hızlı darbe yüklemesinin mekanik davranışı nasıl değiştirdiğinin cevabı ortaya konmuştur. Bunlara ek olarak vurucunun hızındaki, geometrisindeki değişimin malzeme üzerinde yarattığı dinamik etki de incelenmiştir.

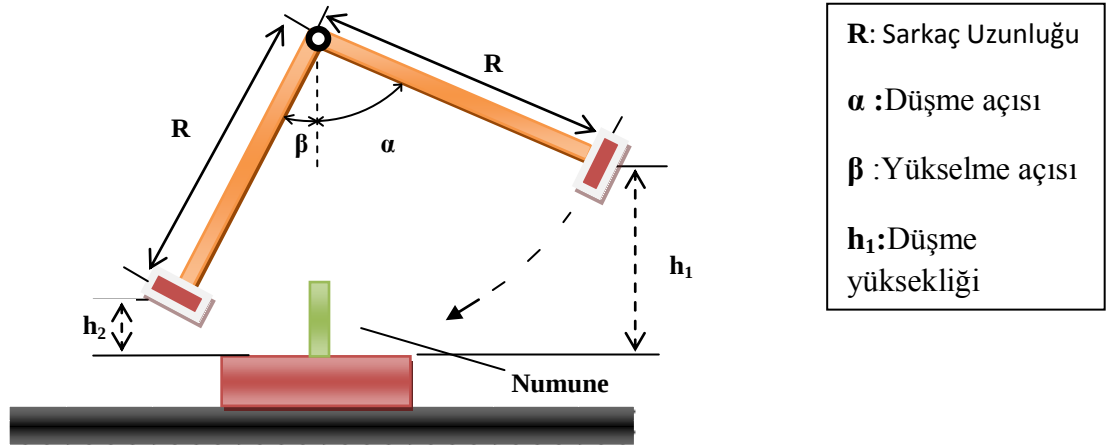
3. DARBE TEST YÖNTEMLERİ

Darbe testleri genel olarak üç kategoride toplanmaktadır, bunlar; sarkaç testleri (izod ve charpy) , hava veya gaz silah (balistik-yüksek hızlı darbe) testleri ve ağırlık düşürme (düşük hızlı darbe) testleridir [43].

3.1 Sarkaç (Çentik Darbe) Testleri

Çentik darbe deneyinde amaç, malzemenin bünyesinde muhtemel bulunacak bir gerilme konsantrasyonunun (gerilim birikiminin) darbe esnasında çentik tabanında suni olarak teşkil ettirilip, malzemenin bu durumda dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin etmektir. Bazı durumlarda örneğin, gri dökme demir numunelerinde, malzemenin bünyesindeki grafit levhacıklar çentik gibi etki yapacaklarından, ayrıca çentik açmaya lüzum yoktur. Çentikli bir numune zorlandığı zaman, çentiğin tabanına dik bir gerilme meydana gelir. Kırılmanın başlaması, bu gerilmenin etkisi ile olur. Numunenin kırılabilmesi için bu dik (normal) gerilmenin, kristalleri bir arada tutan veya kristallerin kaymasına karşı koyan kohezif dayanımdan fazla olması gerekir. Numune, plastik biçim değiştirmeye fırsat bulamadan bu hal meydana gelirse, buna gevrek kırılma denir. Burada kırılan yüzey, düz bir ayrılma yüzeyidir.

Deney esnasında, numune kırılmadan önce çoğu zaman plastik biçim değiştirme meydana gelir. Uygulanan kuvvet etkisi ile normal (dik) gerilmeye ilaveten, bununla yaklaşık olarak 45° farklı bir kayma gerilmesi etki etmeye başlar. Kayma gerilmesi, kayma dayanımını (kritik kayma gerilmesi) aştığı an, elastik (esnek) özellik sona erer ve plastik biçim değiştirme başlar. Bu durumda önce plastik biçim değiştirme, daha sonra kırılma meydana gelir. Buna sünek kırılma hali denir ve kırılma yüzeyi girintili çıkıntılı bir görünüştür. Darbe deneyinde, numunenin dinamik bir zorlama altında kırılması için gereken enerji miktarı tayin edilir. Bulunan değer, malzemenin darbe direnci (darbe mukavemeti) olarak tanımlanır. Bu deneylerde, Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilen sarkaç tipi cihazlardan faydalanılır.



Şekil 3.1.Sarkaç tipi darbe test cihazı

Ağırlığı G olan sarkaç, h_1 yüksekliğine çıkarıldığında potansiyel enerjisi ($G \times h_1$) mertebesindeir. Sarkaç bu yükseklikten serbest bırakıldığında, düşey bir düzlem içinde hareket ederek numuneyi kırar ve aksi istikamette h_2 yüksekliğine kadar çıkar. Böylece, numunenin kırılmasından sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji ($G \times h_2$) mertebesinde demektir. Sarkacın, numune ile temas haline geldiği andaki potansiyel enerji ile numune kırıldıktan sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji fark, o numunenin kırılması için gereken enerjiyi başka bir deyimle, darbe direncini verir. Bu enerji aşağıdaki formülle de gösterilebilir:

$$\text{Kırılma enerjisi} = G (h_1 - h_2) = G.R. (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (3.1)$$

G : Sarkacın ağırlığı (kg)

R : Sarkacın ağırlık merkezinin, sarkacın salınım merkezine uzaklığı (m),

h_1 : Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m),

h_2 : Sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m),

α :Düşme açısı (derece),

β :Yükseliş açısı (derece),

Darbe direnci (kg-m) veya (kg-m/cm²) cinsinden ifade edilmektedir. Bu deney tamamen ampirik olduğu ve şartlar değiştikçe malzeme farklı özellik gösterdiği için numunelerin cihaza uygun bir şekilde yerleştirilmesi, doğru sonuç alma yönünden önemlidir.

Deney esnasında sarkaç, potansiyel enerjisi tespit edilen bir yüksekliğe çıkarılır. Daha sonra numune, uygun bir şekilde yerleştirilir. Örneğin, en çok uygulanan Charpy deneyinde numune, mesnetlere tam yaslanacak şekilde ve çekicinin salınım düzlemi ile çentiğin simetri düzlemi 0.5 mm içinde birbirine çakışacak şekilde yerleştirilir. Bu durum cihaza bağlı, yardımcı bir aletle sağlanabilir. Numune uygun şekilde yerleştirildikten sonra, sonuçların okunduğu kadranın göstergesi başlangıç durumuna getirilir ve sarkaç düzgün bir şekilde serbest bırakılır. Deneyden sonra kadrandan sonuç okunur.

3.1.1. Charpy Darbe Testi

Charpy darbe deneyi, yatay ve basit kiriş halinde iki mesnede yaslanan numunenin çentik tabanına, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması sonucu çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmeler etkisi ile numunenin kırılması için harcanan enerjiyi tespit etme işlemidir [43].

3.1. 2. İzod Darbe Testi

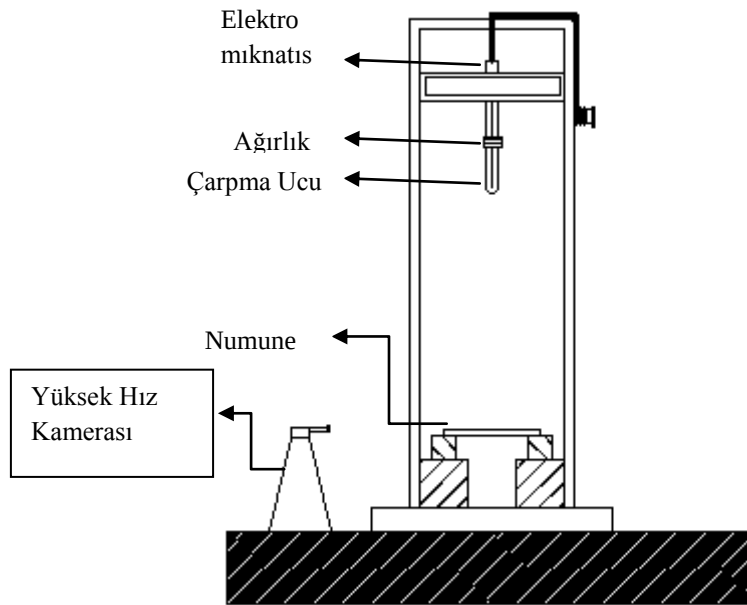
İzod darbe testi, dikey ve konsol kiriş halinde bir kavrama çenesine tespit edilen numunenin yüzeyine, kavrama çenesinden belirli yükseklikte, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmeler etkisi ile numunenin kırılması için sarf edilen enerjiyi tayin işlemidir [43].

3.2. Yüksek Hızlı Darbe Testi

Yüksek hızlı darbeler 10 m/s'nin üzerindeki hızlar için sınıflandırılabilir. Genellikle balistik deneylerde mermi kullanılarak deneyler yapılmaktadır. Özellikle askeri alanda bu çalışmalar yapılmış olup, çelik yelekler ve zırhlı araç malzemeleri üzerinde testler gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında uçakların iniş ve kalkış esnasında pist üzerinde bulunan küçük taş vb. maddelerin tekerleklerden fırlayarak uçak gövdesine veya kanatlarına çarpması da hasar oluşturacağından bu şekilde modellemeler yapılabilir. Bu deneyler gaz tabancası kullanılarak yapılmaktadır.

3.3. Düşük Hızlı Darbe Testi

Düşük hızlı darbe testleri maksimum 10 m/s çarpma hızından daha düşük hızdaki darbeler olarak tanımlanmaktadır. Bu hız değeri 5 m'lik bir düşme yüksekliğine karşılık gelmektedir [43]. Bu hızın üzerindeki darbeler, yüksek hızlı darbe olarak literatürde geçmektedir [43]. Standart olarak üretilen darbe test cihazlarında bu yükseklikteki potansiyel enerji yay aracılığı ile sağlanarak cihazın 5-6 m gibi bir yükseklikte olması önlenmiştir. Şekil 3.2 de standart bir darbe test cihazı görülmektedir.



Şekil 3.2. Ağırlık düşürme test düzeneği

4. DARBE SONUCU OLUŞAN HASAR TİPLERİ

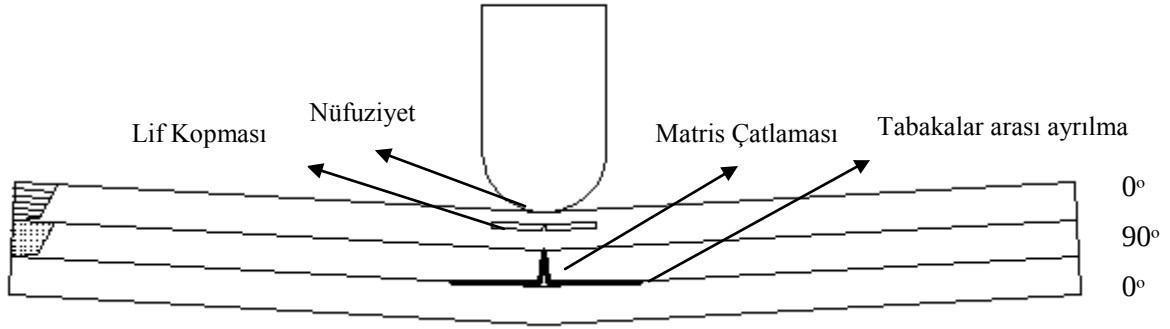
Darbe üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu günümüzde popüler bir kullanım alanına sahip kompozit malzemeler üzerinde yapılmaktadır [45]. Yapılan çalışmalar içerisinde bazı araştırmacılar darbe deneylerini hız sınırları göz önüne alarak sınıflandırma yapmışlardır, ancak bu sınırlarda bile görüş ayrılıkları vardır, bazıları ise kompozit malzemedeki hasar durumuna göre sınıflandırmayı tercih etmişlerdir. Bu ikinci tür sınıflandırmada malzemede sadece tabaka ayrılmaları oluyorsa düşük hız, kompozitte delinme oluyorsa yüksek hız olarak adlandırılmaktadır [44, 45, 46]. Ancak bu durum deneylerde kullanılan kompozit malzemelerin geometrilerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Aynı darbe şartlarında daha ince bir malzemenin daha kalın bir malzemeye göre delinebilme ihtimali doğal olmaktadır.

Kompozit malzemeler üzerindeki araştırmalar bu malzemelerin eksene dik doğrultulardaki darbe yüklerine (imalat, bakım ve onarım esnasındaki küçük çaplı çarpma, alet düşürme vb.) karşı çok hassas olduklarını ortaya koymuştur.

Bunun sebebi enine doğrultuda takviye elemanı olmayan tabakalı kompozitlerde (plak vb. yapılarda), malzemenin elastik özelliğinin enine doğrultuda düşük olmasıdır.

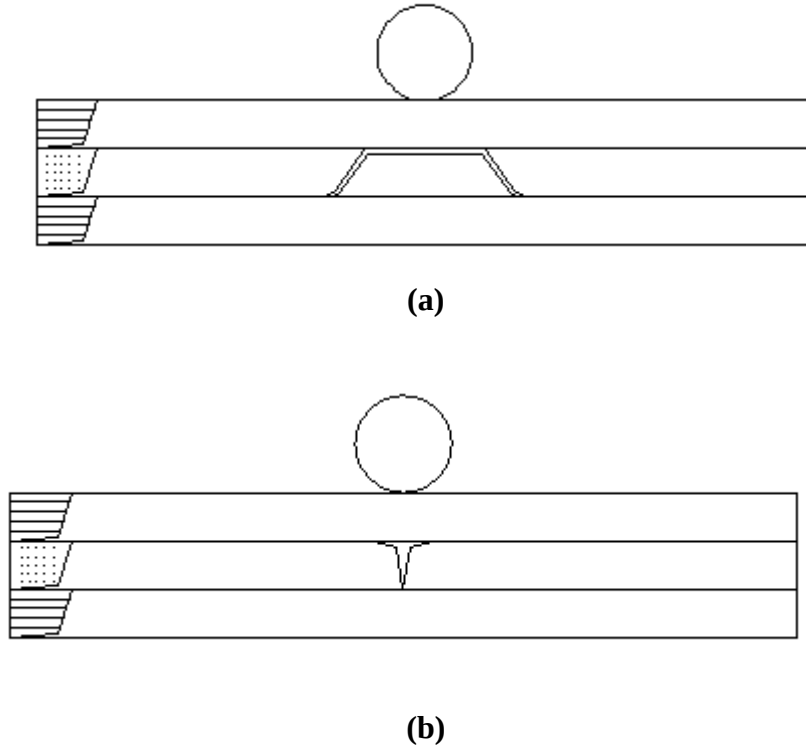
Düşük hızlı darbeler genel olarak tabakalar arası ayrılma (delaminasyon), elemanlarda oluşan artık gerilmeler ve malzeme performansının düşmesi gibi belirli konularla ilgilidir [47, 48, 49,50].

Kompozit malzemeler kullanım alanlarında değişik yüklemelere maruz kalırlar, Tabakalı kompozitler için bu yüklemelerden en kritik olanı darbe yükleridir. Luo' ya göre kompozit yapılarda darbeden dolayı oluşan hasar, tasarım ve uygulamada göz önüne alınması gereken en önemli etkidir [40]. Düşük hızlı darbeler, oluşan hasar bakımından matris çatlaması, delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) oluşumu ve lif kopmalarının görüldüğü darbelerdir.



Şekil 4.1. Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar tipleri.

- 1. Matris kırılması:** Çatlama liflere paralel meydana gelir. Bunun nedeni bası gerilmesi ve kesme gerilmeleridir.



Şekil 4.2 Matris çatlakları (a) Çekme çatlağı (b) Kayma çatlağı.

2.Tabakalar arası ayrılma (delaminasyon):Tabakalar arası ayrılma eğilme etkisinden kaynaklanır.

3. Fiber kopması: Çekme gerilmesi etkisinde lif kopar, sıkıştırma etkisiyle lif eğilir.

4. Batma (nüfuziyet): Çarpan cisim kompozit malzemeye tamamıyla nüfuz eder. Malzemedeki hasar modlarının belirlenmesi sadece darbe olayı hakkında bilgi edinmek için değil, ayrıca yapının kalıcı mukavemeti hakkında fikir edinmeyi sağlaması açısından da çok önemlidir. Hasar modları arasındaki etkilenmeyi anlamak, hasar modunun başlaması ve ilerlemesini anlamak açısından da çok önemlidir.

5. DARBE MEKANİĞİ

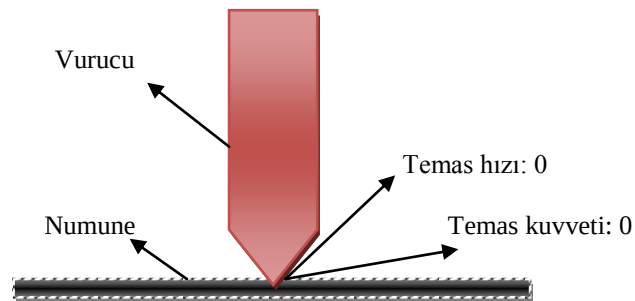
Darbe mekaniği, bir çarpışma esnasında ortaya çıkan tepki kuvvetleri ile yapıların bu tepki kuvvetlerine karşı gösterdiği dinamik davranışıyla ilgilenmektedir. Bu konu, otomobillerin çarpışma dayanımının geliştirilmesinden spor aletlerinin tasarımına kadar geniş aralıktaki birçok mühendislik uygulamalarını kapsar. Düşük hızlı çarpışmalar sadece küçük deformasyonlara neden olan temas basınçlarını doğurur. Bunlar temas alanının yakınlarındaki küçük bir bölgede önemlidir.

Yüksek hızlarda temas alanının yakınlarında plastik akmadan kaynaklanan büyük deformasyonlar (birim şekil değiştirmeler) vardır. Bu büyük yerel deformasyonlar, krater oluşturma ve dalma şeklinde büyük belirginlikte olup kolaylıkla gözlenebilir. Her bir durumda deformasyonlar, çarpışan cisimlerde hız değişimine neden olan temas kuvvetlerinin bir parçasıdır.

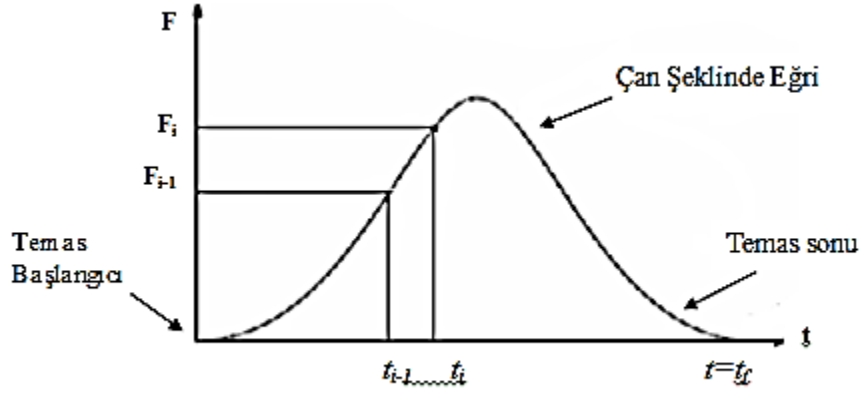
Büyük plastik deformasyonlara neden olacak çarpma hızı $102 \times V_y$ ile $103 \times V_y$ arasındadır. Buradaki V_y yumuşak bir cisimde plastik akmayı başlatmak için gerekli en düşük izafi hızdır (metaller için akmadaki normal çarpma hızı 0.1 m/s mertebesindedir)[40].

5.1. Düşük Hızlı Darbenin Kinematik Analizi

Darbe başlangıç şartları Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekil 5.2 tipik bir düşük hızlı darbe testinin kuvvet zaman grafiği görülmektedir.



Şekil 5.1 Darbe başlangıç anı



Şekil 5.2. Düşük hızlı darbenin kuvvet-zaman grafiği

Newton'un ikinci kanunu kullanılarak $t = t_i$ 'de ivme hesaplanmıştır. Burada, $t = t_i$ 'de F_i değerleri kuvvet sensöründen elde edilmiştir.

$$a_i = \frac{F_i}{m} \quad (5.1)$$

$$(t) = kt + ca(t) \quad (5.2)$$

Burada k ;

$$k = \frac{a_i - a_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (5.3)$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt}, \quad dv = a(t)dt \quad (5.4)$$

Denklem (5.4) deki hız yerine;

$$v = v_0 + \frac{1}{2}k(t^2 - t_0^2) + c(t - t_0) \quad (5.5)$$

Eğer denklem (5.5) (t_{i-1}, t_i) için düzenlenirse;

$$v_i = v_{i-1} + \frac{1}{2}k_i(t_i^2 - t_{i-1}^2) + c_i(t_i - t_{i-1}) \quad (5.6)$$

$$ds = v dt \quad (5.7)$$

Eğer denklem (5.5) denklem (5.7)'de yerine konulursa;

$$S = S_0 - \frac{1}{6}k(t^3 - t_0^3) + \frac{1}{6}c(t^2 - t_0^2) - \left(v_0 + ct_0 + \frac{1}{2}kt_0^2\right)(t - t_0) \quad (5.8)$$

Denklem 5.8 (t_{i-1}, t_i) aralığı için düzenlenirse denklem 5.9 elde edilir.

$$S = s_{i-1} + \frac{1}{6}k_i(t_i^3 - t_{i-1}^3) + \frac{1}{6}c_i(t_i^2 - t_{i-1}^2) - \left(v_{i-1} + c_it_{i-1} + \frac{1}{2}k_it_{i-1}^2\right)(t_i - t_{i-1}) \quad (5.9)$$

Böylece (F_i, t_i) değerlerinden (F_i, s_i) değerleri elde edilmiş olur.

6. DİNAMİK TESİRLER

Mekanikte kütlelerin ivmeli hareketlerinden doğan atalet kuvvetleri, dinamik çarpışmalardan doğan kuvvetler ve zamanla değişen kuvvetler hep dinamik kuvvetler olarak kabul edilmektedir. Dinamik yüklemelerden doğan kuvvetler ve şekil değiştirmeler ile statik yüklemelerden doğan kuvvetler ve şekil değiştirmeler birbirlerinden farklıdırlar ve dinamik etkenlerde beklenmedik sonuçlar elde edilmektedir.

Dinamik etkiler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler:

- a) İvmeli hareketlerdeki atalet kuvvetleri
- b) Ani yükleme ve çarpışma problemleri
- c) Elastik titreşim problemleri

Elastik sistemlerin dinamik etkiler altındaki davranışına “ elasto- kinetik ” denir. Burada asıl problem, dinamik problemleri D’alembert Prensibi kullanılarak denge problemine dönüştürülmesidir. Bunun için örneğin tek bir maddesel noktaya etki eden kuvvet için;

$$F = m a \quad (6.1)$$

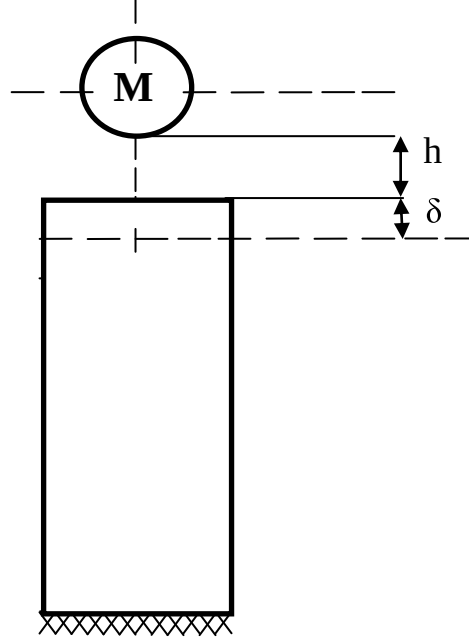
denklemini yazılmaktadır. D’Alembert Prensibi kullanılarak; bu denklem

$$F - m a = 0 \quad (6.2)$$

şeklinde yazılabilir. Bu prensip katı cisimler içinde gerçekleştirilebilir. Dinamik etkenlerden doğan gerilmeler ve şekil değiştirmeler ile statik etkilerden doğan gerilmeler ve şekil değiştirmeler mukayese edilecek olursa nümerik bir çarpan elde edilir, buna “Dinamik Çarpan veya “Çarpma Katsayısı ” adı verilir.

$$\frac{\sigma_{dinamik}}{\sigma_{statik}} = \emptyset \quad \text{veya} \quad \sigma_{dinamik} = \emptyset \sigma_{statik} \quad \text{şeklinde tanımlanır.} \quad (6.3)$$

Üzerine belirli bir h mesafesinden düşen ağırlıktan dolayı bir çubuğun çökme miktarının hesabı



Şekil 6.1 Üzerine düşen ağırlıktan dolayı bir çubuğun çökmesi

M kütleli cisim h yükseklikten çubuk üzerine düşünce çubuk δ kadar çökmüş olsun. Bu durumda M kütleli cismin kaybettiği potansiyel enerji:

$$U_1 = Mg(h + \delta) \quad (6.4)$$

Bu enerji çubukta şekil değiştirme enerji olarak depolanmaktadır. Eğer darbe anında çubukta oluşan kuvvet P ise, P kuvvetinin çubuk üzerinde yaptığı iş, çubuk içinde şekil değiştirme enerjisi olarak depolanır.

Bu enerji:

$$U_2 = \frac{1}{2} p \delta \quad (6.5)$$

şeklinde ifade edilir

$$U_1 = U_2 \quad \text{olduğundan;}$$

$$Mg(h + \delta) = \frac{1}{2} p \delta \quad (6.6)$$

eşitliği elde edilir. Buradan P ve δ bilinmeyenlerdir. P ; δ cinsinden yazılabilir. Çubukta meydana gelen çökme için;

$$\delta = PL / AE \text{ şeklinde ifade edilen eşitlikten, } P = \delta AE / L \text{ eşitliği elde edilir.} \quad (6.7)$$

Bulunan bu P değeri yerine yazılarak;

$$Mg(h + \delta) = \frac{AE}{2L} \delta^2 \quad (6.8)$$

$$(AE\delta^2) - (2MgL\delta) - (2MgLh) = 0 \quad (6.9)$$

$$\delta_{1-2} = \frac{MgL \pm \sqrt{M^2g^2L^2 + 2MgLAEh}}{AE} \quad (6.10)$$

$$\delta_{\text{statik}} = \frac{MgL}{AE} \quad (6.11)$$

statik çökmeyi gösterdiğine göre pozitif kök alınarak;

$$\delta_{\text{dinamik}} = \delta_{\text{statik}} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{\delta_{\text{statik}}} \right)} \right) \quad (6.12)$$

şeklinde dinamik çökme bulunur. Burada dinamik çarpan ;

$$\phi = 1 + \sqrt{1 + (2h/\delta_{\text{statik}})} \quad (6.13)$$

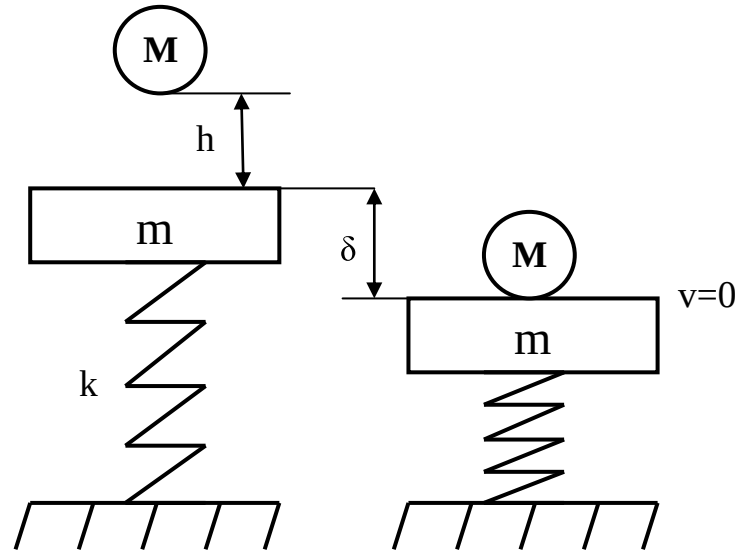
Çökme $\emptyset$ katı kadar arttığı gibi buna bağlı olarak gerilme ve kuvvet de, kuvvet ile çökme arasındaki lineer bağıntıdan dolayı $\emptyset$ katı kadar artar. Buna göre çarpma halindeki kuvvet;

$$P_{dinamik} = \emptyset P_{statik} \quad (6.14)$$

Gerilme ise:

$$\sigma_{dinamik} = \emptyset \sigma_{statik} = \emptyset \frac{Mg}{A} \quad (6.15)$$

olur.



Şekil 6.2 Ani yükleme durumu

M kütleli bir cisim diğer cismin üzerine düşünce bir miktar enerji verir ve onu harekete geçirir. Çarptığı andaki hızı V_0 ise, M kütleli cismin kinetik enerjisi; potansiyel enerjisine eşit olur.

$$M V_0^2 / 2 = M g h \quad (6.16)$$

Buradan,

$$V_0^2 = 2 g h \quad (6.17),$$

olarak çarpma hızı elde edilir. Çarpışmanın plastik olduğun kabul ederek, momentumun korunumundan;

$$M V_0 + 0 = (M + m) V \quad (6.18)$$

eşitliği yazılabilir. Buradan,

$$V = (M V_0) / (M + m) \quad (6.19)$$

elde edilir. Bundan sonra bu kütleler bir δ mesafesi kadar hareket ederek bütün enerjilerini yaya aktarırlar ve müşterek hızları sıfır olur. Yaydaki potansiyel enerji: $k \delta^2 / 2$ olduğuna göre, enerji bağıntısı:

$$\frac{1}{2} (M + m) v^2 + M g \delta = \frac{1}{2} k \delta^2 \quad (6.20)$$

şeklinde ifade edilir. Buradan yaydaki çökme miktarı

$$k \delta^2 - 2 M g \delta - (M + m) v^2 = 0 \quad (6.21)$$

$$\delta_{1-2} = \frac{M g \pm \sqrt{M^2 g^2 + k (M + m) v^2}}{k} \quad (6.22)$$

olarak elde edilir.

Statik yükleme olsaydı yaydaki çökme miktarı:

$$\delta_{\text{statik}} = M g / k \quad (6.23)$$

olacağından ;

$$\emptyset = \delta / \delta_{\text{statik}} \quad (6.24)$$

dinamik çarpanını verir. Eğer M kütleli cismin, m kütleli cisme çarptığı andaki enerjisi;

$$W_0 = M V_0^2 / 2 = M g h \quad (6.25)$$

ile çarpan cismin sisteme statik olarak etki etmesi durumunda aktardığı enerji :

$$U = (M g)^2 / 2k \quad (6.26)$$

ile gösterilirse, dinamik çarpan;

$$\emptyset = 1 + \sqrt{1 + \eta \frac{W_0}{U}} \quad (6.27)$$

Burada η değeri;

$$\eta = 1 / (1 + m/M) \quad (6.28)$$

şeklinde ifade edilir ki bu ifade çarpışmadaki enerji kaybını göstermektedir. Dinamik çarpan,

$$\emptyset = 1 + \sqrt{1 + \eta 2 h / \delta_{\text{statik}}} \quad (6.29)$$

Eğer çarpılan cismin kütlesi m ihmal edilirse

$$\emptyset = 1 + \sqrt{1 + 2 h / \delta_{\text{statik}}} \quad (6.30)$$

Bu durumda yaydaki dinamik çökme;

$$\delta_{\text{dinamik}} = \emptyset \delta_{\text{statik}} \quad (6.31)$$

yay kuvvetiyle yaydaki çökme arasındaki bağıntı lineer olduğundan; dinamik kuvvet :

$$P_{\text{dinamik}} = \emptyset P_{\text{statik}} \quad (6.32)$$

Eşitliği ile ve dinamik gerilme de;

$$\sigma_{\text{dinamik}} = \emptyset \sigma_{\text{statik}} \quad (6.33)$$

şeklinde elde edilir.

7. ARAŞTIRMA BULGULARI

7.1. Problemin Tanımı

Bu çalışmada, *ANSYS LS-DYNA* yazılımı kullanılarak ortasında farklı geometrilere sahip delik bulunan kompozit levha, farklı geometri ve kalınlıklara sahip kompozit yama ile takviyelendirilmiştir. Düşük hızlı darbe yükü altında, levha delik boyutu ve şekli, vurucu geometrisi, vurucu hızı, yapıştırıcı çeşitliliği ve kalınlığı gibi faktörlerin kompozit levha üzerindeki darbe davranışları incelenmiştir. Çalışmada çeşitli vurucu geometri ve hızlarına sahip vurucuların tabakalı kompozit malzemeler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında, zamana bağlı olarak temas kuvveti, yer değiştirme, toplam enerji, çekme ve basma gerilmeleri, vurucu hızlarının değişimi gibi etkenler grafiklerle sunulmuştur.

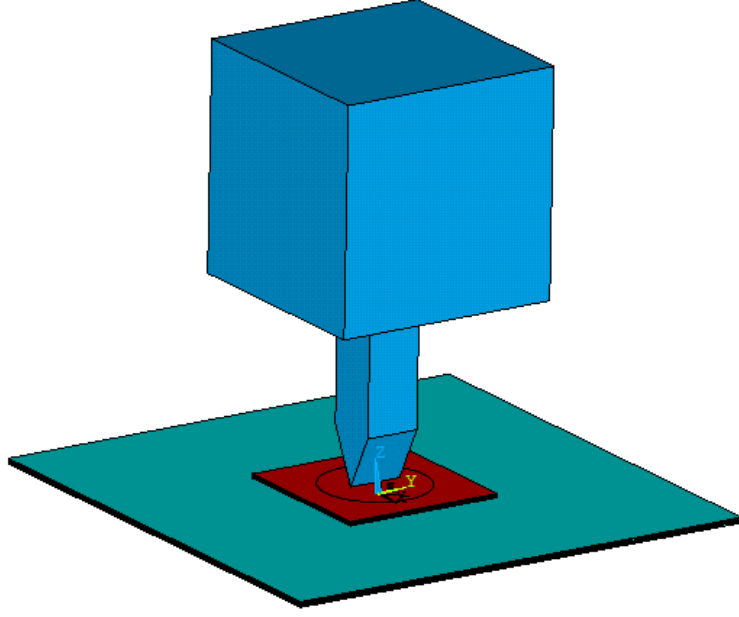
7.2 ANSYS LS –DYNA yazılımının kullanımı ve işlem adımları

ANSYS LS-DYNA yazılımı; mühendislik problemlerinin bilgisayar destekli sonlu elemanlar metodu ile çözümünde kullanılan paket programlardan biri olup problemlerin çözümünde kolaylık ve pratiklik kazandırması sebebi ile tercih edilmiştir. SEM ile modelleme yapılırken vurucu ve kompozit malzeme için *SOLID 164* eleman tipi kullanılmıştır.

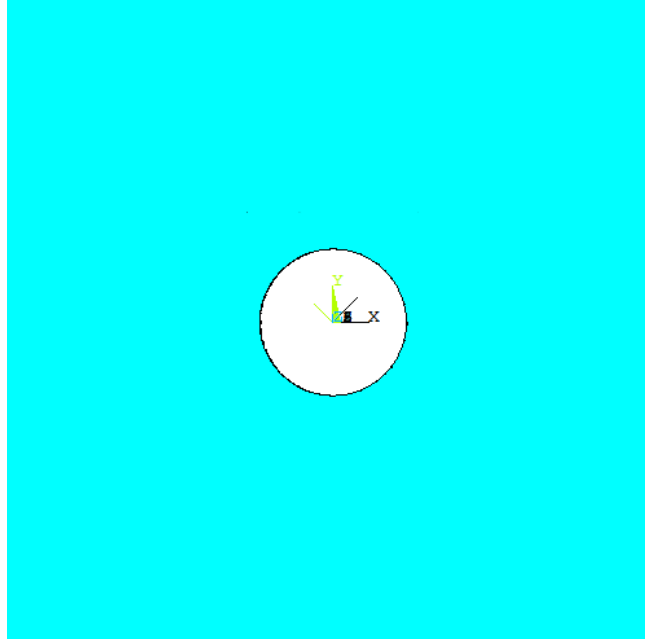
Vurucu ve levhanın modellemeleri yapıp mesh işlemi tamamlandıktan sonra kontak işlemi için *surface to surface –Automatic (ASTS)* seçeneği kullanılmıştır. Vurucunun ilk hızı 3 m/s olup yer çekimi ivmesi vurucu üzerinde etkili olmuştur.

ANSYS LS –DYNA yazılımının işlem adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Analiz tipinin belirlenmesi.
 - ✓ *h-Method* yada *LS-DYNA Explicit*.
- Eleman tipinin belirlenmesi.
 - ✓ Kullanılan modele göre levha ve vurucu için eleman tipinin belirlenmesidir.
- Malzeme özelliklerinin ANSYS'e girilmesi.
 - ✓ Modellemede esnasında ne kadar farklı malzeme özelliklerine sahip model varsa(levha, yapıştırıcı, yama, vurucu vs.) bu modellerin malzeme özelliklerinin ANSYS'e tanıtılmasıdır.
- Modelleme işleminin gerçekleştirilmesi.
 - ✓ Modelleme işlemi için gerekli olan (nokta, çizgi, alan, hacim) değerlerin ansys'e girilmesidir.
- SEM modelinin elde edilmesi.
 - ✓ Kullanılan modellerin sonlu elemanlara ayrılarak uygun mesh sıklığının elde edilmesidir.
- Bileşenlerin tanımlanması.
 - ✓ Aralarında kontak ilişkisi bulunan vurucu ve levha isimlerinin ansys'e tanımlanmasıdır.
- Kontak tanımlanması.
 - ✓ Daha önceden bileşenleri tanımlanmış kontak modellerinin seçilmesi işlemidir.
- Vurucuya ilk hızın uygulanması ve yer çekimi ivmesinin aktif edilmesi.
- Yükleme ve sınır şartlarının uygulanması
 - ✓ Levha için istenilen mesnet tipinin (ankastre, sabit vs.) belirlenmesidir.
 - ✓ Yükleme yapılan çalışmaya göre sıcaklık, kuvvet, basınç olabilir.
- Çözüm.
- Sonuçların elde edilmesi.
- Çıktı kontrollerinin yapılması şeklindedir.



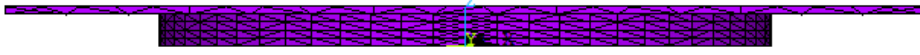
Şekil 7.1 Modelin izometrik görünümü.



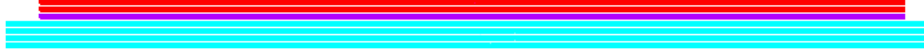
Şekil 7.2 Levha modeli.



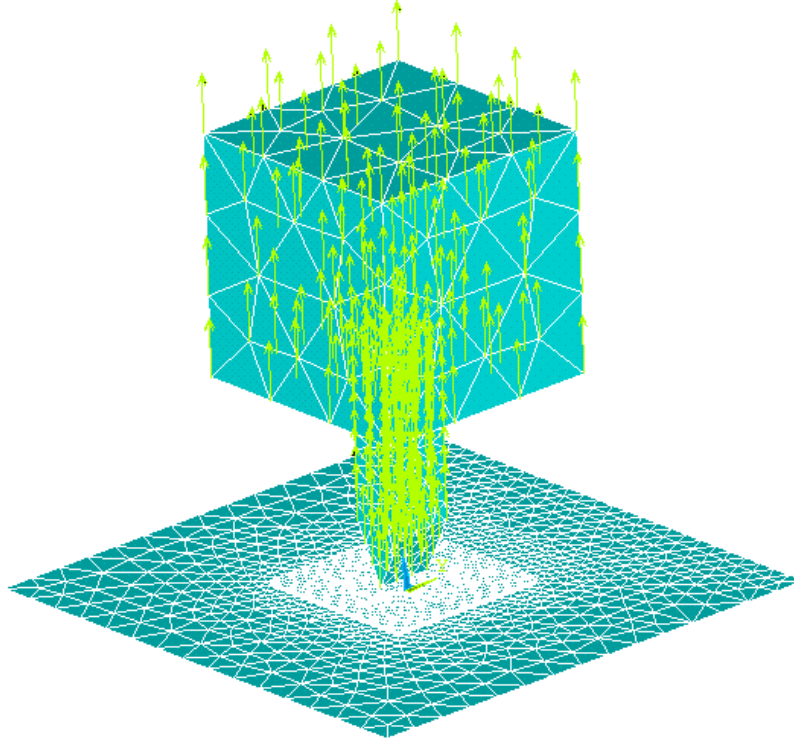
Şekil 7.4 Yama modeli.



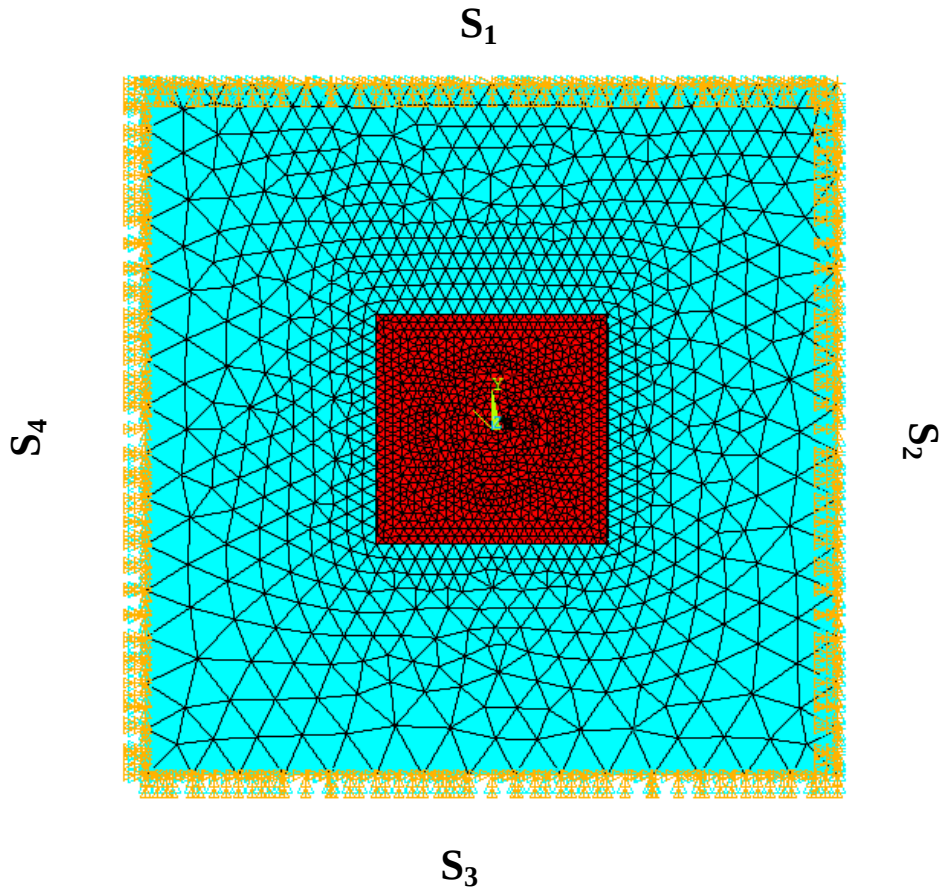
Şekil 7.3 Yapıştırıcı modeli.



Şekil 7.5 Levha, yapıştırıcı, yama modeli.



Şekil 7.6 Sonlu elemanlara ayrılmış modelin mesh yapısı ve yer çekimi ivmesi.



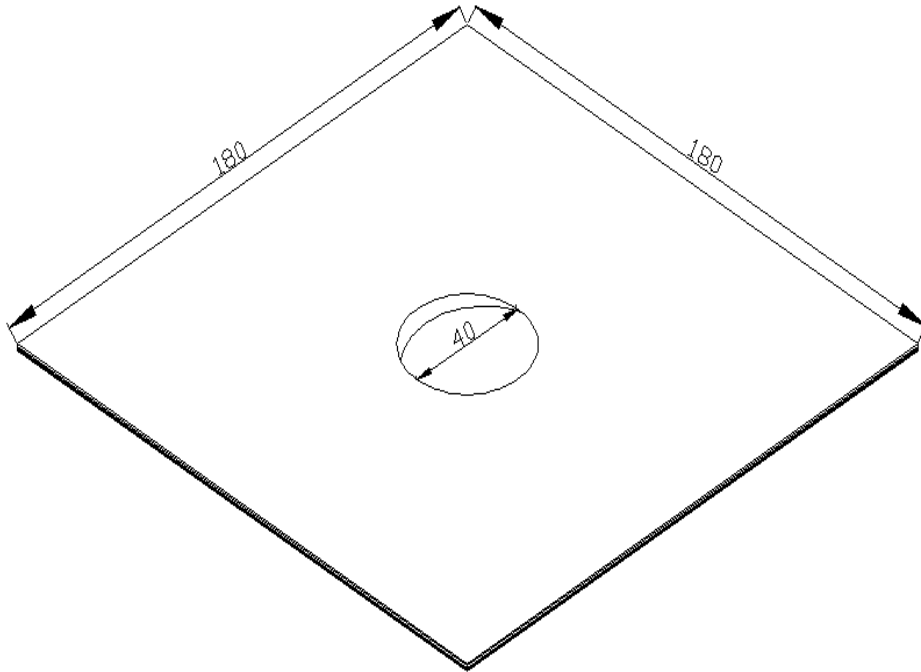
Şekil 7.7 Dört kenarı ankastre mesnet levhanın sınır şartları.

7.3 Modelin Mekanik ve Geometrik Özellikleri

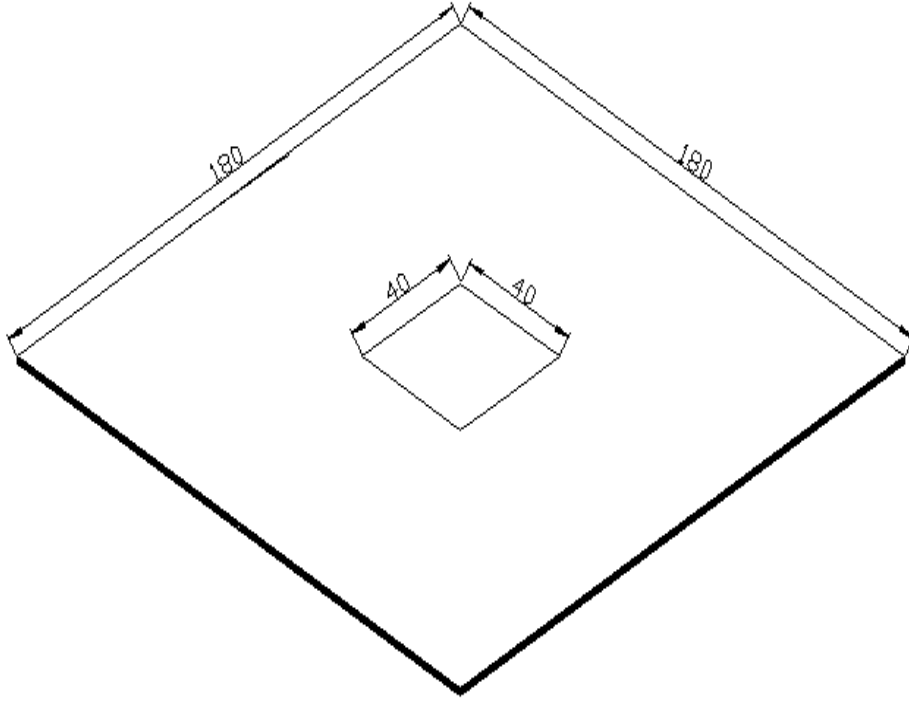
7.3.1 Levhanın mekanik ve geometrik özellikleri

Bu çalışmada *LS-DYNA Explicit* metodu ile oluşturulmuş tabakalı kompozit levha üç boyutlu modellenmiştir. Bu model için *SOLID164* eleman tipi kullanılmıştır. Tabakalı kompozit levha 4 tabakalı olup oryantasyon açıları: $[0^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ]$ dır.

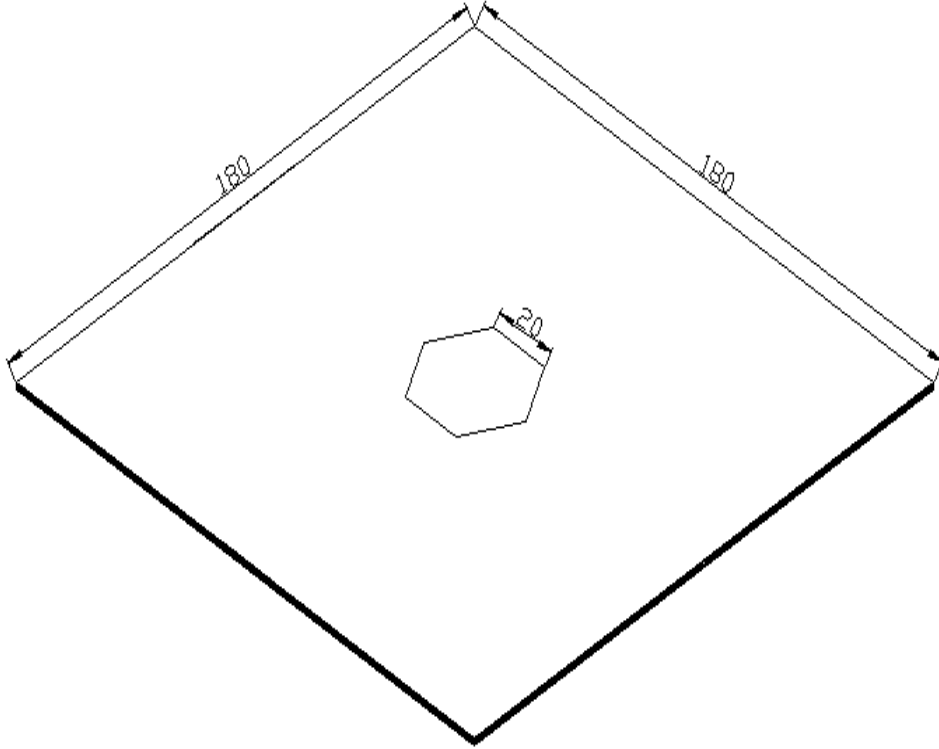
Levha boyutları $180 \times 180 \text{ mm}^2$ olup her bir tabaka kalınlığı 0,5 mm dir. Ortasında dairesel delik bulunan levhanın, kare ve altıgen delik için çözümleri yapılmıştır. Delik tiplerinin kompozit malzeme üzerindeki etkileri incelenmiş ve grafikler halinde sunulmuştur. Tablo 7.8-10’da farklı delik tiplerine sahip levha modellerinin boyutları verilmiştir.



Şekil 7.8 Ortasında dairesel delik bulunan levha.



Şekil 7.9 Ortasında kare delik bulunan levha.



Şekil 7.10 Ortasında altıgen delik bulunan levha.

Tablo 7.1. Kompozit levha ve yama malzemesine ait mekanik özellikler [51].

Mekanik özellikler	Değerleri
Elastisite modülü (E_1) (GPa)	48
Elastisite modülü (E_2) (GPa)	15.3
Elastisite modülü (E_3) (GPa)	15.3
Kayma modülü (G_{12}) (GPa)	5.1
Kayma modülü (G_{23}) (GPa)	5.8
Kayma modülü (G_{13}) (GPa)	5.1
Poisson oranı (ν_{12})	0.315
Poisson oranı (ν_{23})	0.332
Poisson oranı (ν_{13})	0.315
Yoğunluk (ρ) (kg/m^3)	2112

7.3.2 Yapıştırıcının mekanik ve geometrik özellikleri

Yapılan çalışmada yapıştırıcı olarak üç farklı yapıştırıcı malzemesi seçilmiştir. Farklı yapıştırıcı malzemelerinin yanı sıra farklı kalınlıklara sahip yapıştırıcıların kompozit malzeme üzerindeki darbe davranışları incelenmiştir.

Bu yapıştırıcıların malzeme özellikleri Tablo 7.2, 7.3 ve 7.4’de verilmiştir. Yapıştırıcı geometrik özellikleri Tablo 7.12’de verilmiş olup yapıştırıcı kalınlıkları: 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm ve 0.125 mm’dir.

Tablo 7.2. FM 73 yapıştırıcısına ait mekanik özellikler [52].

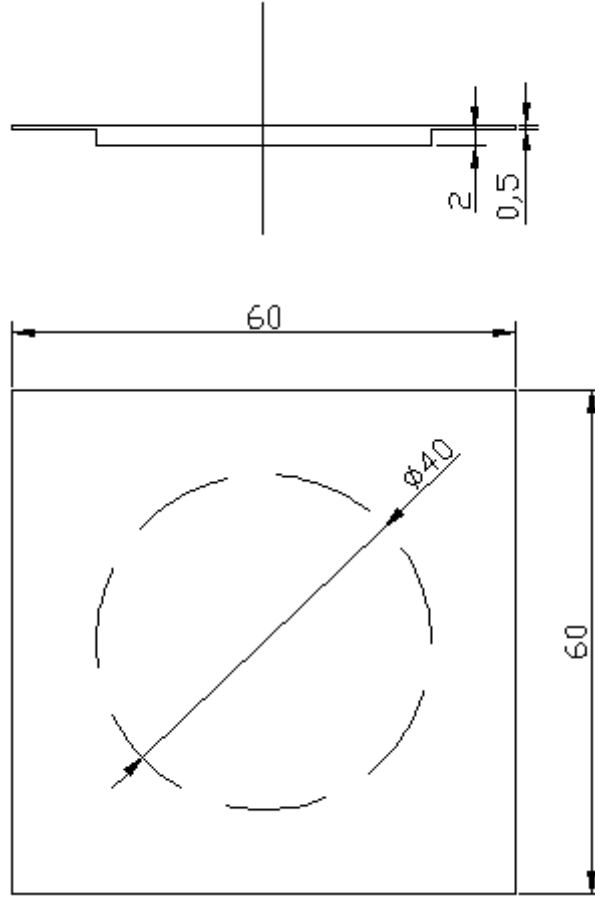
Yapıştırıcı ismi	FM 73
Elastisite Modülü (GPa)	2.14
Poisson oranı (ν)	0.35
Yoğunluk (ρ) (kg/m^3)	1150

Tablo 7.3. EN11343 Yapıştırıcısına ait mekanik özellikler [53].

Yapıştırıcı ismi	EN 11343
Elastisite Modülü (GPa)	1
Poisson oranı (ν)	0.4
Yoğunluk (ρ) (kg/m^3)	1200

Tablo 7.4. EA9395 yapıştırıcısına ait mekanik özellikler [54].

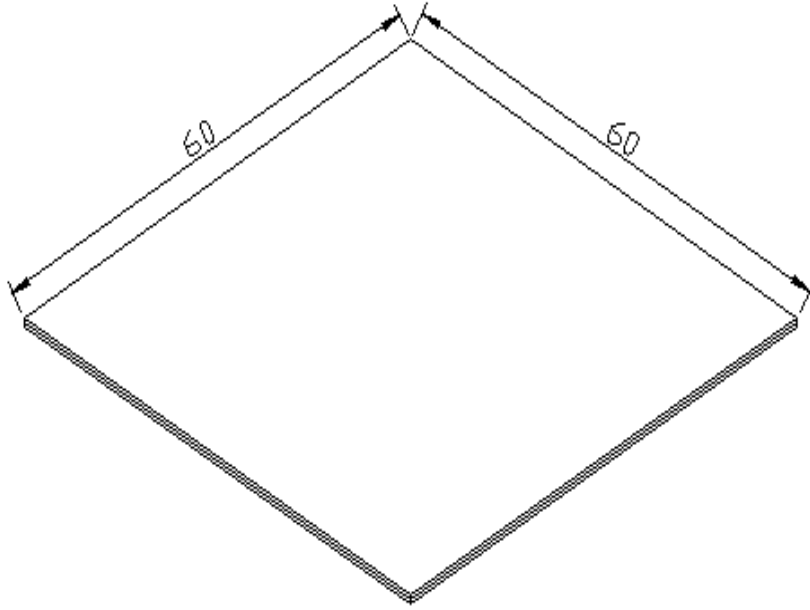
Yapıştırıcı ismi	EA 9395
Elastisite Modülü (GPa)	4.012
Poisson oranı (ν)	0.3
Yoğunluk (ρ) (kg/m^3)	1273



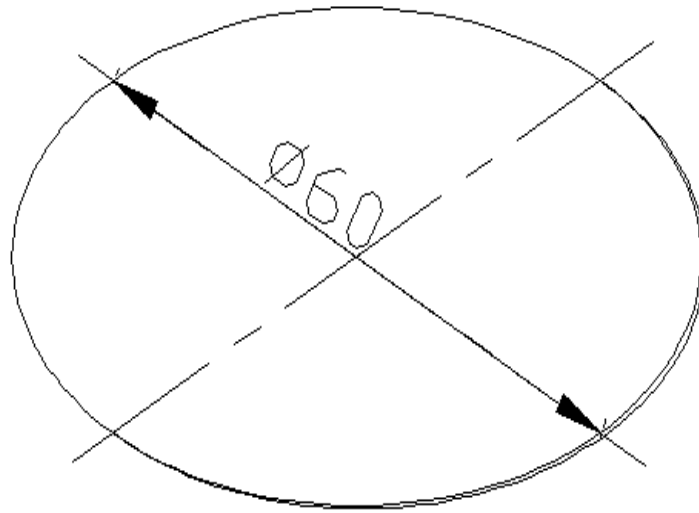
Şekil 7.11 Yapıştırıcı modeli ölçüleri.

7.3.3 Yamanın mekanik ve geometrik özellikleri

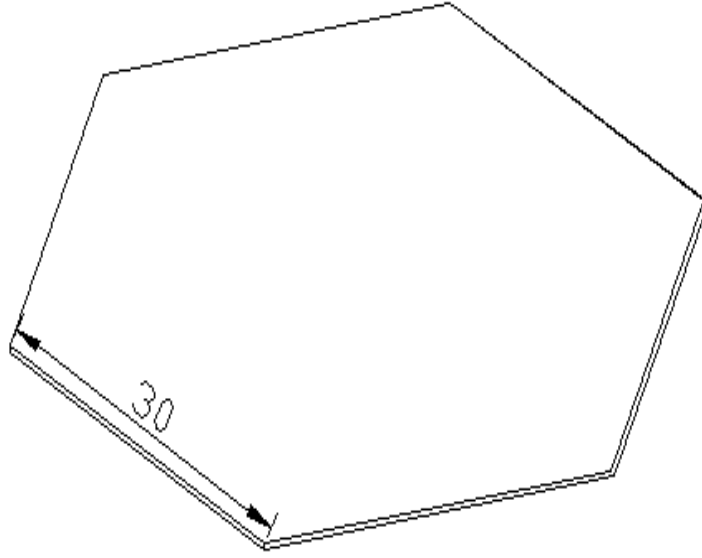
Bu çalışmada yama malzemesi olarak tabakalı kompozit malzeme kullanılmıştır. Kompozit malzeme iki tabakalı olup oryantasyon açıları: $[0^\circ / 45^\circ]$ dir. Her bir tabaka kalınlığı 0.5 mm olan farklı geometrilere sahip yamalar ile yapılan çözümler sonucunda yama geometrisinin darbe dayanımına etkileri araştırılmış ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Mekanik özellikleri Tablo 7.1’de verilmiştir. Ayrıca geometrik özellikleri Şekil 7.12 , 7.13 , 7.14 ’de gösterilmiştir.



Şekil 7.12 Kare yama modeli (kalınlık 1mm).



Şekil 7.13 Dairesel yama modeli (kalınlık 1mm).



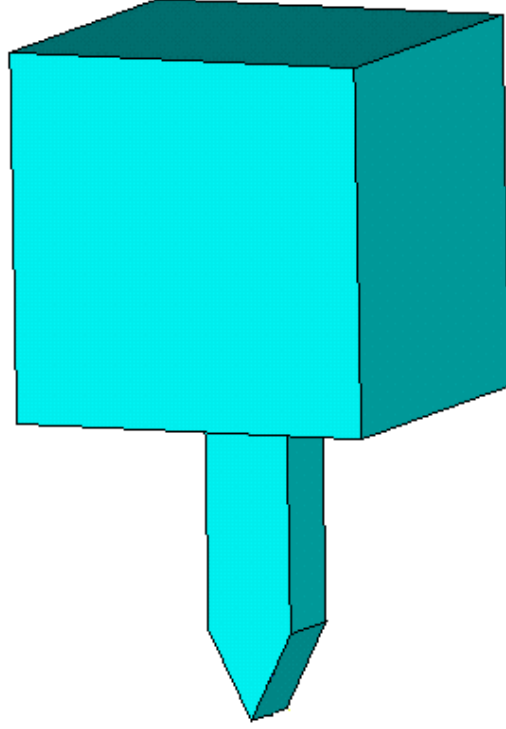
Şekil 7.14 Altıgen tip yama modeli (kalınlık 1mm).

7.3.4 Vurucunun mekanik ve geometrik özellikleri

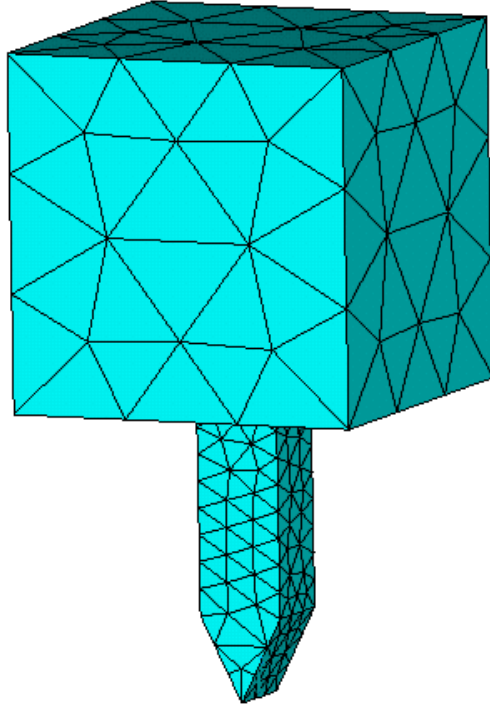
Yapılan çalışmada çeşitli geometrilere sahip vurucular modellenmiş olup vurucu geometrilerinin kompozit levha üzerindeki darbe davranışları incelenmiştir. Ağırlığı 5 kg olan vurucunun geometrik özellikleri Şekil 7.15-26’da verilmiştir. Mekanik özellikleri Tablo 7.5’de sunulmuştur.

Tablo 7.5. Vurucuya ait mekanik özellikler

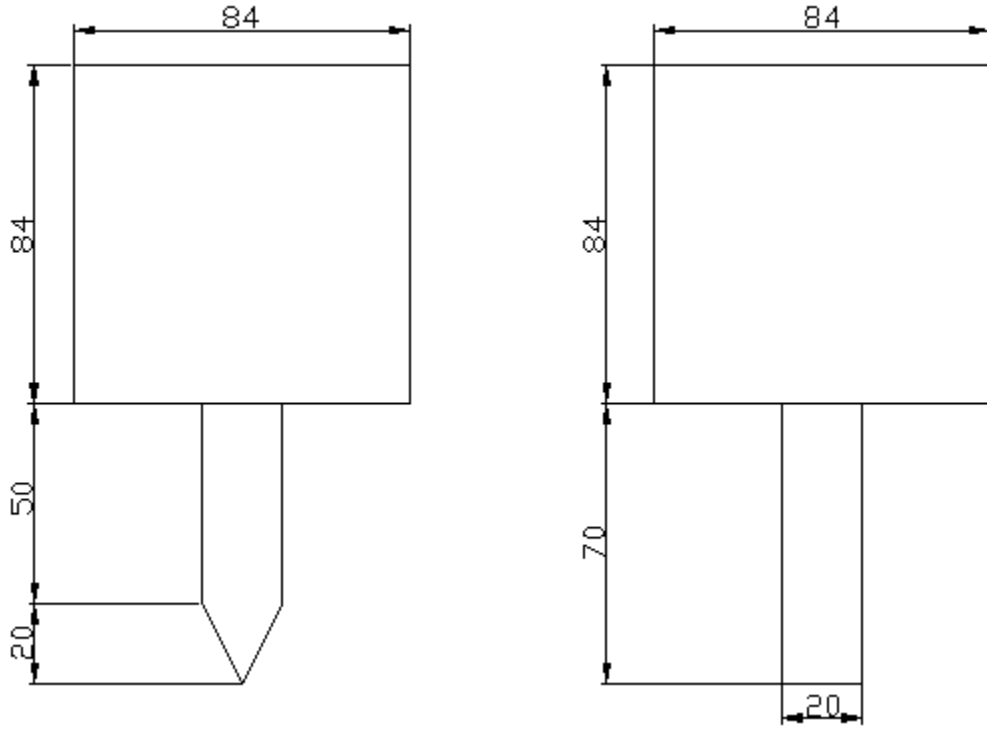
Mekanik Özellikleri	Değerler
Elastisite Modülü (GPa)	200
Poisson oranı (ν)	0.3
Yoğunluk (ρ) (kg/m^3)	8107.62



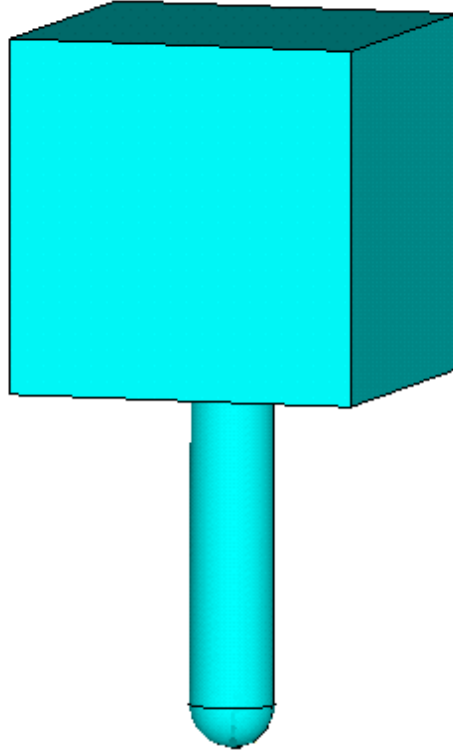
Şekil 7.15 0 mm² kontak alanına sahip vurucu modeline ait katı model.



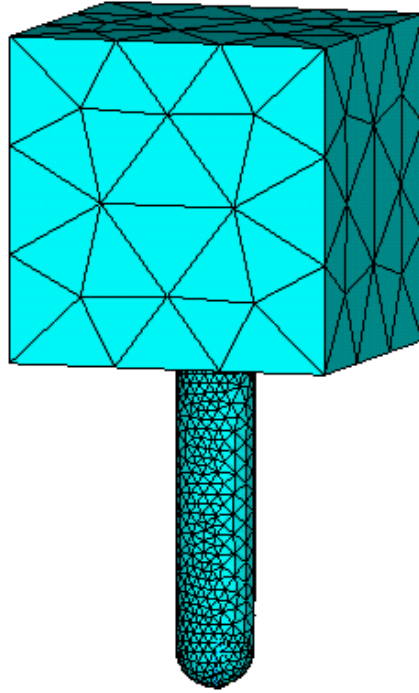
Şekil 7.16 0 mm² kontak alanına sahip vurucu modeline ait sonlu eleman modeli.



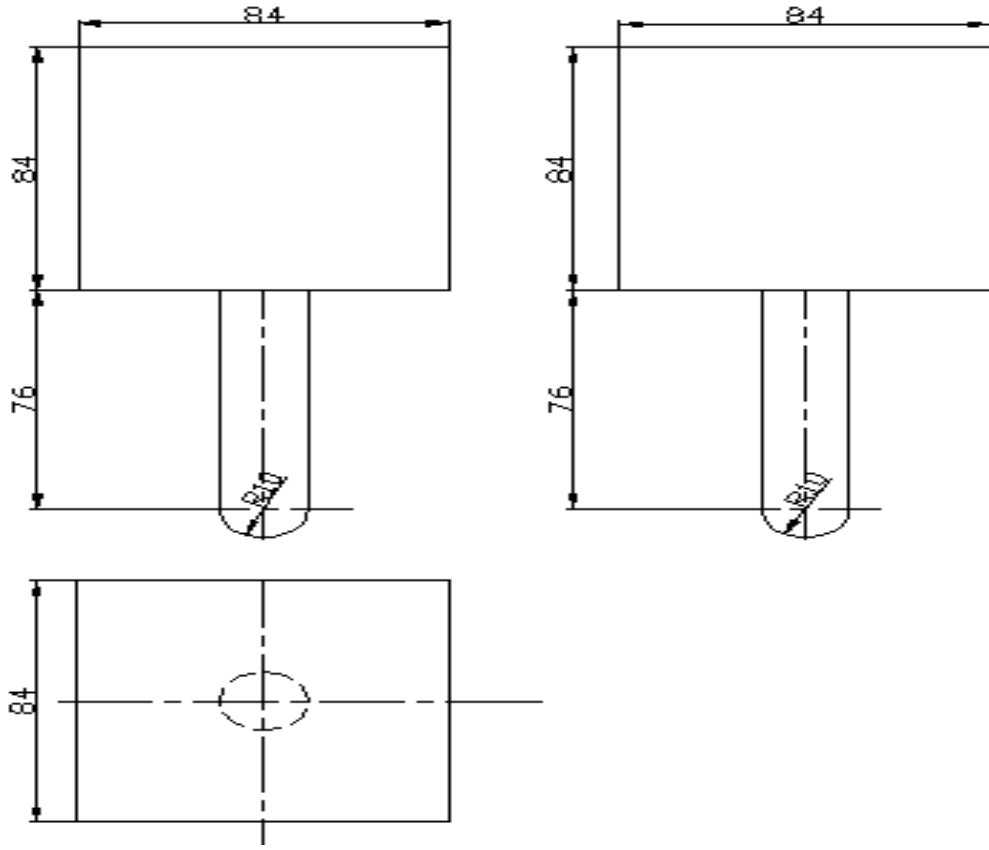
Şekil 7.17 0 mm² kontak alanına sahip vurucu modeli ölçüleri.



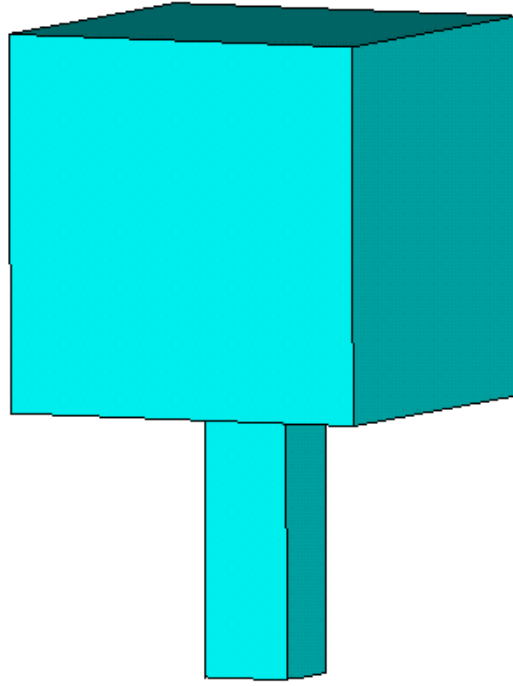
Şekil 7.18 Yarı küresel uçlu vurucu modeline ait katı model.



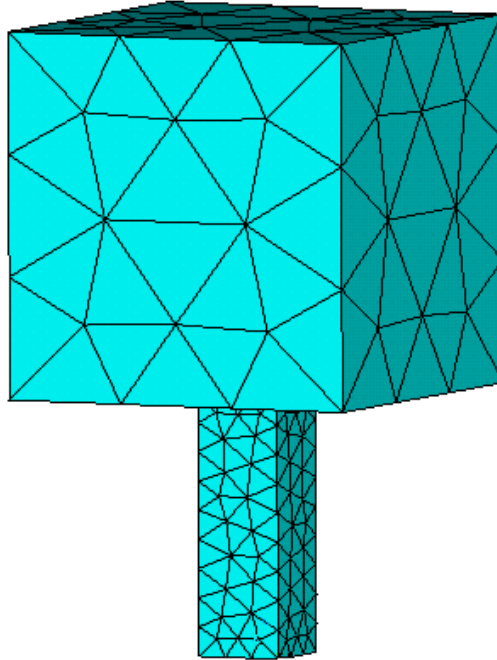
Şekil 7.19 Yarı küresel uçlu vurucu modeline ait mesh yapısı.



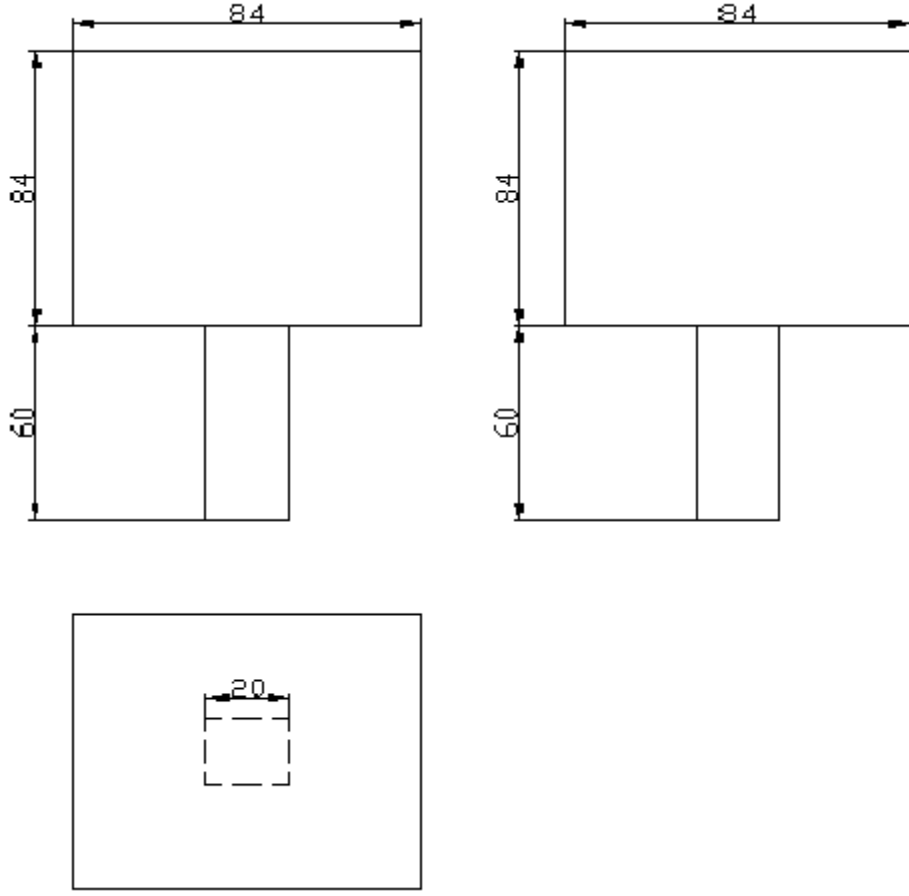
Şekil 7.20 Yarı küresel uca sahip vurucu modeli ölçüleri.



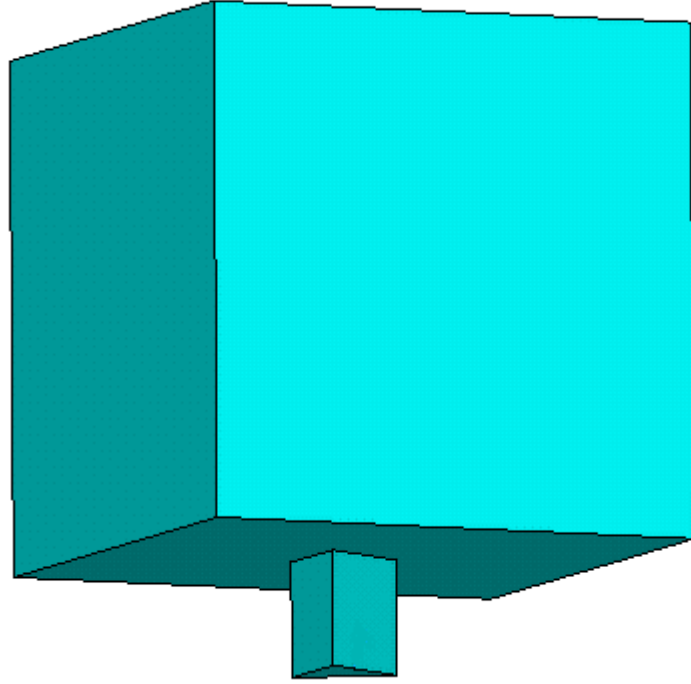
Şekil 7.21 Kare uçlu vurucu modeline ait katı model.



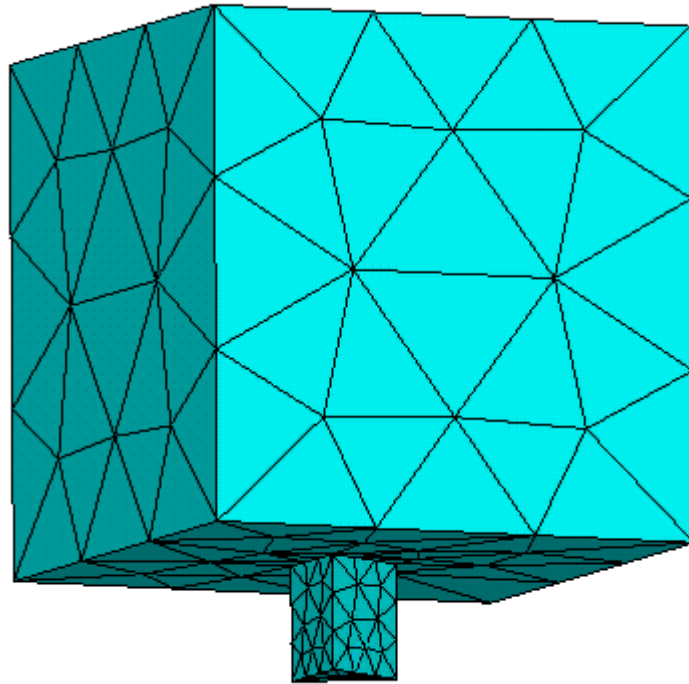
Şekil 7.22 Kare uçlu vurucu modeline ait sonlu eleman modeli.



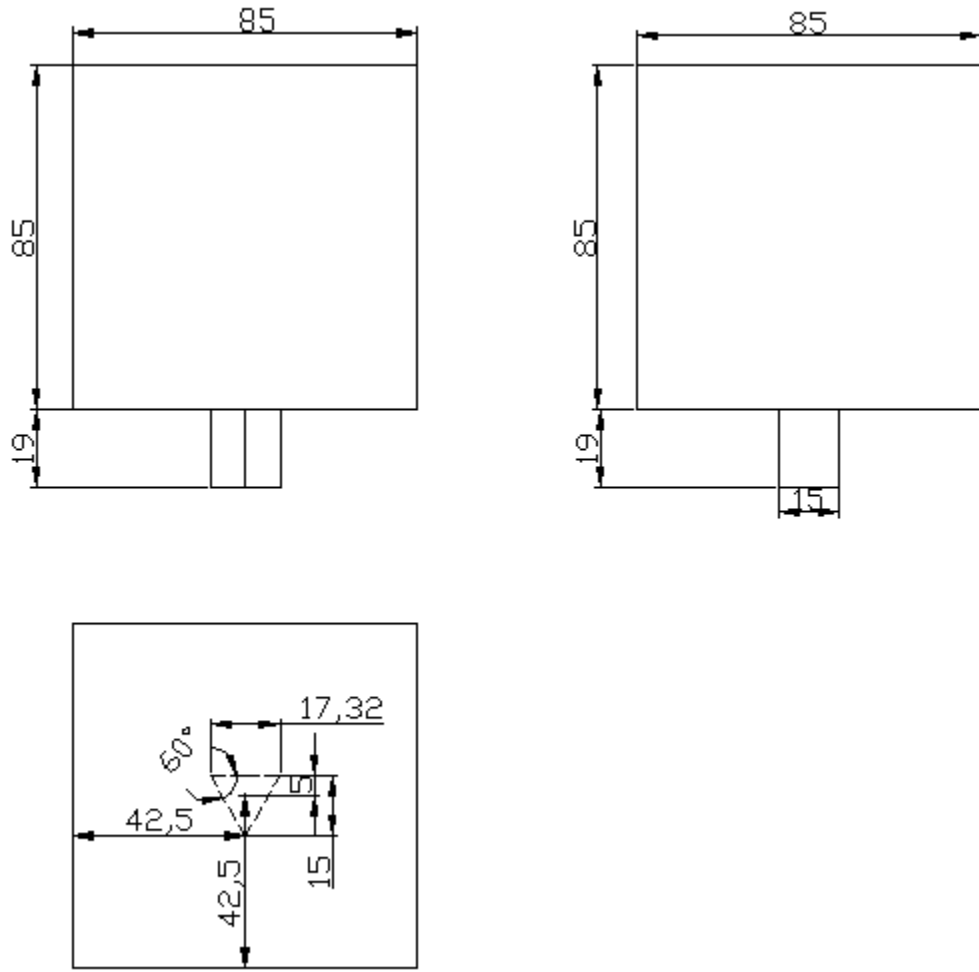
Şekil 7.23 Kare uca sahip vurucu modeli ölçüleri.



Şekil 7.24 Üçgen uçlu vurucu modeline ait katı model.



Şekil 7.25 Üçgen uçlu vurucu modeline ait sonlu eleman modeli.



Şekil 7.26 Üçgen uca sahip vurucu modeli ölçüleri.

7.4 Sayısal Çözüm Tekniğinin Kontrolü

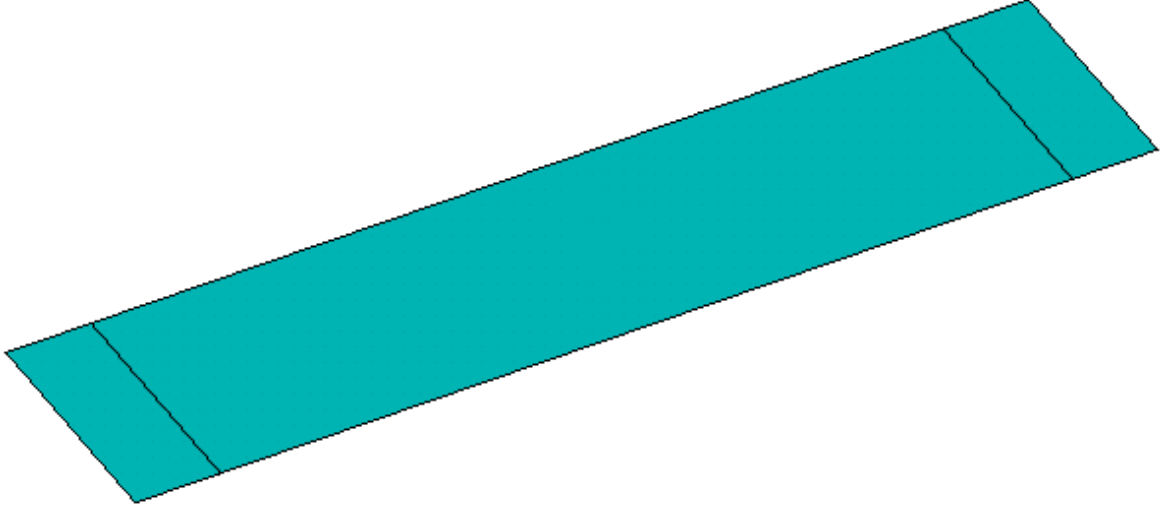
Çalışma sonuçlarını teyit amacıyla, literatürdeki deneysel çalışmanın sonuçları dikkate alınmıştır [55]. Kara [55] yaptığı çalışmada düşük hızlı darbeye maruz E–camı/epoksi tabakalı kompozitlerin dinamik davranışını incelemiştir. Tek yönlü takviyelendirilmiş kompozit tabakalar $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ şeklinde düzenleyerek E–camı/epoksi tabakalı kompozit malzeme üretmiş olup darbe testlerini özel olarak imal edilen düşey ağırlık düşürme test cihazı ile yapmıştır. Darbe testlerinde kullanılan vurucu 24 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Vurucu kütlesi 30 kg’dır. Vurucu hızı 3 m/s ilk hıza sahiptir. $180 \times 50 \text{ mm}^2$ boyutlarında iki tarafı serbest iki tarafı ankastre sınır şartlarına sahip kompozit levhalar kullanmıştır. Numune kalınlığı 7 mm olup darbeleri levha merkezine yapmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ışığında kontak kuvvet zaman diyagramını çizdirmiştir.

7.4.1 Levhanın mekanik özellikleri:

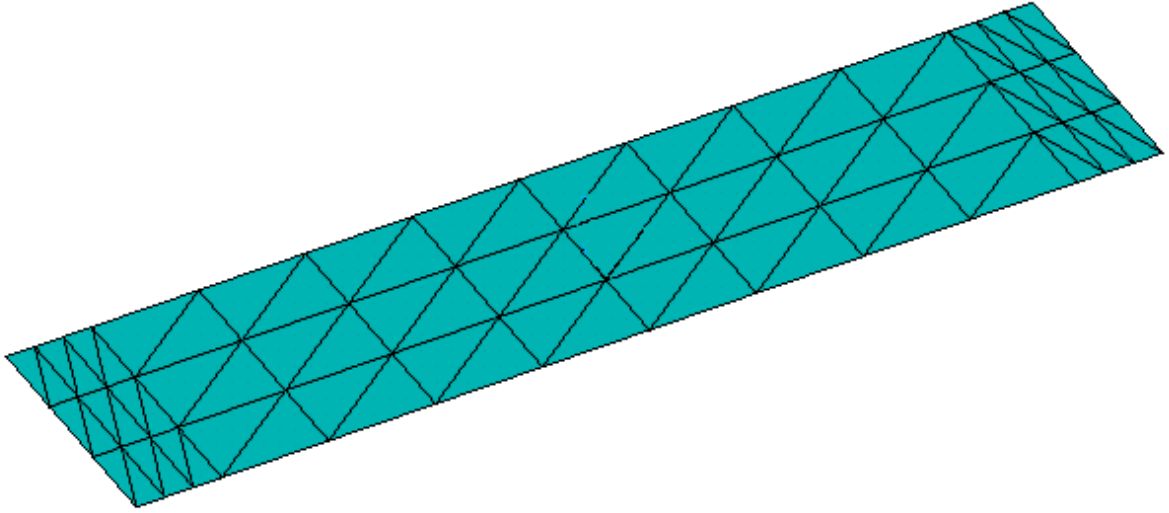
Bu çalışmada literatürdeki deneysel çalışmanın SEM ile modellemesi yapılırken kompozit malzeme için *SHELL 163* vurucu için *SOLID 164* eleman tipi kullanılmıştır. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri Tablo 7.6’da verilmiştir.

Tablo 7.6 Kompozit levhaya ait mekanik özellikler [55]

Mekanik Özellikleri	Sembol (Birim)	Değerler
Yoğunluk	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1840
Boylamasına modül	$E_L \text{ (GPa)}$	42
Enlemesine modül	$E_T \text{ (GPa)}$	9.5
Düzlem-içi kayma modülü	$G_{LT} \text{ (GPa)}$	3.5
En büyük poisson oranı	ν_{LT}	0.34



Şekil 7.27 180x50 mm² boyutlarına sahip levha modeli.



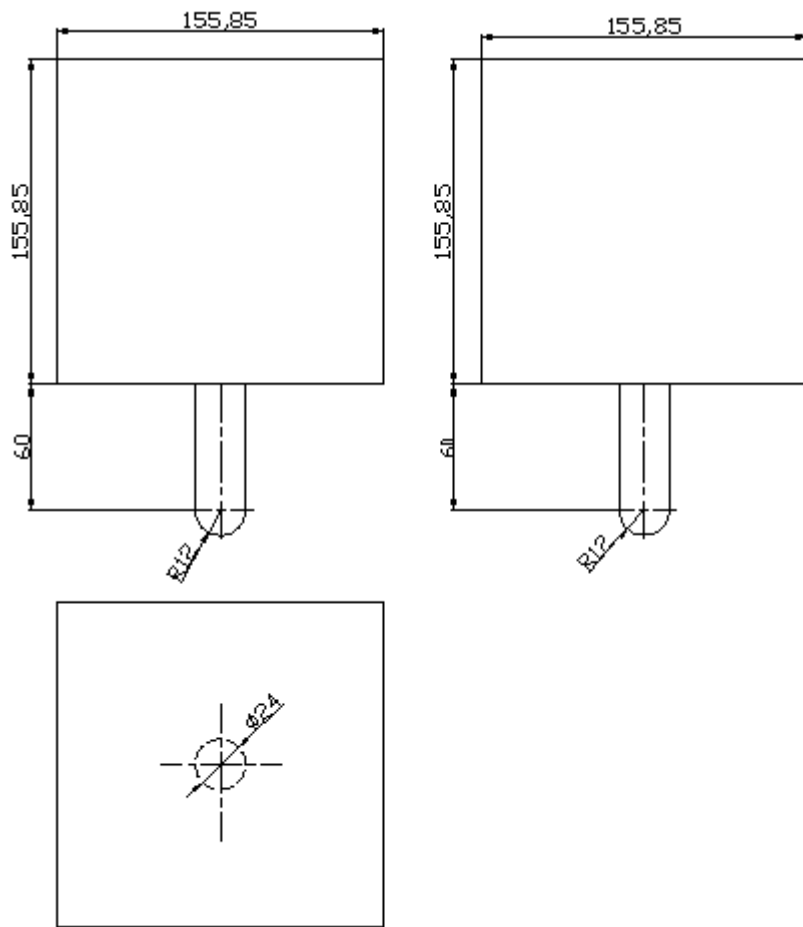
Şekil 7.28 180x50 mm² boyutlarına sahip levha modeline ait sonlu eleman yapısı

7.4.2 Vurucunun mekanik özellikleri

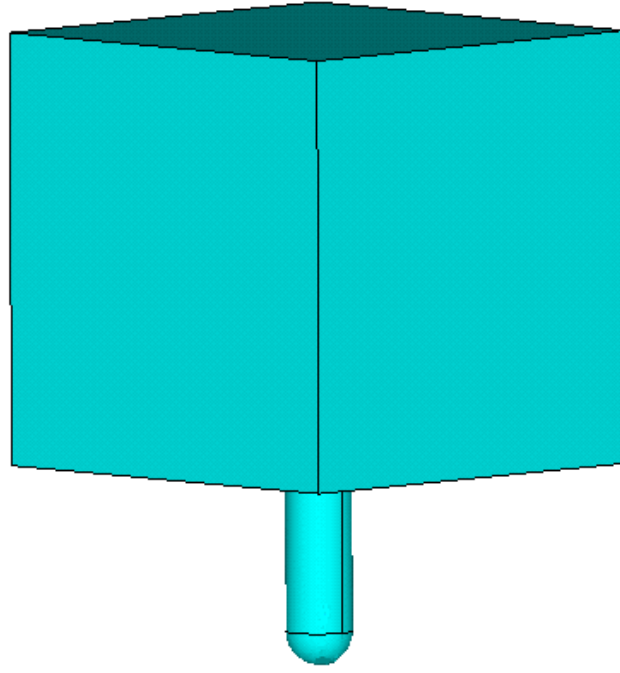
Vurucuya ait mekanik özellikler Tablo 7.7’de verilmiştir.

Tablo 7.7 Vurucuya ait mekanik özellikler [55]

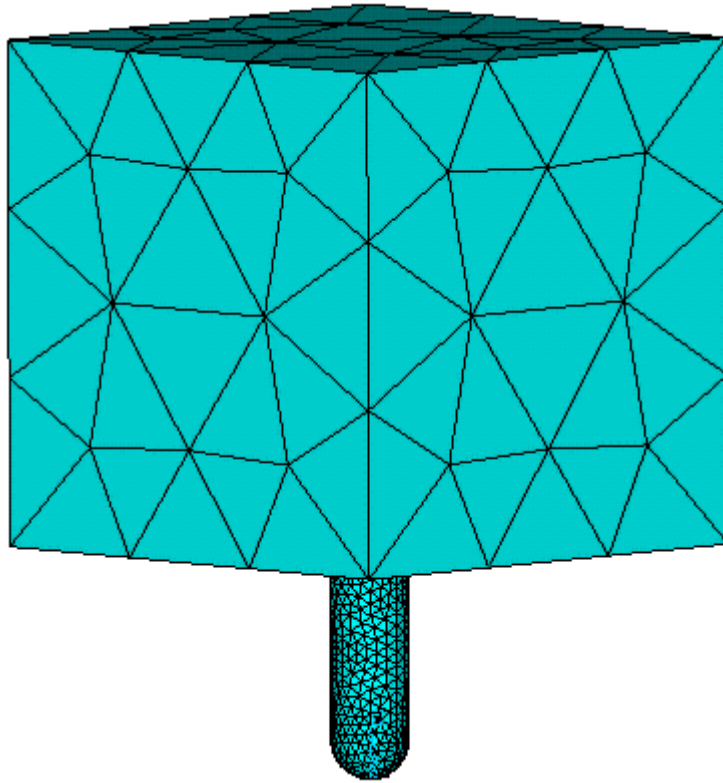
Mekanik Özellikleri	Değerler
Elastisite Modülü (GPa)	200
Poisson oranı (ν)	0.3
Yoğunluk (ρ) (kg/m^3)	7860



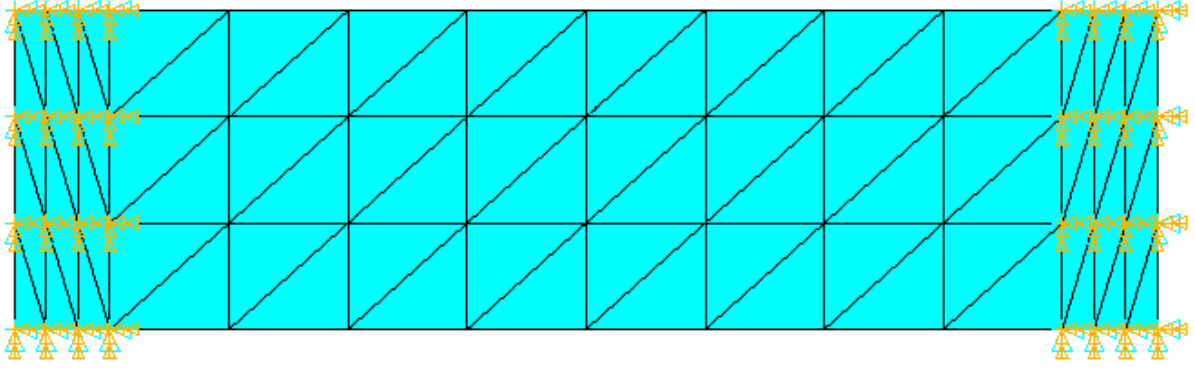
Şekil 7.29 Yarı küresel uca sahip vurucu modeli ölçüleri.



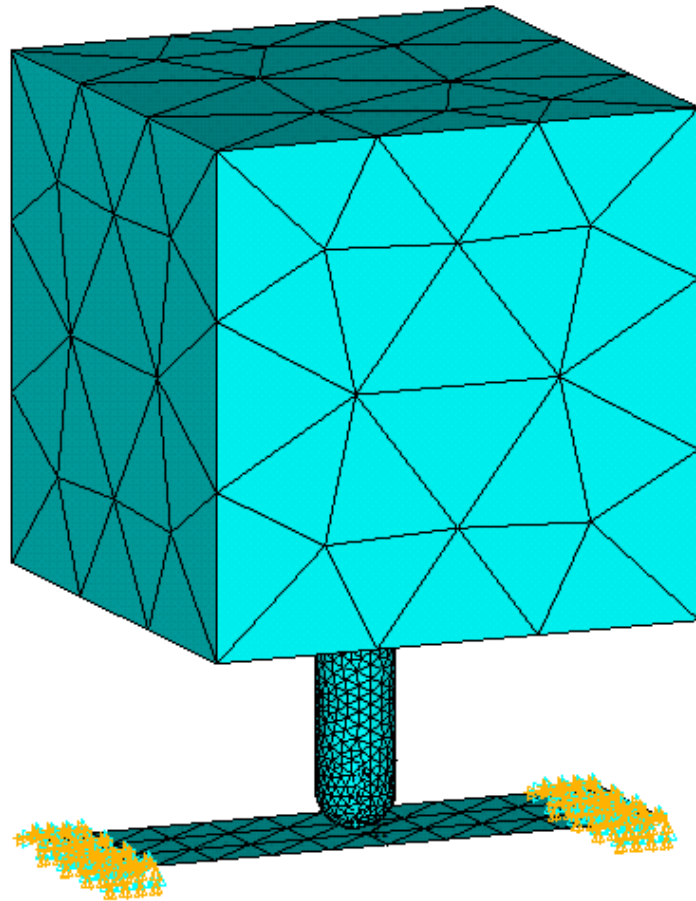
Şekil 7.30 Yarı küresel uca sahip vurucu modeline ait katı model.



Şekil 7.31 Yarı küresel uca sahip vurucu modeline ait sonlu eleman yapısı.

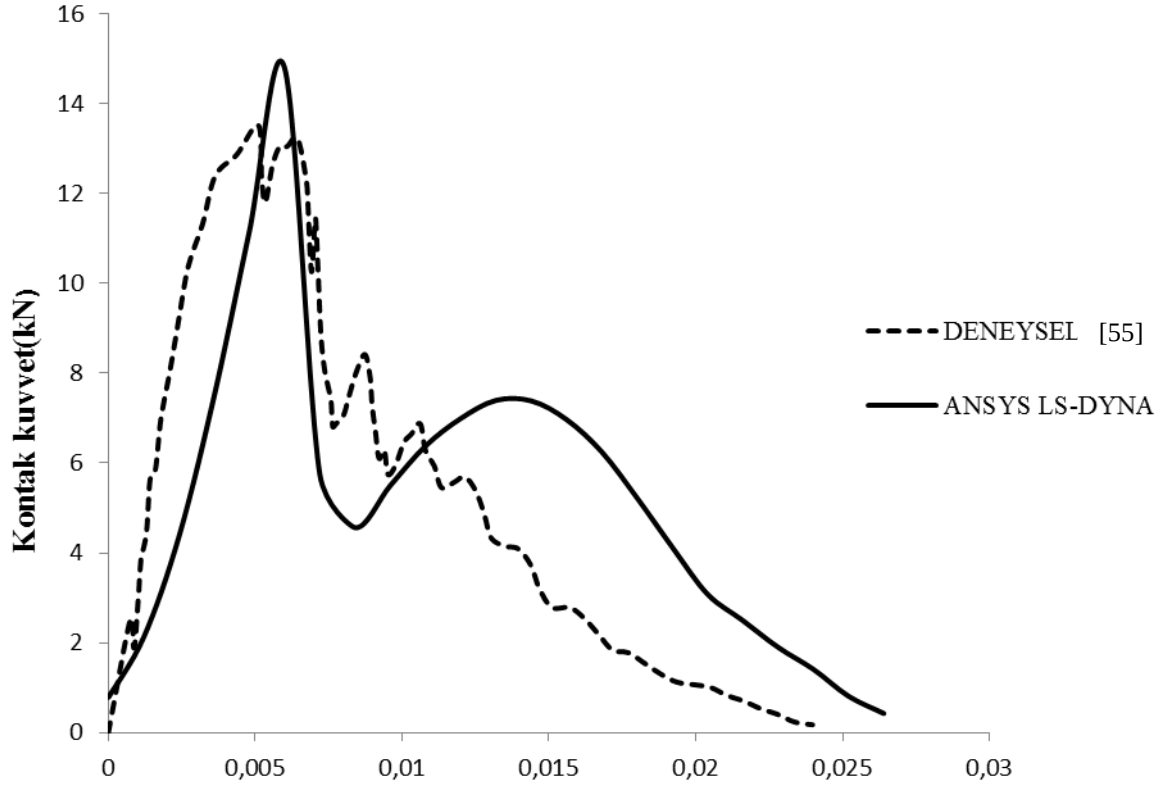


Şekil 7.32 Levha sınır şartları.



Şekil 7.33 Model izometrik görünüm.

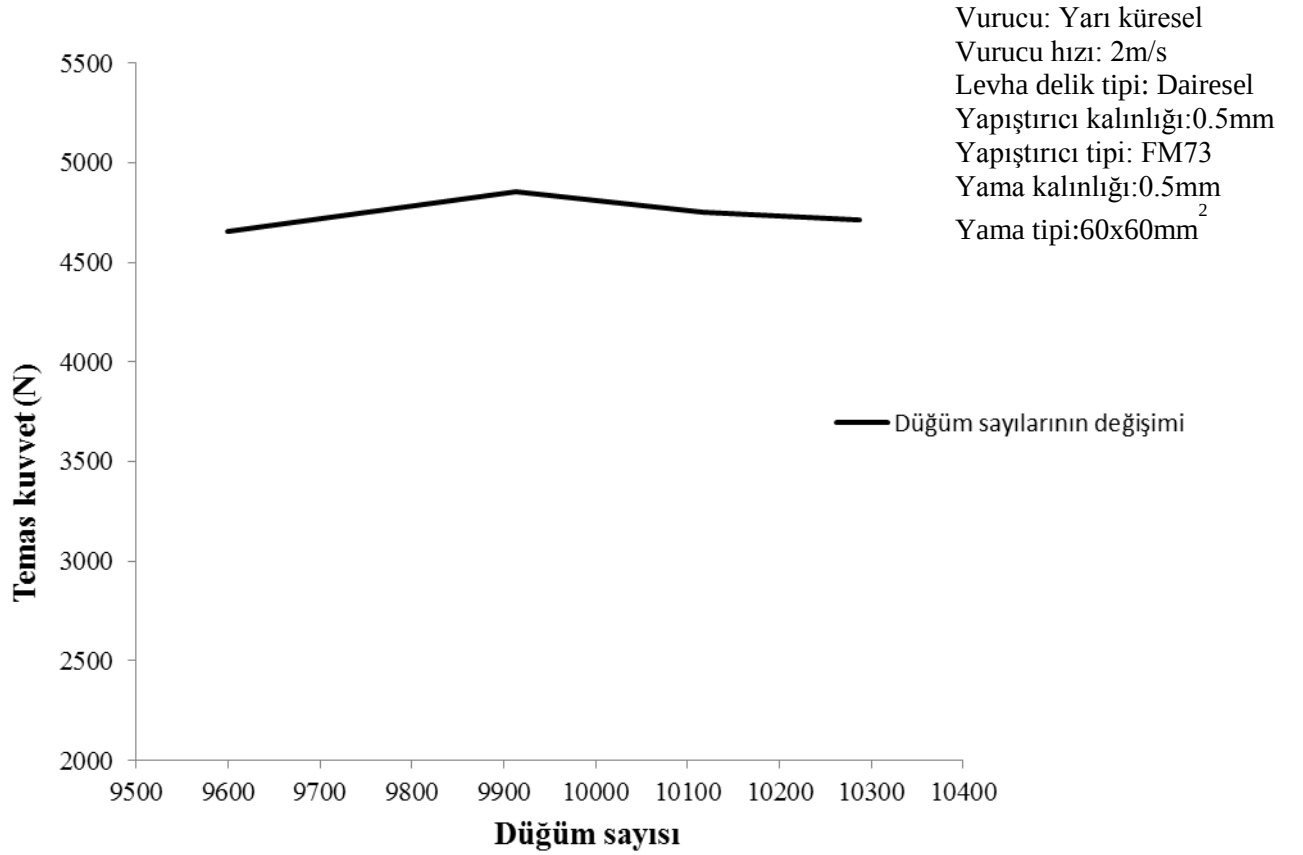
DeneySEL çalışmaya paralel yapılan bu çalışmada, deneySEL ve numerik sonuçların uyumlu olduğu gözlemlenmiştir(şekil 7.34).



şekil 7.34 Sonuçların literatürle karşılaştırılması [55].

8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

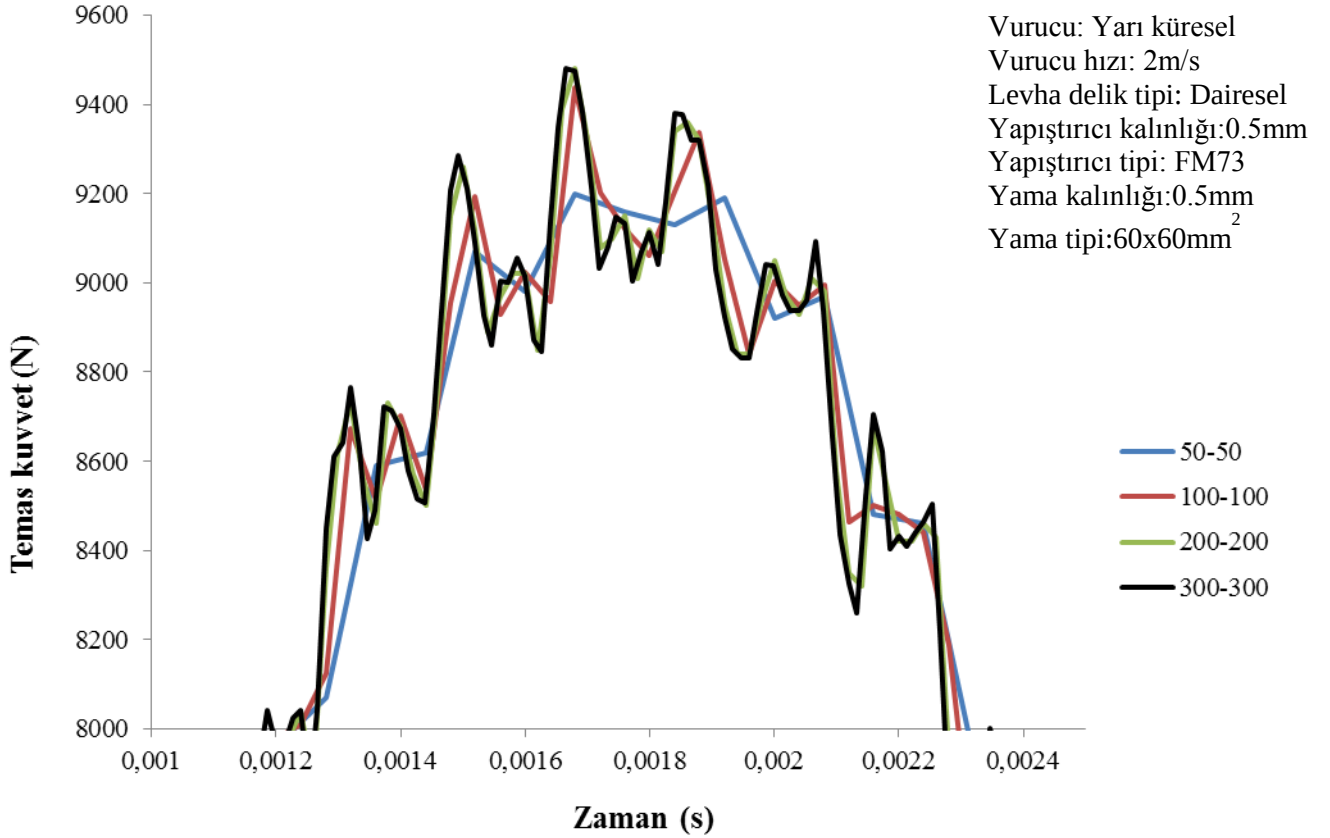
Şekil 8.1’de düğüm sayılarının değişimine bağlı olarak temas kuvveti zaman grafiği verilmiştir. Grafikte 9600 düğüm ile 10400 düğüm arasındaki değerler için problem çözdürülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre 10280 düğüm ve sonrası düğüm sayıları için kuvvet değişiminin stabil olduğu gözlemlenmiştir. Bu bilgiler ışığında çalışmada sonlu eleman modeli çözümleri için düğüm sayısı 10280 olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.1 Düğüm sayılarının değişimine bağlı olarak kuvvet – zaman diyagramı.

ANSYS LS-DYNA yazılımında problem için gerekli datalar girildiğinde çözümün başlatılması için çözüm süresinin girilmesi gerekmektedir. Çözüm süresi belirlenip programa tanıtıldıktan sonra çıktı aralığının belirlenmesi istenmektedir. Çıktı aralığı 50-50, 100-100, 200-200 ve 300-300 olarak değiştirilerek darbe davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil 8.2). Örneğin 50-50 çıktı aralığı seçildiğinde, belirlenen çözüm süresi 50 eşit parçaya bölünerek her parçada bir data alınıp sonuçlara kaydedilmektedir.

Grafik incelendiğinde çözüm zamanı daha sık aralıklara bölündüğünde daha fazla data ile ayrıntılı ve sağlıklı sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir. 50-50'den başlayıp 300-300 çıktı aralığına yaklaşıldığında darbe davranışının değişmediği optimum çıktı aralığı 200-200 olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 8.2 Çıktı aralıkları değişimine bağlı olarak kuvvet – zaman diyagramı.

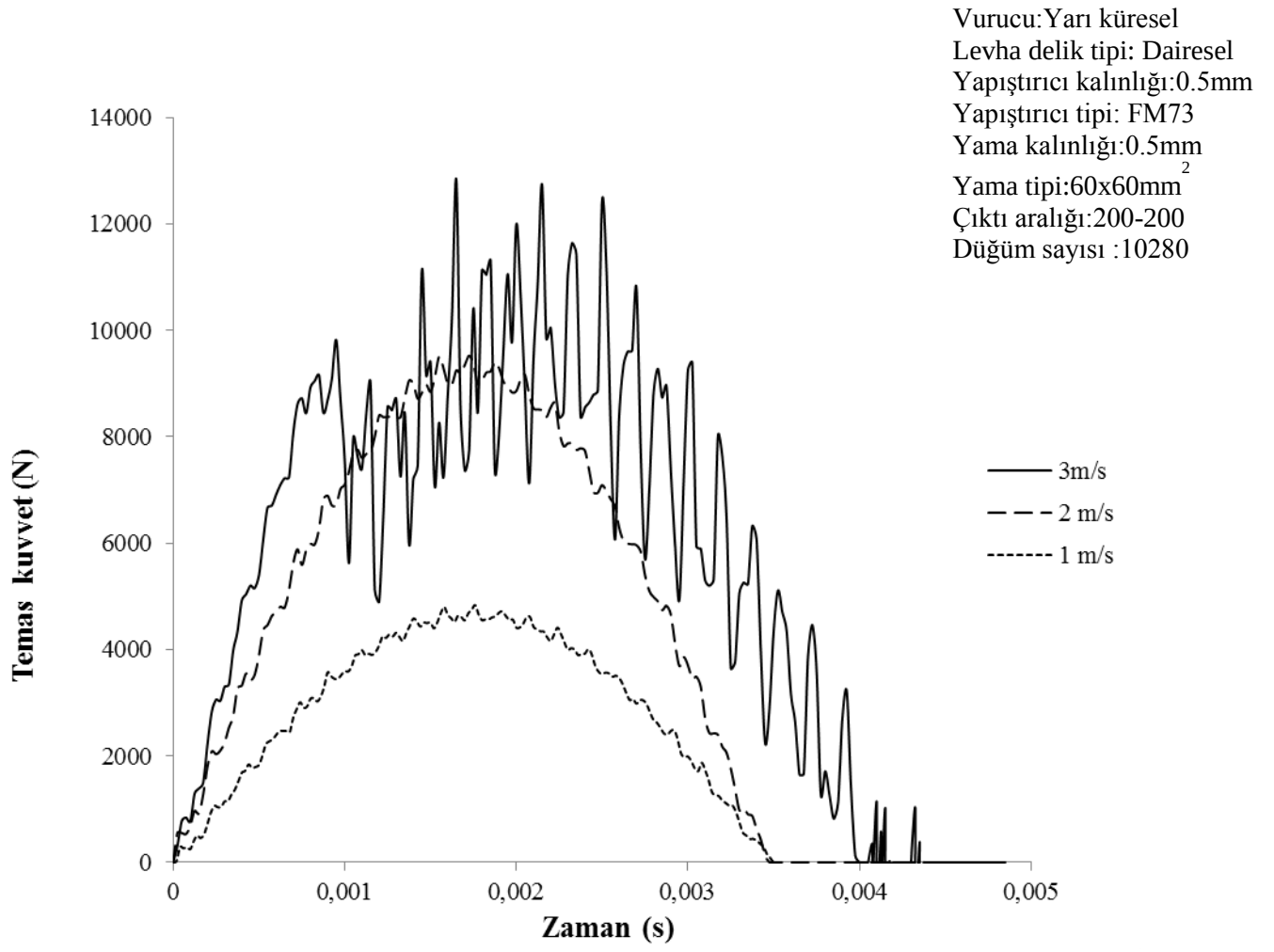
8.1 Vurucu Hızının Darbe Davranışına Etkisi

Vurucu hızının darbe davranışına etkisini incelemek amacıyla Şekil 7.15’de teknik detayları verilen 0 mm^2 kontak alanına sahip vurucu modeli kullanılmıştır. Vurucu hızları sırasıyla: 1m/s , 2 m/s ve 3 m/s dir. Vurucu ağırlığı 5 kg olup levha merkezlerine etki etmektedir. Darbe hızı değişimine bağlı olarak temas kuvveti zaman diyagramı (Şekil 8.3) incelendiğinde darbe hızlarının artışına paralel olarak temas kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

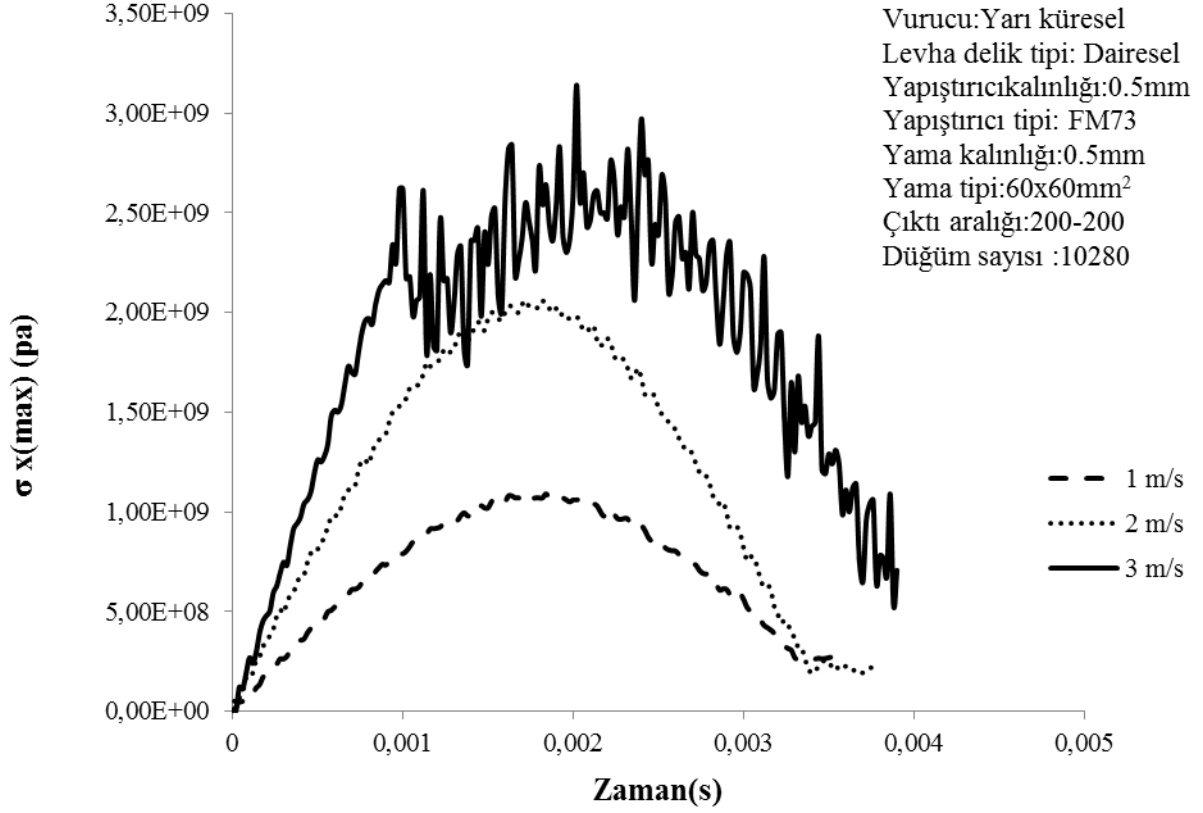
Maksimum çekme ve basma gerilmeleri incelendiğinde (Şekil 8.4, 8.5, 8.6, 8.7, 8.8, 8.9) darbe hızına bağlı olarak maksimum çekme ve basma gerilmesinin “x” yönünde meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca darbe hızına paralel olarak gerilmelerde artış gözlenmiştir.

Toplam enerji (kinetik enerji, iç enerji vs.) zaman değişimi incelendiğinde (Şekil 8.10) darbe hızının artması levhada absorbe edilen enerji miktarını da arttırmaktadır. Darbe hızının artmasıyla birlikte kinetik enerjisinin tabii olarak artması beklenmektedir. Dolayısı ile toplam enerjinin darbe hızına paralel olarak arttığı belirlenmiştir.

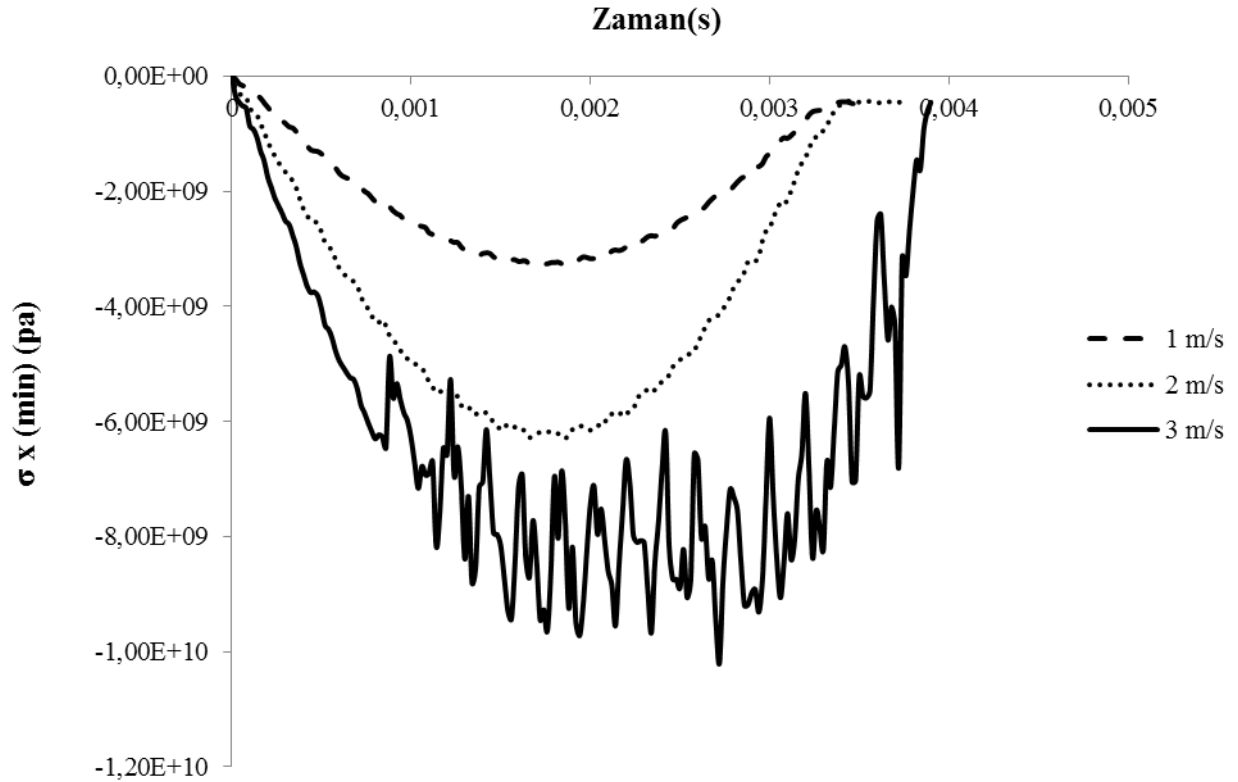
Vurucu hızına bağlı olarak levhanın çarpma yönüne paralel yöndeki (z ekseninde) yer değiştirme-zaman diyagramı incelendiğinde hız artışı ile birlikte levha üzerindeki darbeye bağlı yer değişimi arttığı gözlenmiştir (Şekil 8.12). 1m/s için bu değer yaklaşık olarak 1.1 mm, 2 m/s için 2.2 mm, 3 m/s için ise 2.9 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 8.3 Darbe hızı değişimine bağlı olarak kuvvet – zaman diyagramı.

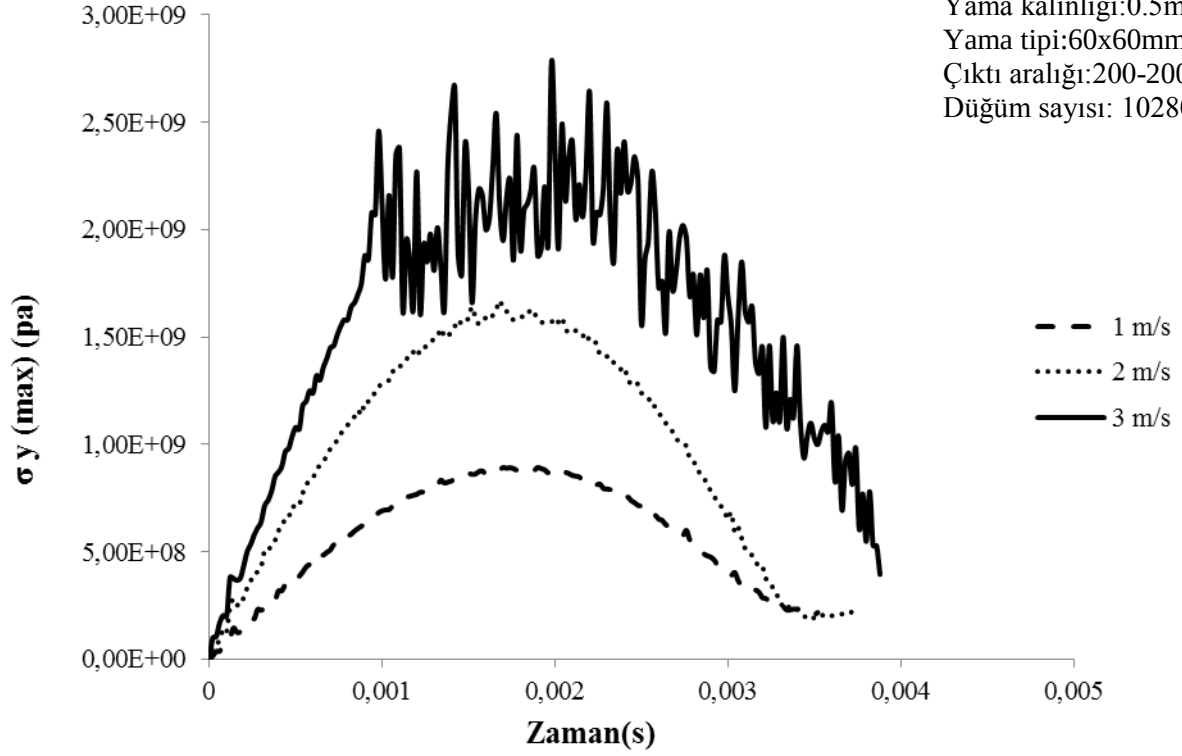


Şekil 8.4 Darbe hızı değişimine bağlı olarak x yönünde maksimum çekme gerilmesi - zaman diyagramı

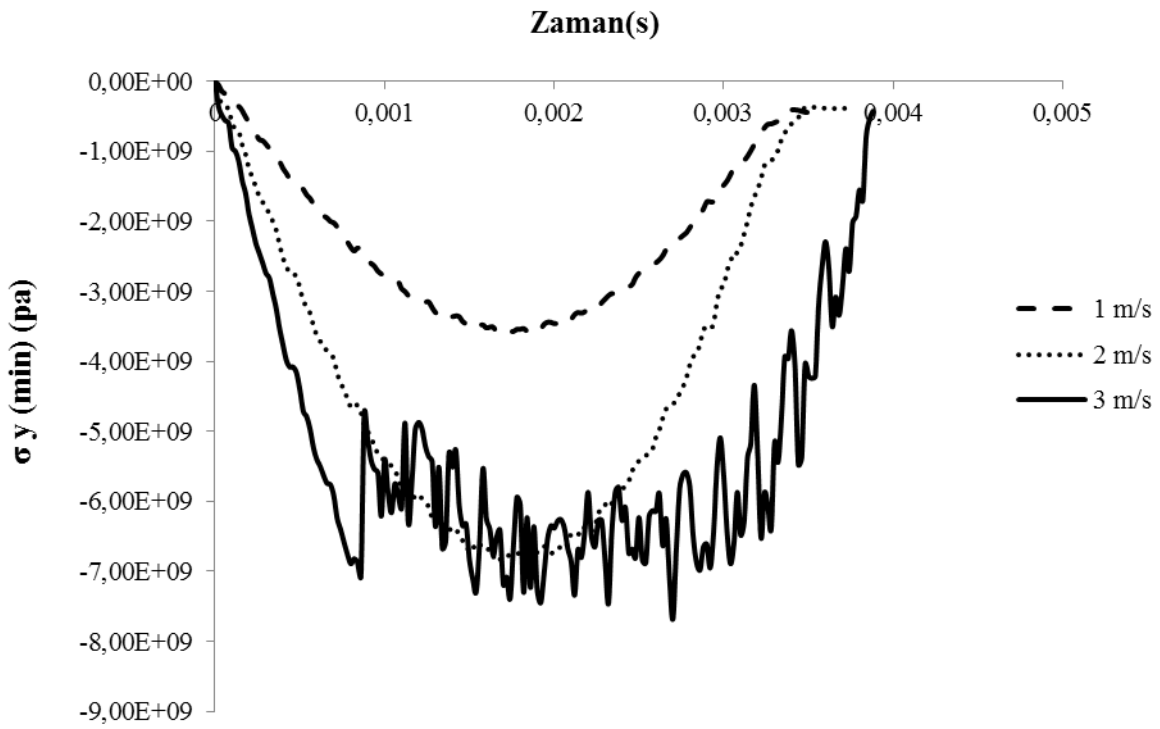


Şekil 8.5 Darbe hızı değişimine bağlı olarak x yönünde maksimum basma gerilmesi - zaman diyagramı

Vurucu: Yarı küresel
 Levha delik tipi: Dairesel
 Yapıştırıcı kalınlığı: 0.5mm
 Yapıştırıcı tipi: FM73
 Yama kalınlığı: 0.5mm
 Yama tipi: 60x60mm²
 Çıktı aralığı: 200-200
 Düğüm sayısı: 10280

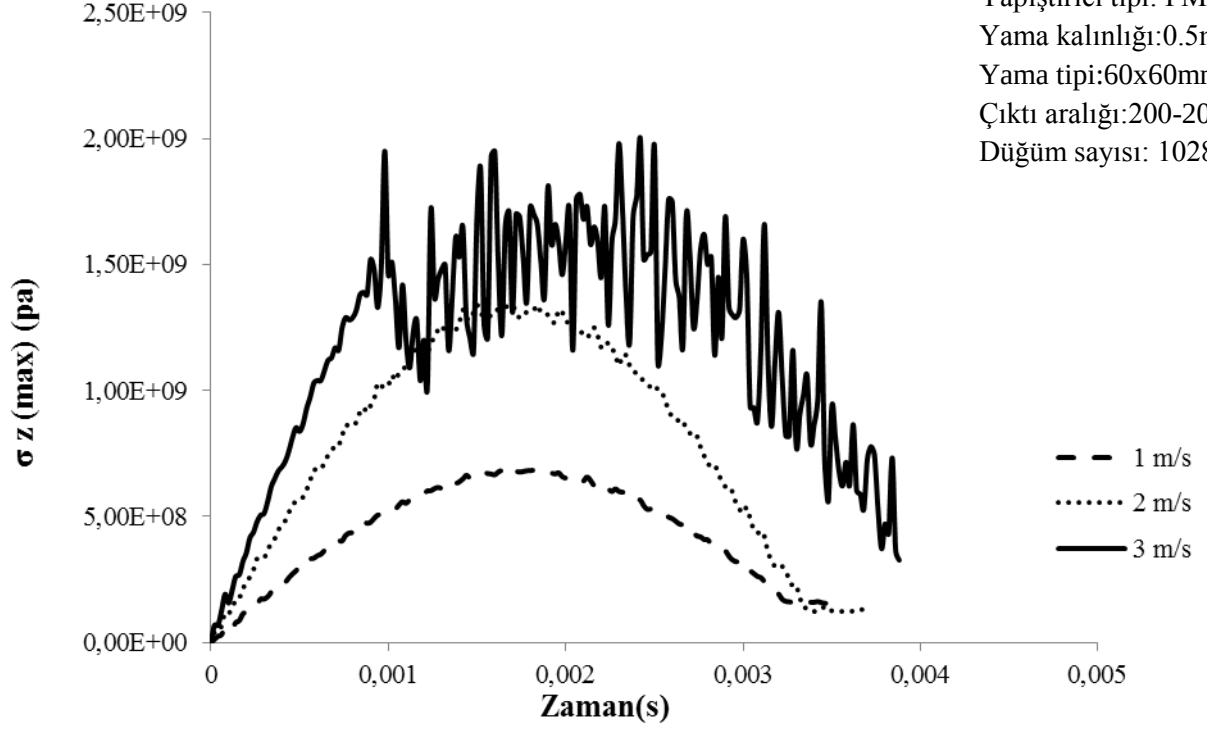


Şekil 8.6 Darbe hızı değişimine bağlı olarak y yönünde maksimum çekme gerilmesi - zaman diyagramı

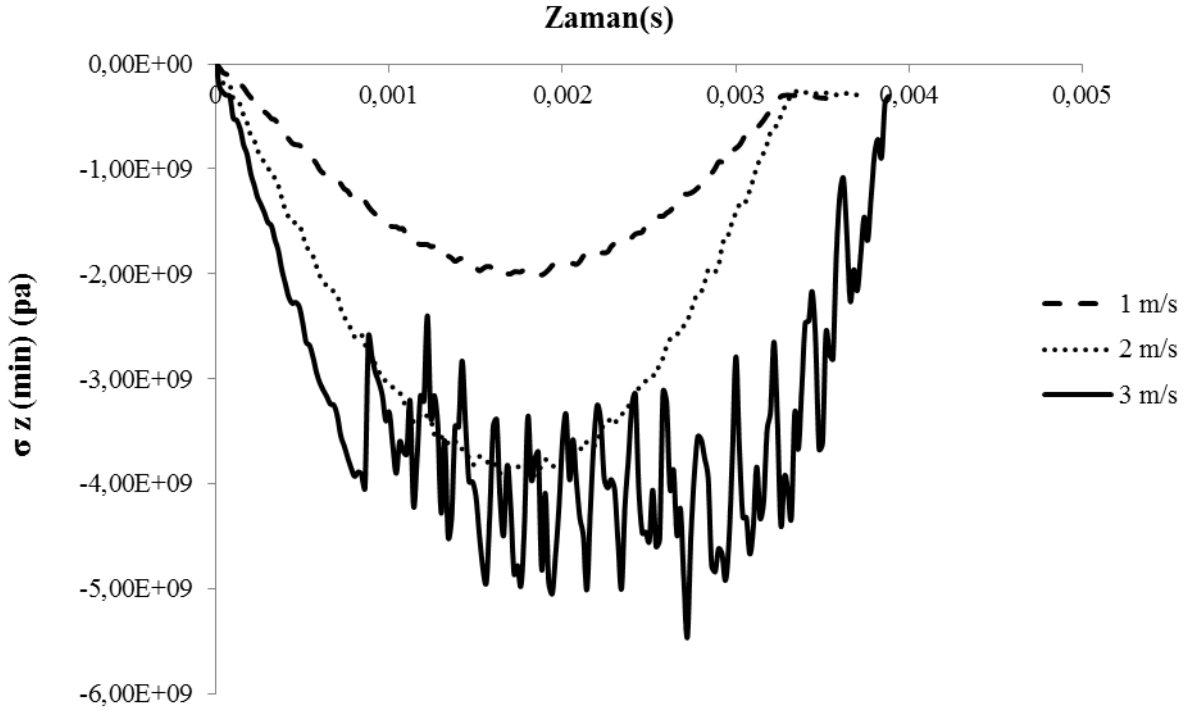


Şekil 8.7 Darbe hızı değişimine bağlı olarak y yönünde maksimum basma gerilmesi - zaman diyagramı

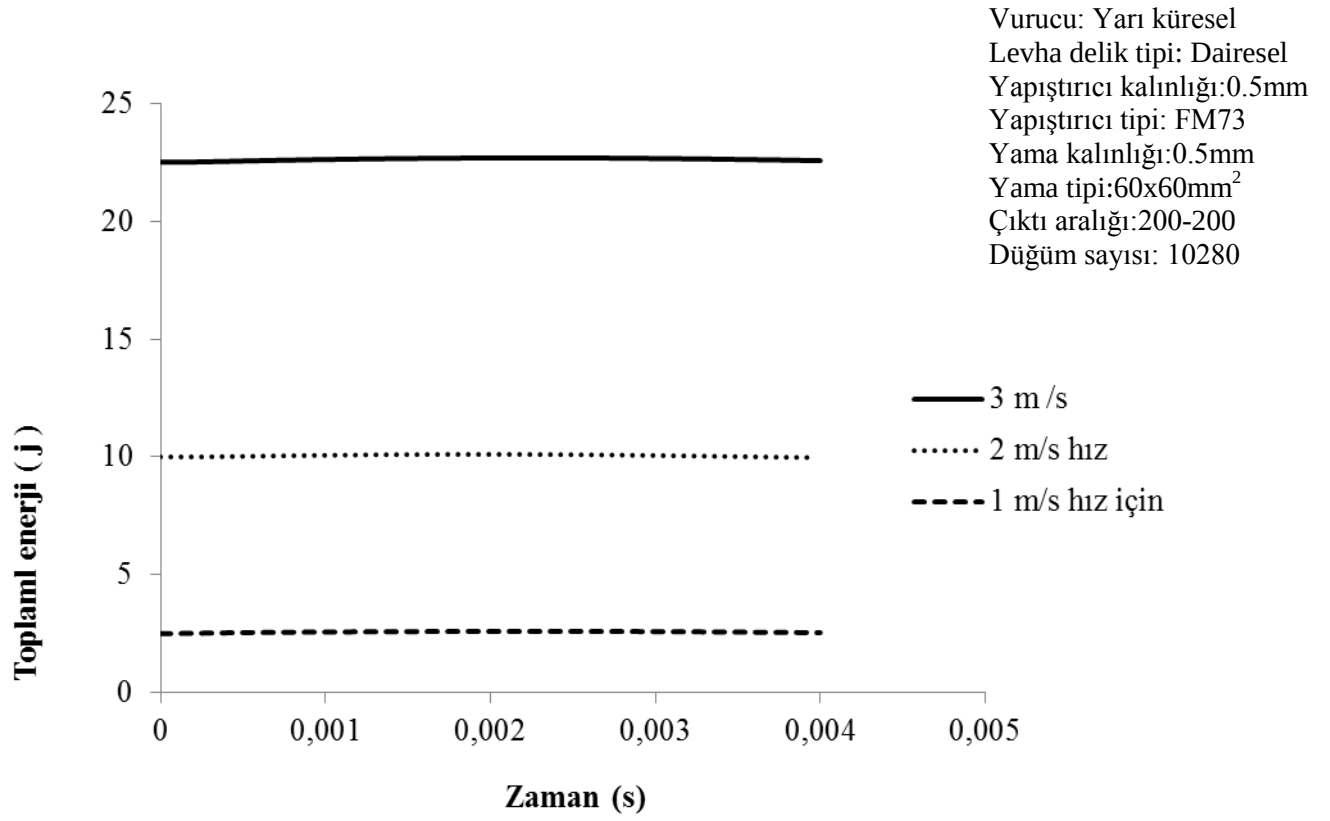
Vurucu: Yarı küresel
 Levha delik tipi: Dairesel
 Yapıştırıcı kalınlığı:0.5mm
 Yapıştırıcı tipi: FM73
 Yama kalınlığı:0.5mm
 Yama tipi:60x60mm2
 Çıktı aralığı:200-200
 Düğüm sayısı: 10280



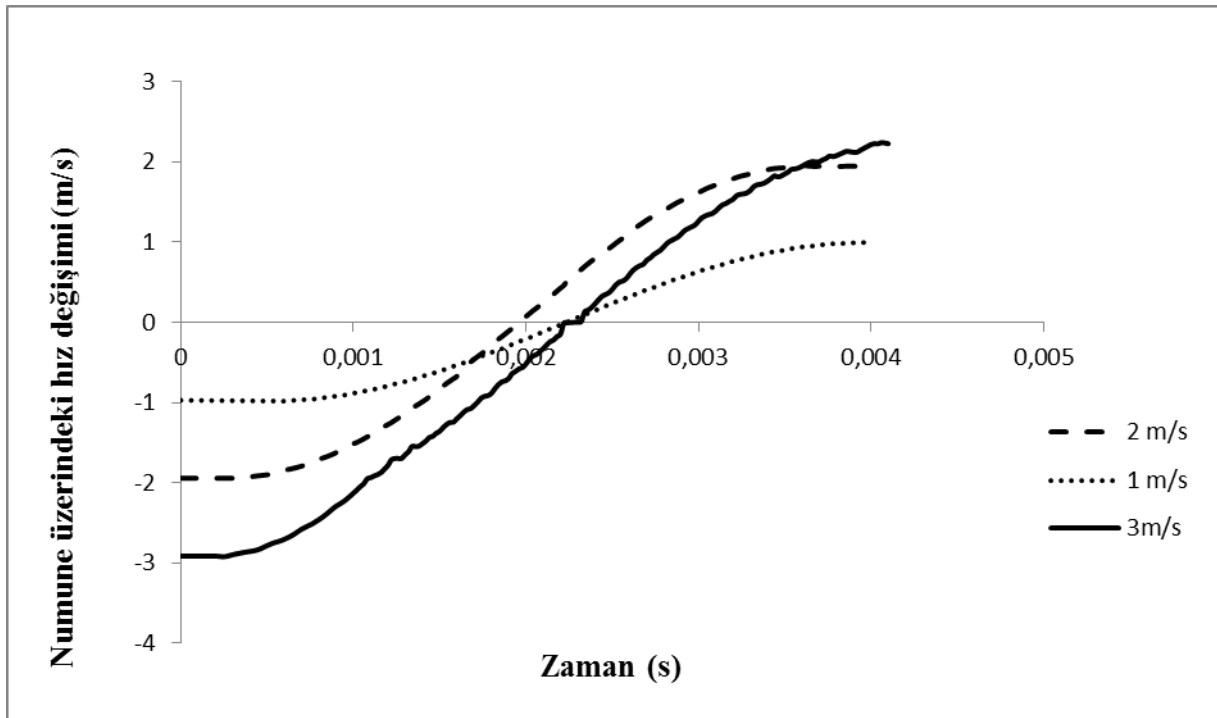
Şekil 8.8 Darbe hızı değişimine bağlı olarak z yönünde maksimum çekme gerilmesi - zaman diyagramı



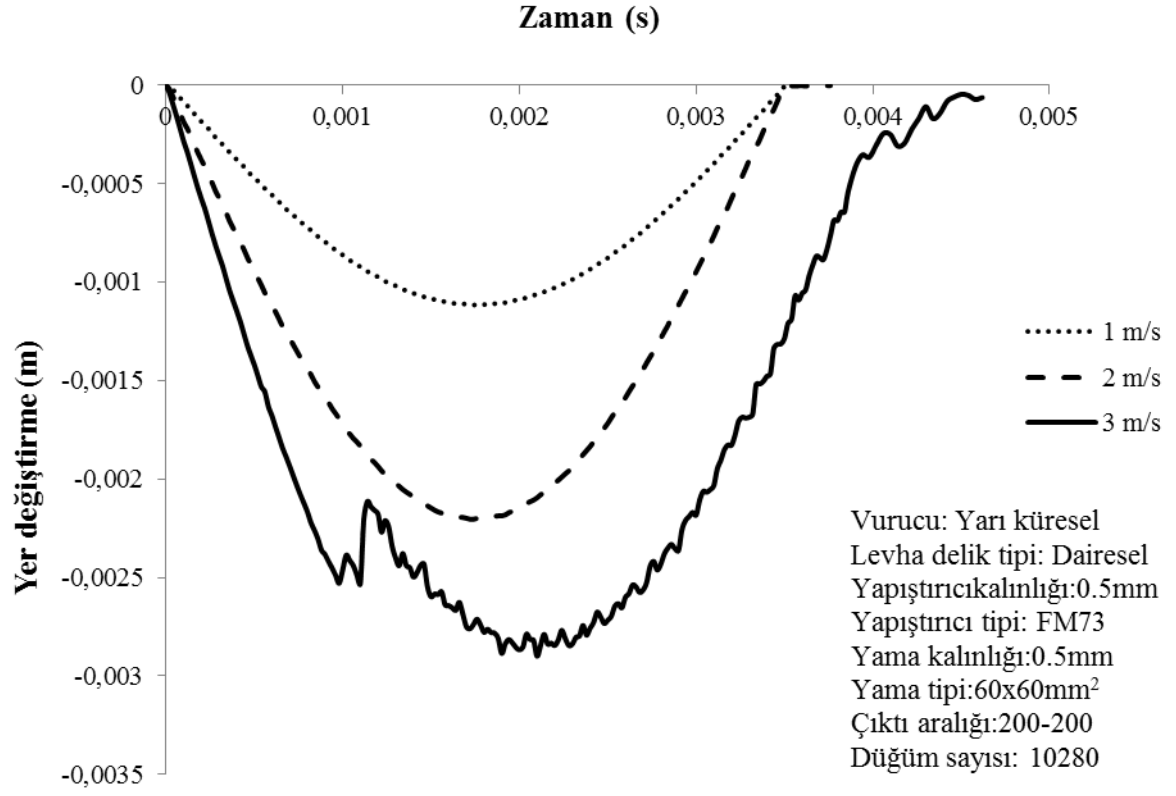
Şekil 8.9 Darbe hızı değişimine bağlı olarak z yönünde maksimum basma gerilmesi - zaman diyagramı



Şekil 8.10 Darbe hızı değişimine bağlı olarak toplam enerji - zaman diyagramı



Şekil 8.11 Darbe hızı değişimine bağlı olarak numunedeki hız - zaman diyagramı

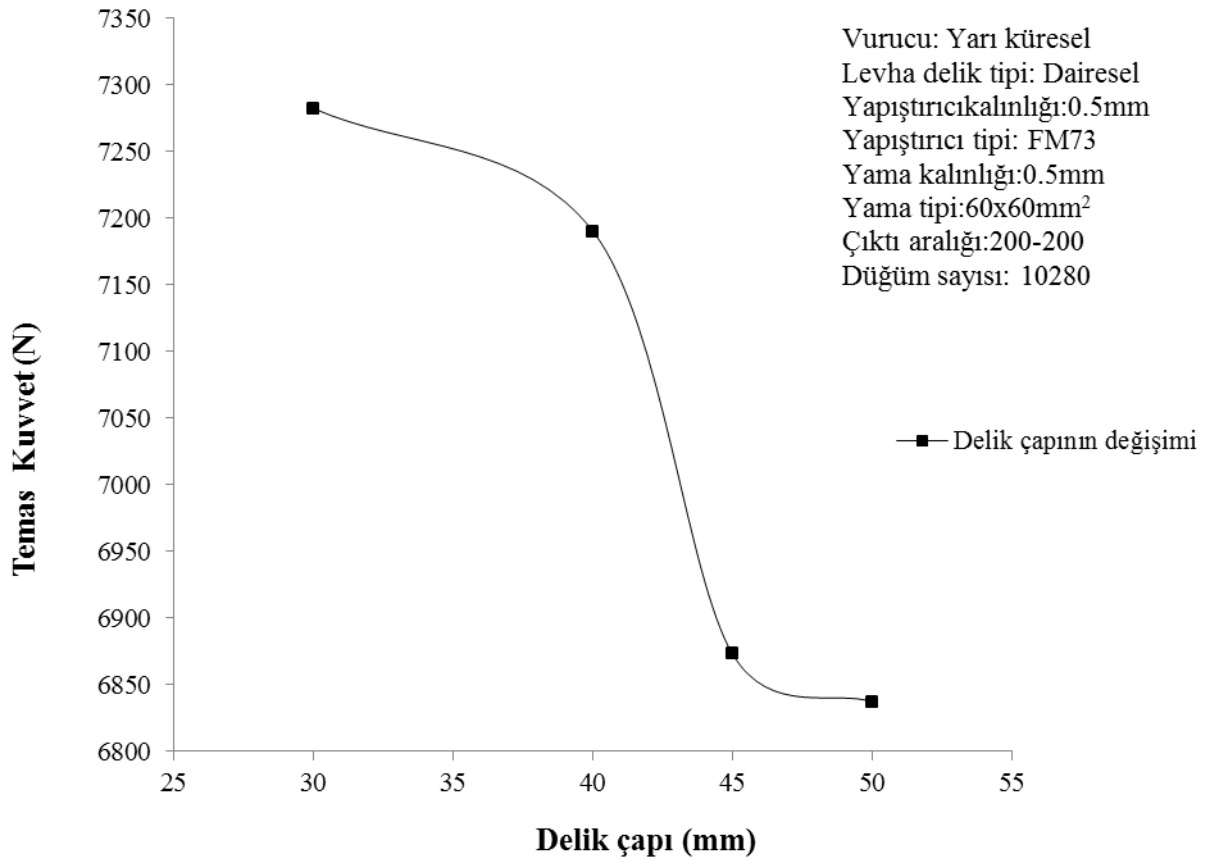


Şekil 8.12 Darbe hızı değişimine bağlı olarak z yönündeki maksimum yer değişimi - zaman diyagramı

8.2 Levha Delik apının Darbe Davranışına Etkisi

Çalışmada ortasında dairesel delik bulunan tabakalı kompozit malzemenin darbe davranışını incelenirken ortasındaki dairesel deliğın çapının arttırılıp azaltılmasına bağlı olarak temas kuvveti zaman diyagramını çizilmiştir (şekil 8.13).

Grafik incelendiğinde delik çapının arttırılmasına bağlı olarak reaksiyon kuvvetinin azaldığı gözlemlenmiştir. 30 mm delik çapı için reaksiyon kuvveti 7300 N civarında iken bu değer 50 mm delik çapı için 6800 N kadar düştüğü belirlenmiştir.

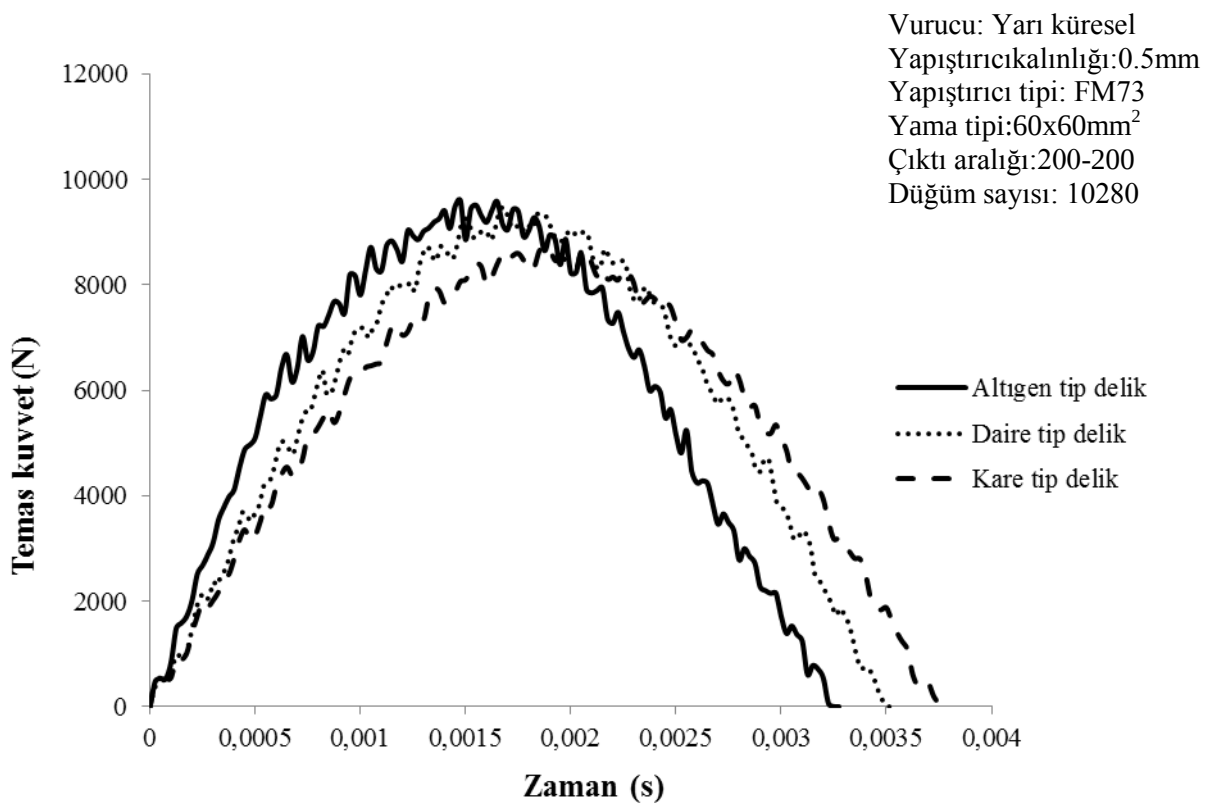


şekil 8.13 Levha delik çapı değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramını

8.3 Levha Delik Tipinin Darbe Davranışına Etkisi

Çalışmada ortasında dairesel delik bulunan tabakalı kompozit malzemenin darbe davranışı incelenirken ortasındaki dairesel deliğin tipinin (daire, kare, altıgen) değişimine bağlı olarak temas kuvveti zaman diyagramı çizilmiştir (Şekil 8.14).

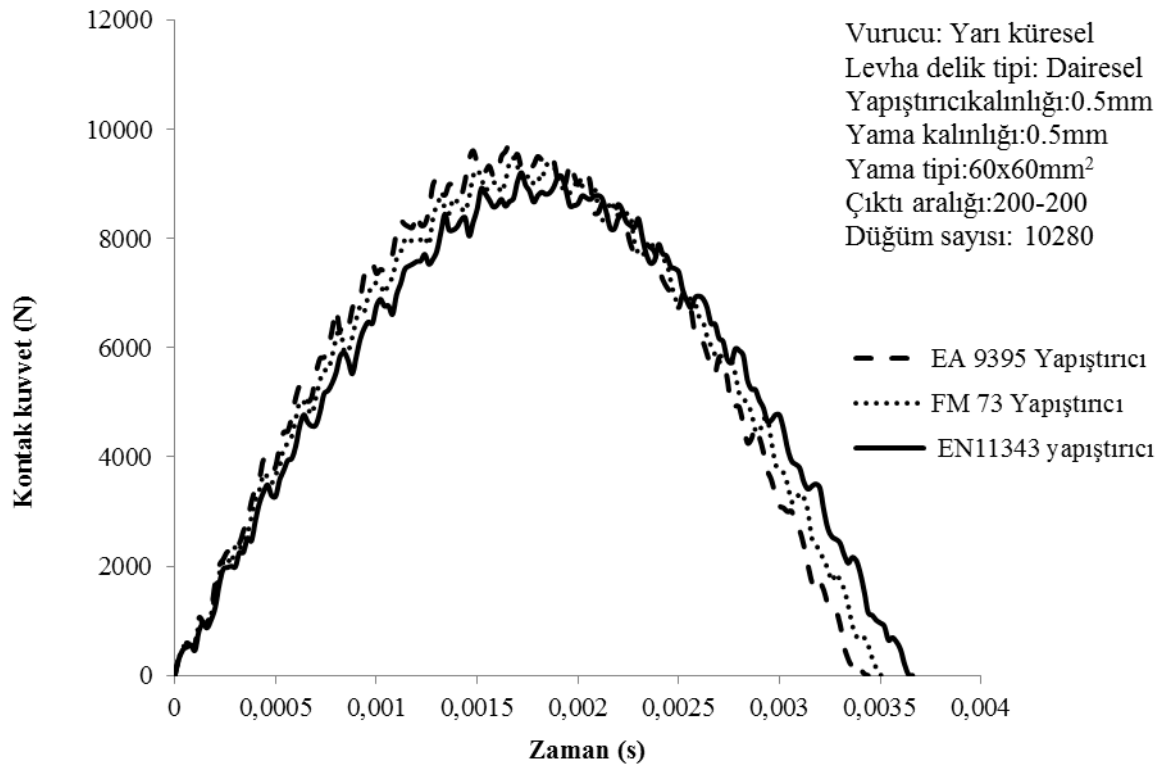
Grafik incelendiğinde en fazla temas kuvveti altıgen tip delikte en az temas kuvvetinin kare tip delikte meydana geldiği gözlenmiştir.



Şekil 8.14 Levha delik tipi değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı

8.4 Yapıştırıcı Malzemesinin Darbe Davranışına Etkisi

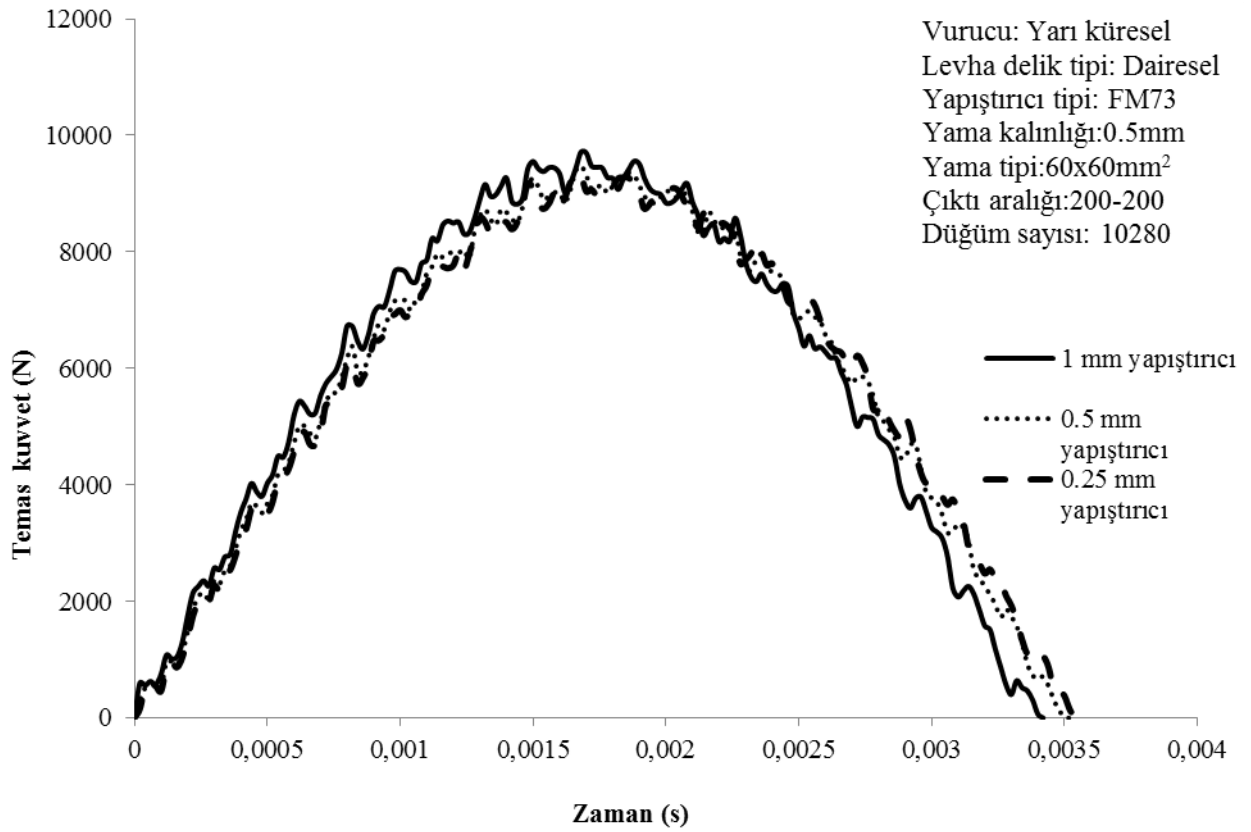
Yapılan çalışmada ortasında dairesel delik bulunan levhaya yama takviye edilmesi yapıştırıcı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.15’da farklı yapıştırıcı malzemelerine ait kuvvet-zaman diyagramı görülmektedir. Kullanılan yapıştırıcıların elastisite modülleri büyükten küçüğe doğru sırasıyla; EA9395, FM73, EN11343’dür. Elde edilen sonuçlara göre elastisite modülünün artışına paralel olarak temas kuvveti de artmaktadır.



Şekil 8.15 Yapıştırıcı malzemesi değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı

8.5 Yapıştırıcı Kalınlığının Darbe Davranışına Etkisi

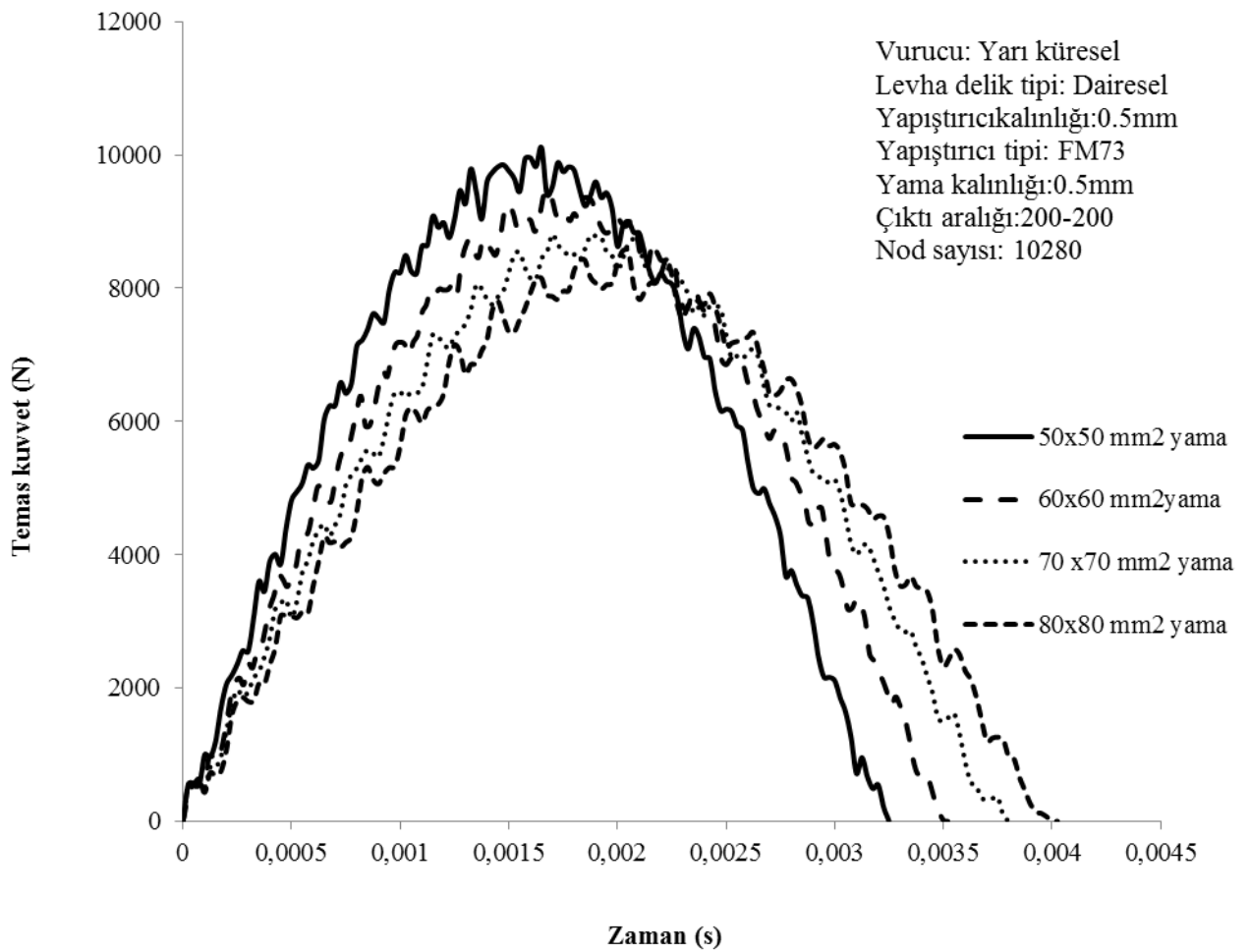
Yapılan çalışmada yama takviyesi için kullanılan yapıştırıcı malzemesi FM 73 olup bu yapıştırıcının farklı kalınlıklarının darbe davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yapıştırıcı kalınlığı arttıkça reaksiyon kuvveti de artmaktadır (Şekil 8.16). Yapıştırıcı kalınlıklarının 0.25 mm den başlanarak sırası ile 0.5 mm, 1 mm için çözüm yapılmıştır. 0.5 mm yapıştırıcı kalınlığının ortalama kalınlık olduğu söylenebilir.



Şekil 8.16 Yapıştırıcı kalınlığı değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı

8.6 Yama Boyutunun Darbe Davranışına Etkisi

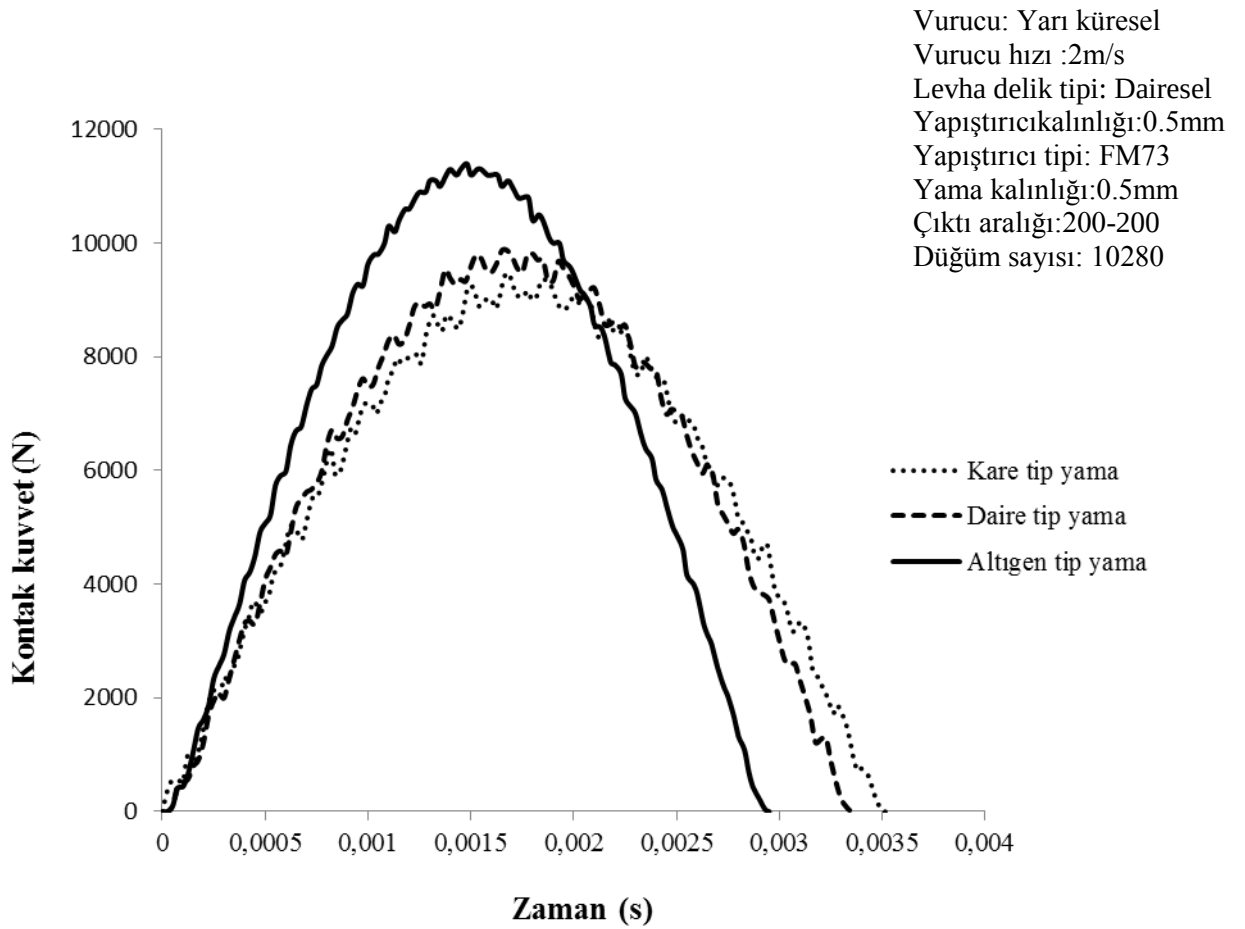
Ortasında dairesel delik bulunan levha için farklı yama boyutları uygulanmış ve bu yama boyutlarının darbe davranışına etkisi araştırılmıştır. Elde edilen bilgilere göre yama yüzey alanı arttıkça reaksiyon kuvvetinde azalma gözlenmiştir (Şekil 8.17).



Şekil 8.17 Yama boyutunun değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı

8.7 Yama Tipinin Darbe Davranışına Etkisi

Yama tipinin darbe davranışına etkisini incelemek amacıyla çeşitli geometrik şekillere sahip yamalar kullanılarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre temas kuvvetinin en büyük altıgen tip yamada en küçük ise kare tip yamada çıktığı gözlenmiştir. (Şekil 8.18).

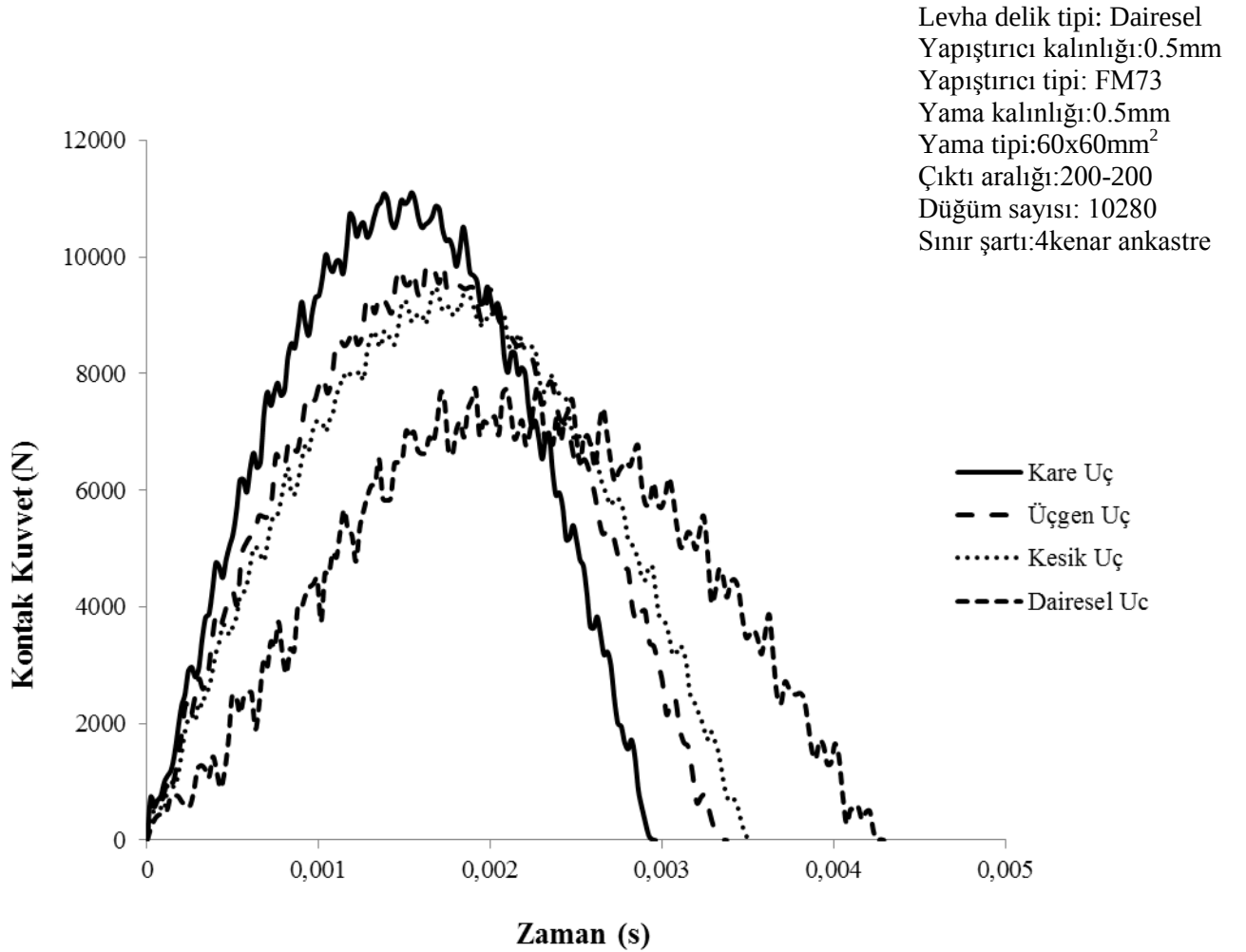


Şekil 8.18 Yama tipinin değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı

8.8 Vurucu Tipinin Darbe Davranışına Etkisi

Vurucu ağırlıkları, hızları ve bırakıldıkları yükseklikler sabit tutularak vurucu ucu farklı geometrik şekillerde modellenip çözülmüştür. Vurucu ucu 0 mm^2 kontak alanına sahip (kesik uç) ,kare, üçgen ve dairesel(yarı küresel) geometrilere sahiptir.

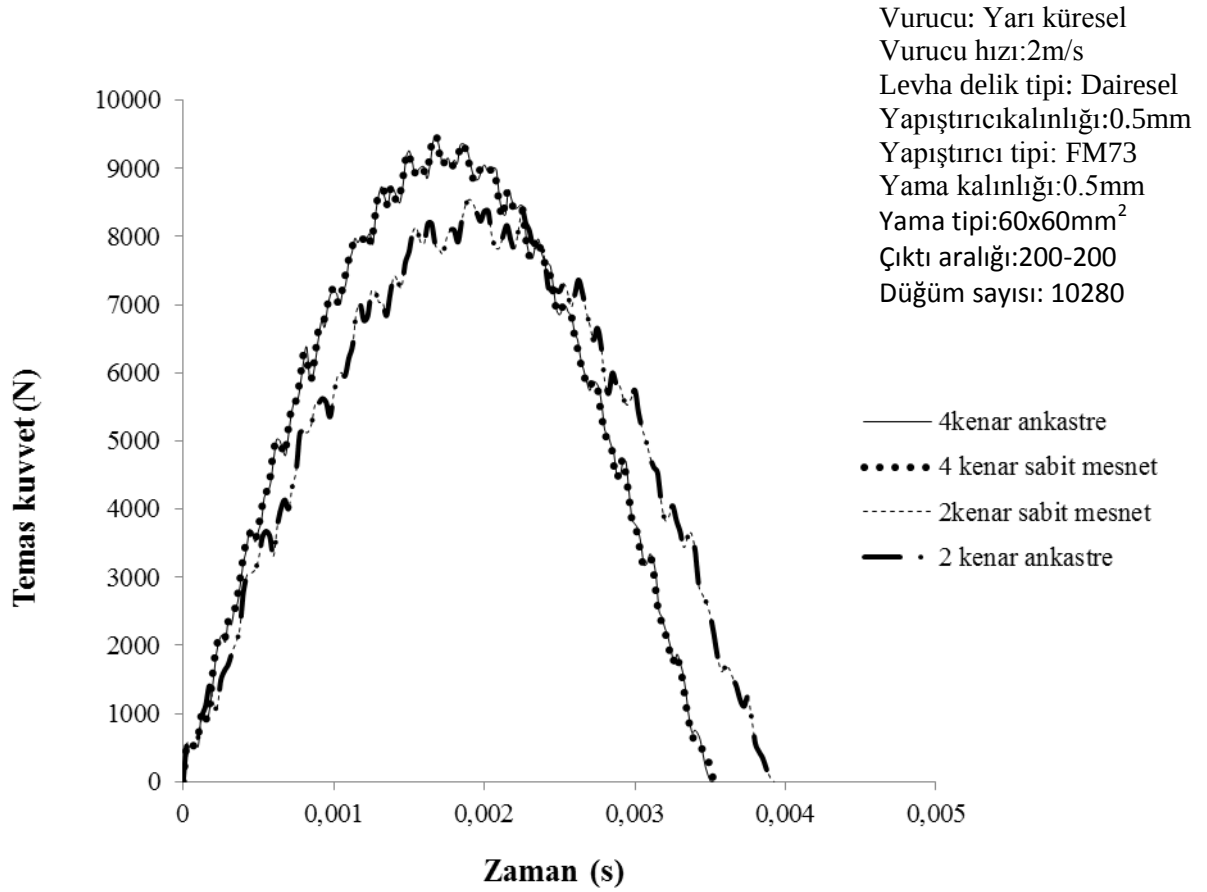
Grafiğe göre kare tip vurucu ucu en yüksek temas kuvvetine sahip olup sırası ile üçgen uç ve kesik uçta bu kuvvet daha da düşerek dairesel uçta en düşük değerine ulaşmıştır (Şekil 8.19).



Şekil 8.19 Vurucu uç tipinin değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı

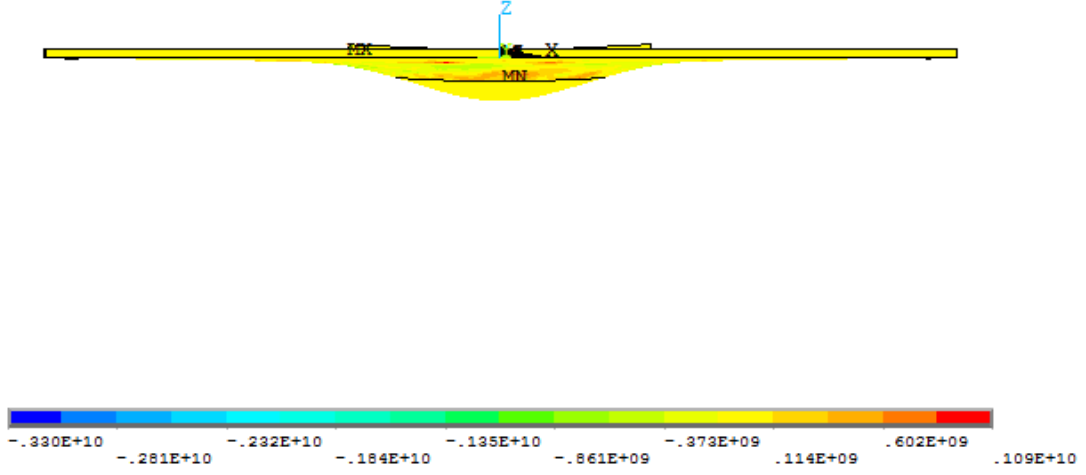
8.8 Sınır Şartlarının Darbe Davranışına Etkisi

Yapılan çalışmada 4 kenar ankastre, 4 kenar sabit mesnet, 2 kenar ankastre 2 kenar serbest, 2 kenar sabit mesnet 2 kenar serbest olmak üzere dört farklı mesnet durumunun darbe davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 4 kenar ankastre durumu ile 4kenar sabit mesnet durumundaki temas kuvveti değerleri bir birine yakın olmakla birlikte 4kenar ankastre mesnet durumunda meydana gelen temas kuvvetinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde 2 kenar ankastre ve 2 kenar sabit mesnetli durumlar için elde edilen sonuçlardan 2 kenar ankastre 2 kenar serbest mesnet durumu için bulunan temas kuvvetinin daha fazla olduğu gözlenmiştir (Şekil 8.20).

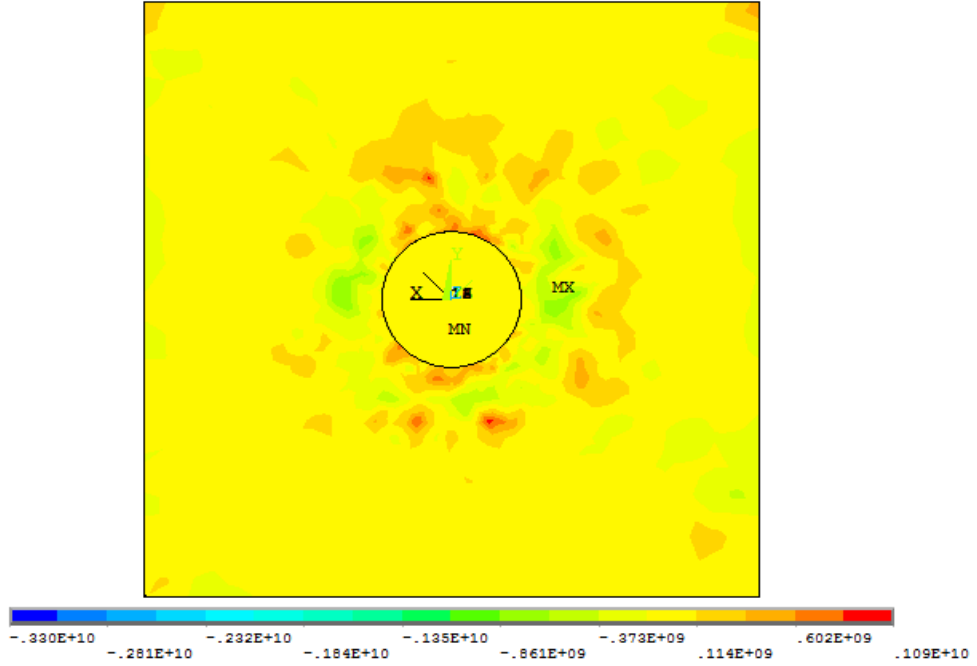


Şekil 8.20 Sınır şartlarının değişimine bağlı olarak temas kuvveti - zaman diyagramı

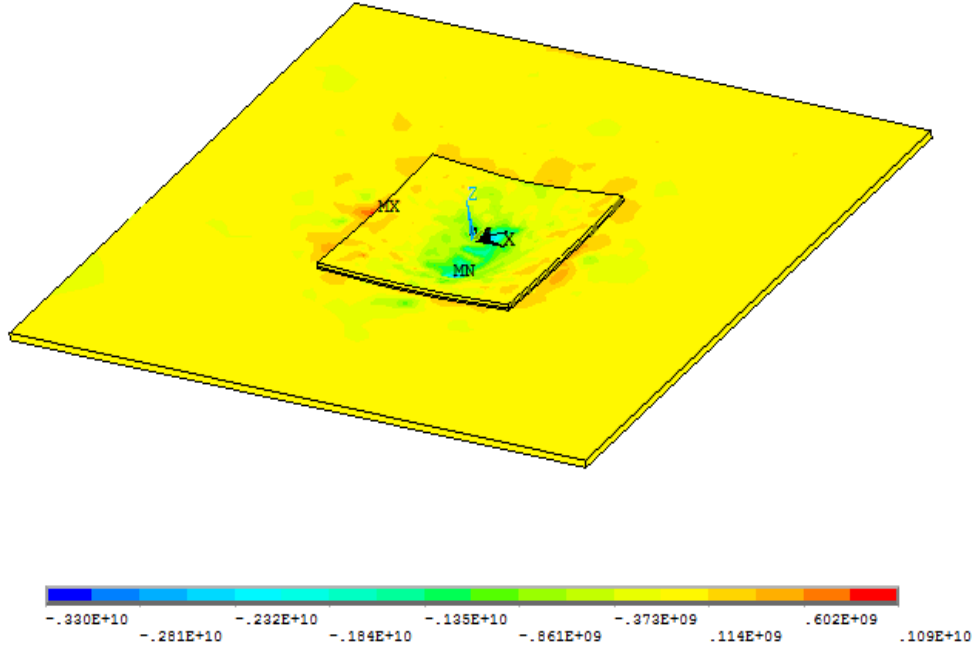
Şekil 8.21-23'de 1m/s hıza sahip vurucu için 0.00174.s'de meydana gelen x yönündeki maksimum çekme ve basma gerilmelerine ait grafikler görülmektedir. Bu grafiğin elde edilmesinde ortasında dairesel delik bulunan kompozit levha, 0.5 mm kalınlığa sahip FM73 yapıştırıcı, 0.5 mm kalınlığa sahip 60x60 mm² ölçülerinde yama ve yarı küresel uca sahip vurucu kullanılmıştır.



Şekil 8.21 1 m/s hıza sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri.

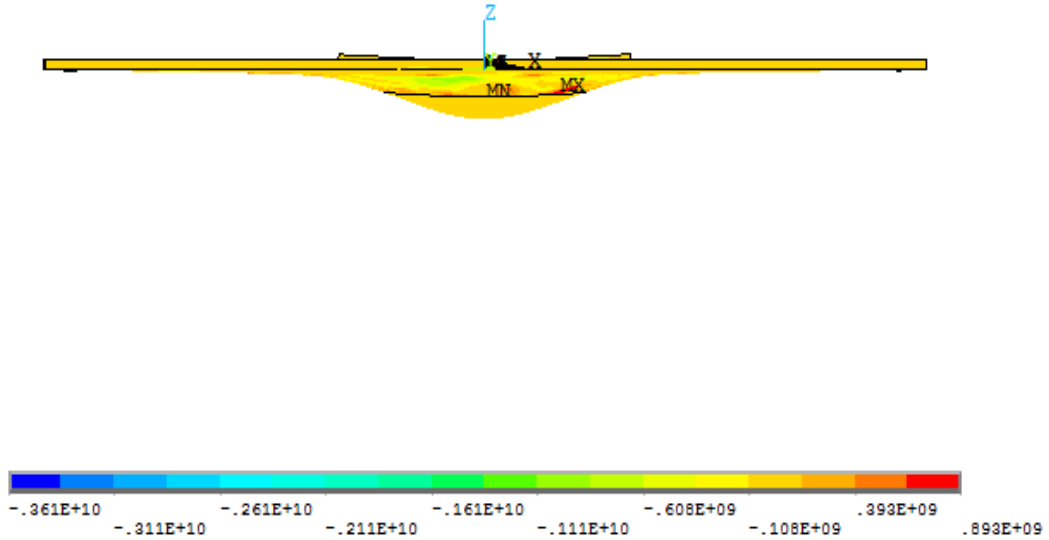


Şekil 8.22 1 m/s hıza sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri.

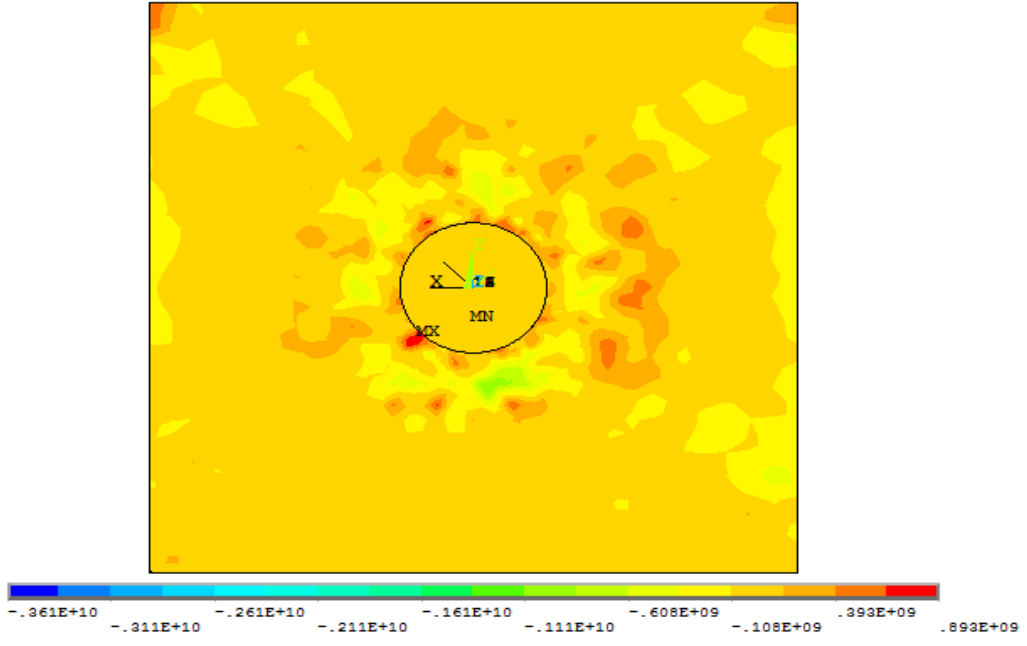


Şekil 8.23 1 m/s hızla sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri.

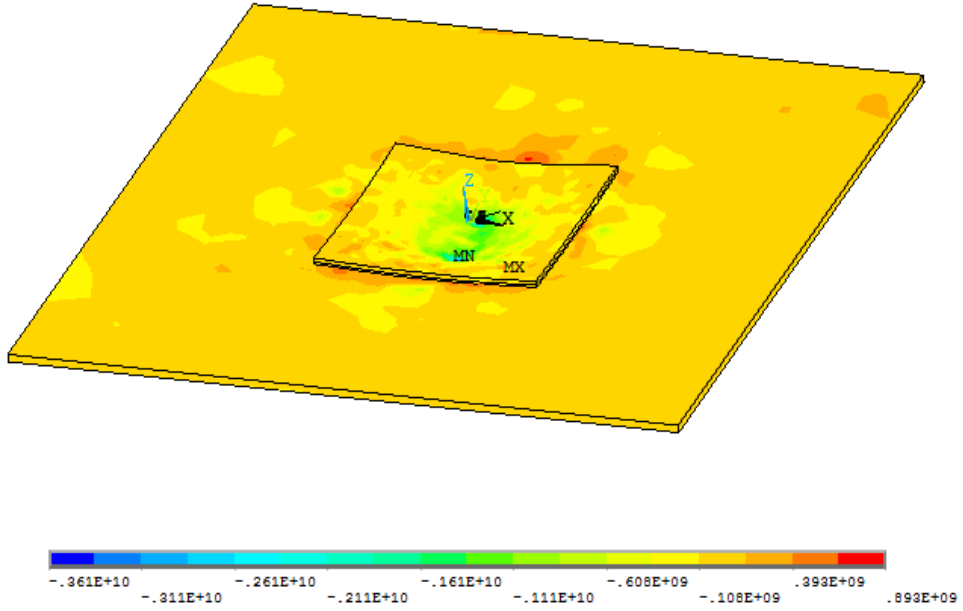
Şekil 8.24-26'da 1m/s hızla sahip vurucu için 0.0019.s'de meydana gelen y yönündeki maksimum çekme ve basma gerilmelerine ait grafikler görülmektedir. Bu grafiğin elde edilmesinde ortasında dairesel delik bulunan kompozit levha, 0.5 mm kalınlığa sahip FM73 yapıştırıcı, 0.5 mm kalınlığa sahip 60x60 mm² ölçülerinde yama ve yarı küresel uca sahip vurucu kullanılmıştır.



Şekil 8.24 1 m/s hızla sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri.

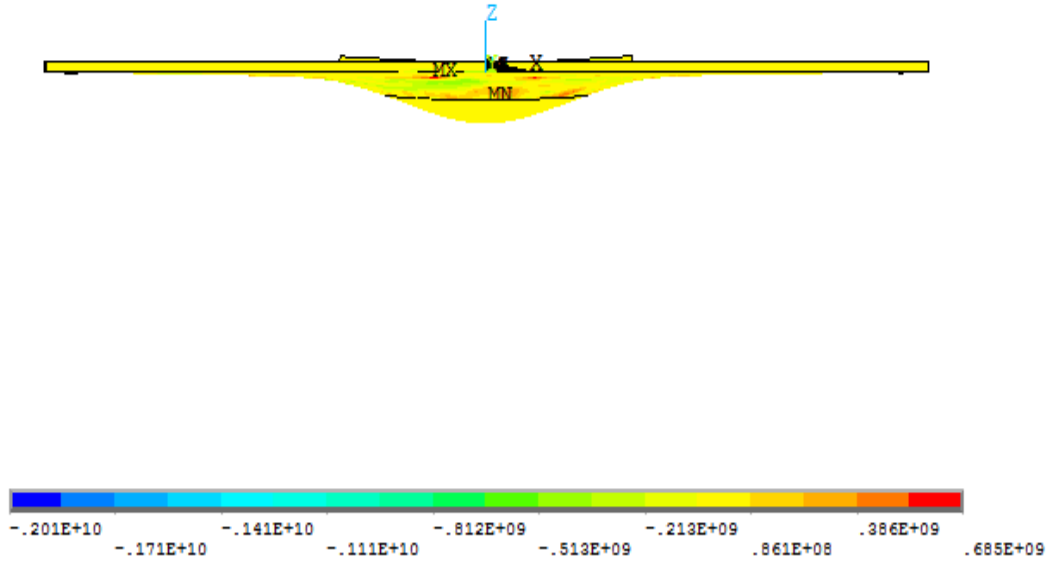


Şekil 8.25 1 m/s hızla sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri.

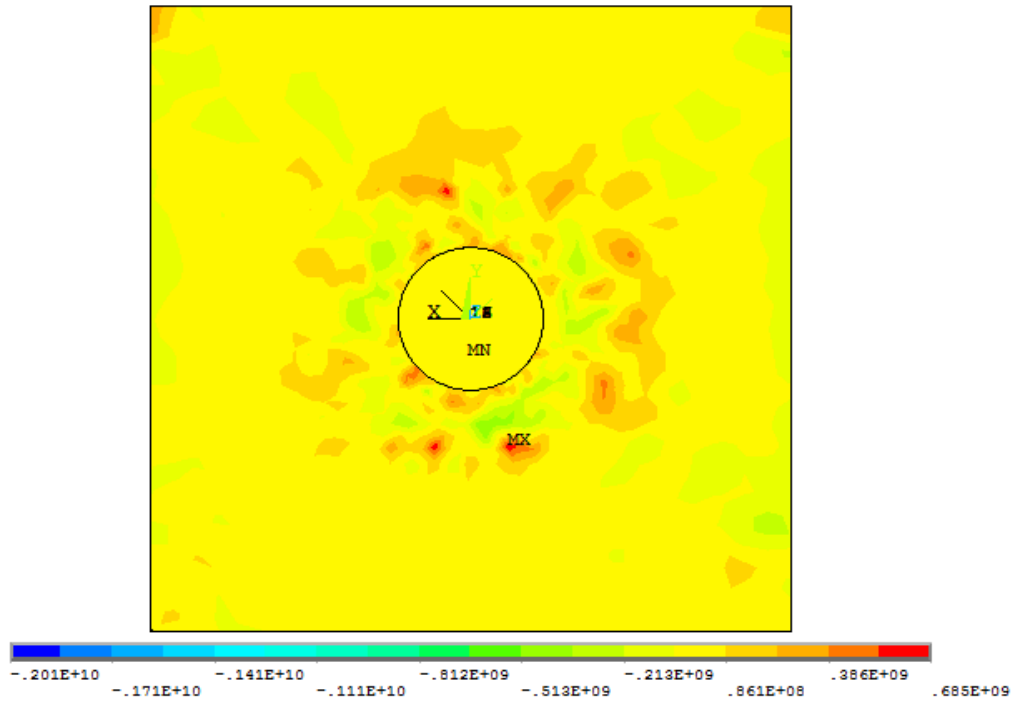


Şekil 8.26 1 m/s hızla sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri.

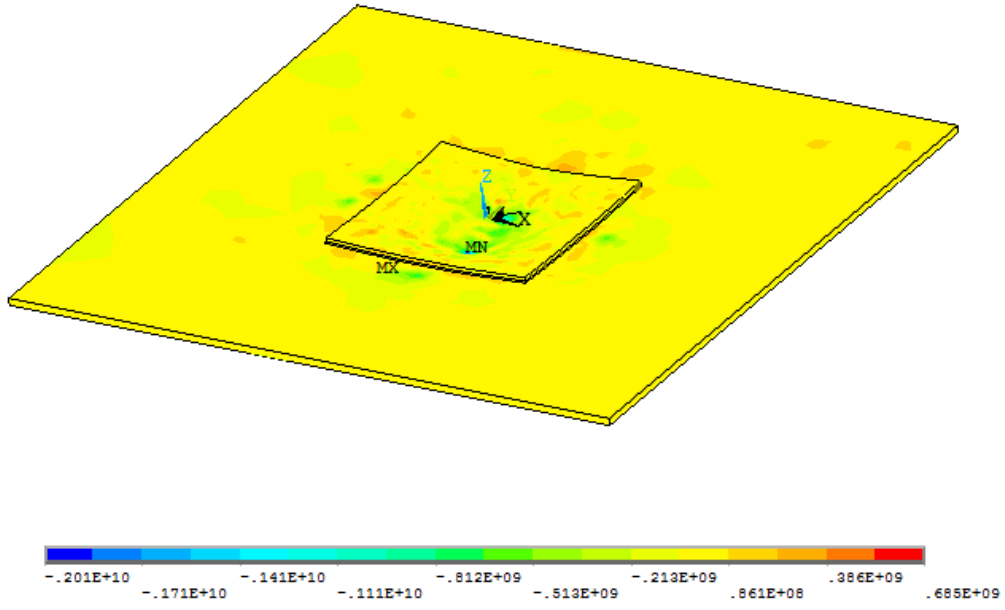
Şekil 8.27-29'da 1m/s hıza sahip vurucu için 0.0017.s'de meydana gelen z yönündeki maksimum çekme ve basma gerilmelerine ait grafikler görülmektedir. Bu grafiğin elde edilmesinde ortasında dairesel delik bulunan kompozit levha, 0.5 mm kalınlığa sahip FM73 yapıştırıcı, 0.5 mm kalınlığa sahip 60x60 mm² ölçülerinde yama ve yarı küresel uca sahip vurucu kullanılmıştır.



Şekil 8.27 1 m/s hıza sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri.

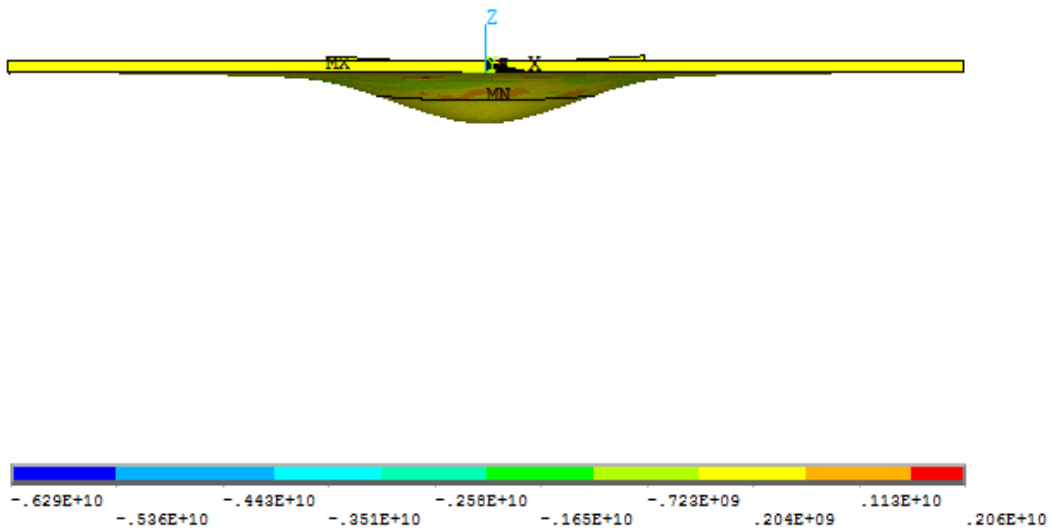


Şekil 8.28 1 m/s hıza sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri.

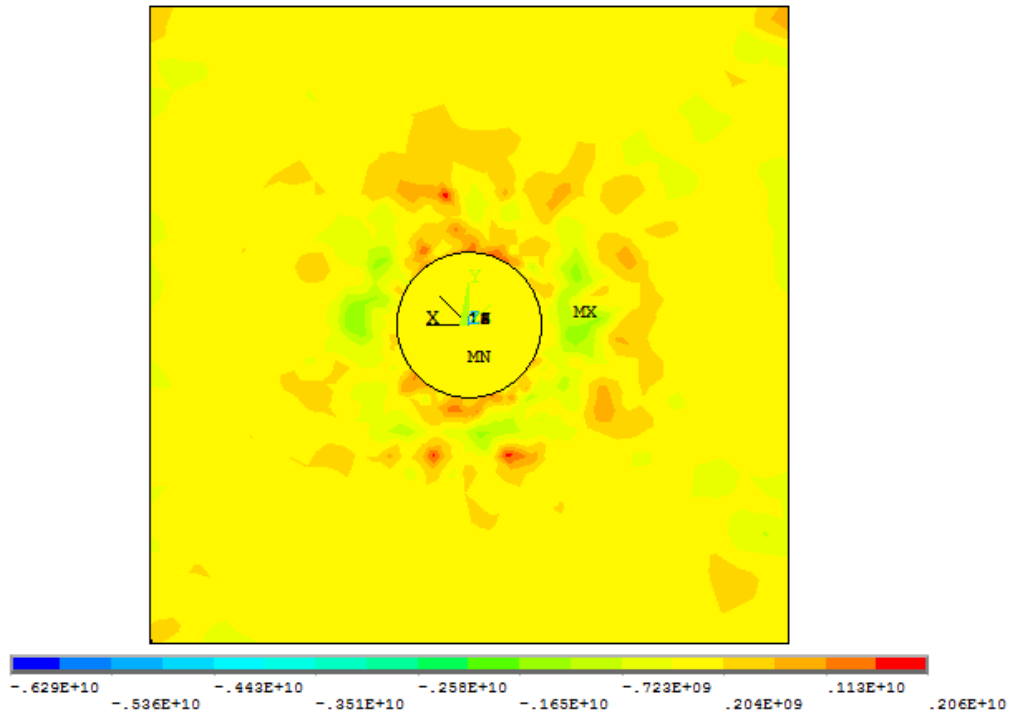


Şekil 8.29 1 m/s hıza sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri.

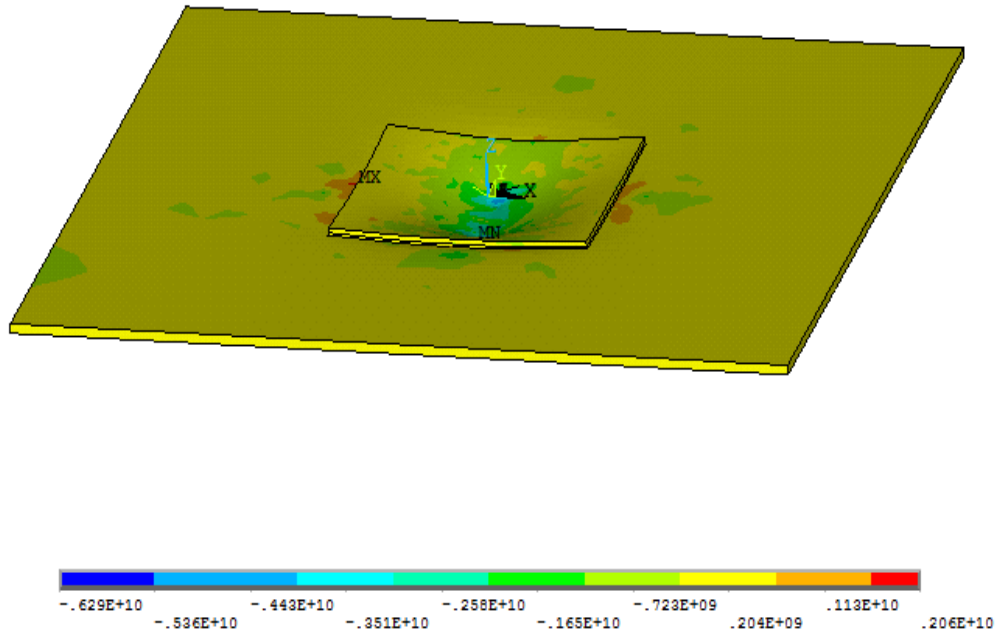
Şekil 8.30-32’de 2m/s hıza sahip vurucu için 0.00182.s’de meydana gelen x yönündeki maksimum çekme ve basma gerilmelerine ait grafikler görülmektedir. Bu grafiğin elde edilmesinde ortasında dairesel delik bulunan kompozit levha, 0.5 mm kalınlığa sahip FM73 yapıştırıcı, 0.5 mm kalınlığa sahip 60x60 mm² ölçülerinde yama ve yarı küresel uca sahip vurucu kullanılmıştır.



Şekil 8.30 2m/s hıza sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri.

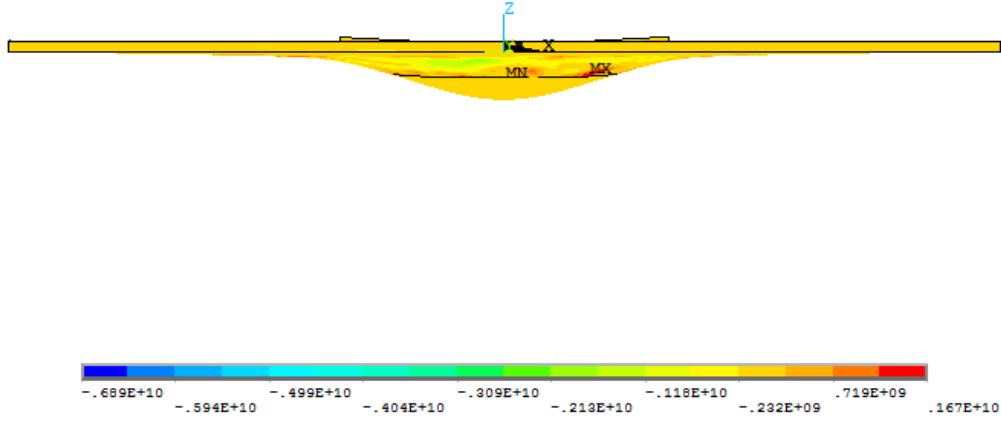


Şekil 8.31 2m/s hıza sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri.

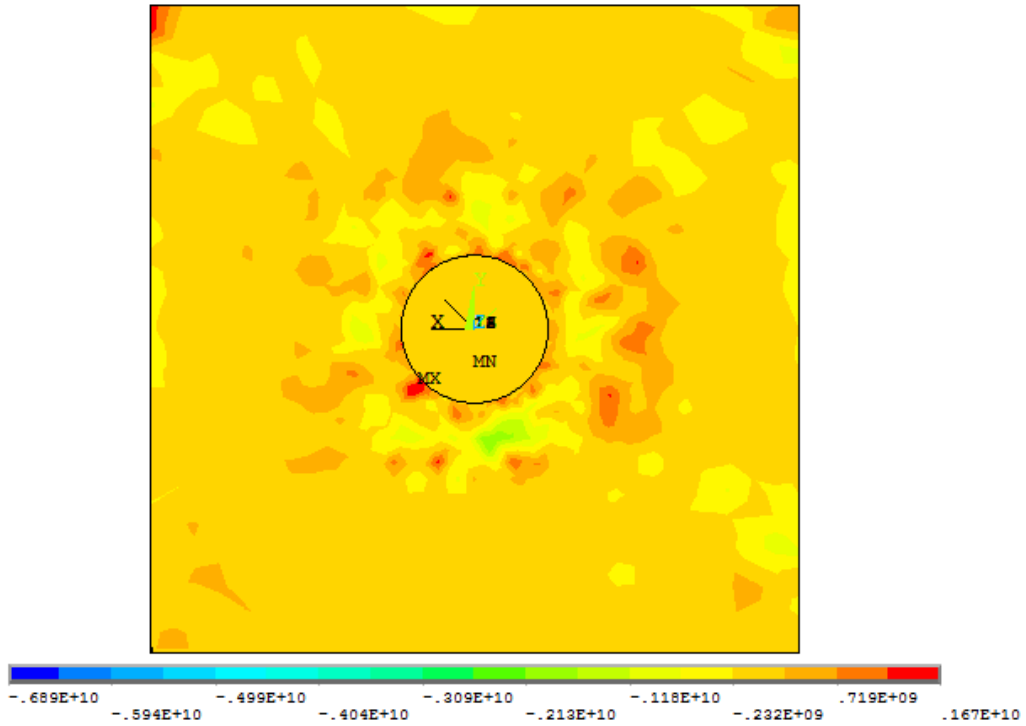


Şekil 8.32 2m/s hıza sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri .

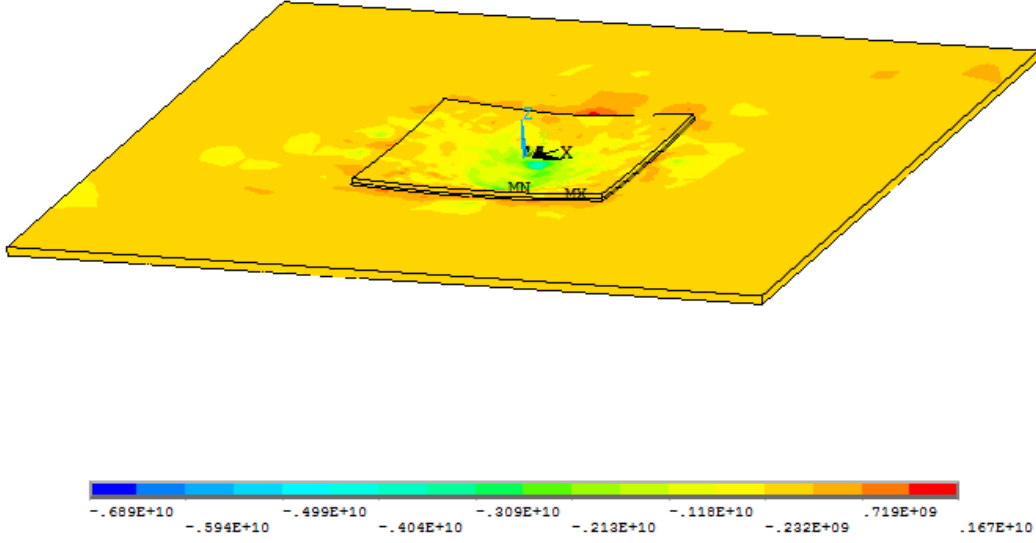
Şekil 8.33-35’de 2m/s hızı sahip vurucu için 0.00168.s’de meydana gelen y yönündeki maksimum çekme ve basma gerilmelerine ait grafikler görülmektedir. Bu grafiğin elde edilmesinde ortasında dairesel delik bulunan kompozit levha, 0.5 mm kalınlığa sahip FM73 yapıştırıcı, 0.5 mm kalınlığa sahip 60x60 mm² ölçülerinde yama ve yarı küresel uca sahip vurucu kullanılmıştır.



Şekil 8.33 2m/s hızı sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri.

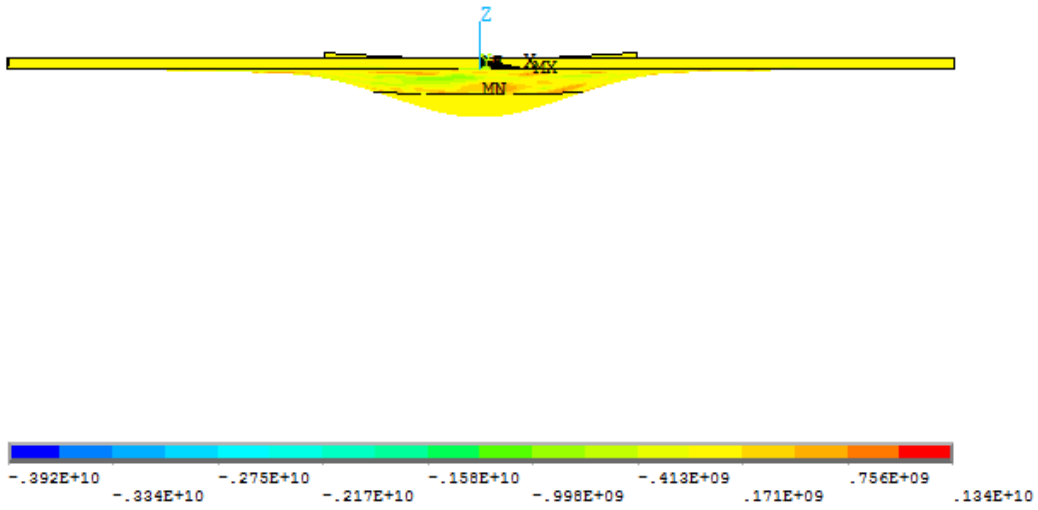


Şekil 8.34 2 m/s hızı sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri.

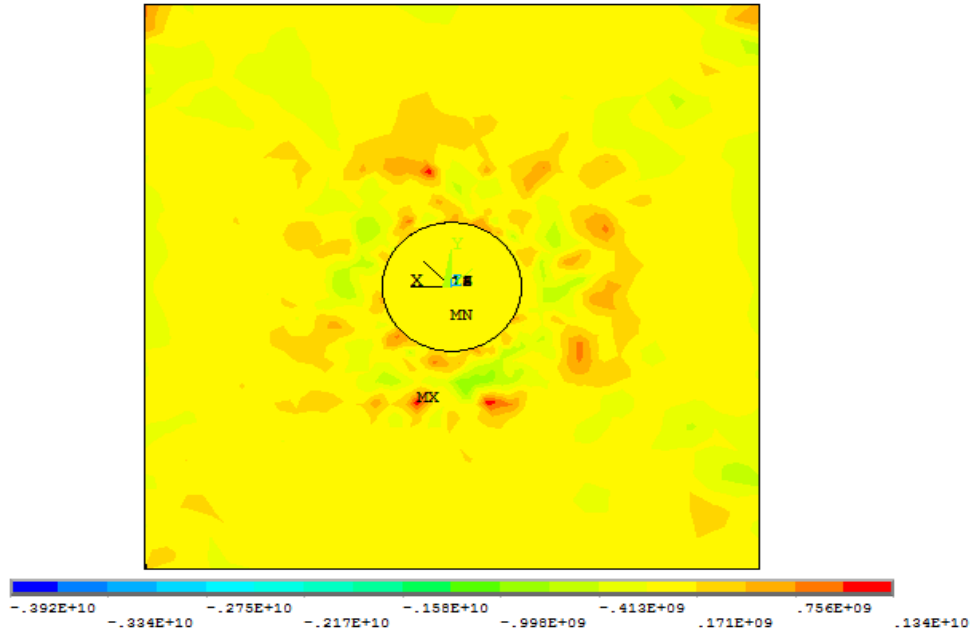


Şekil 8.35 2 m/s hızı sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri.

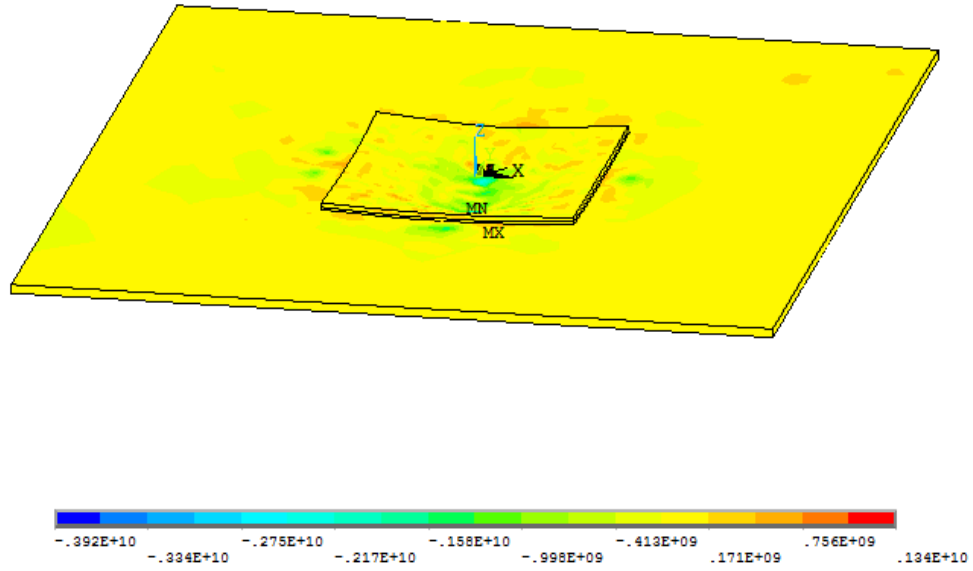
Şekil 8.36-38’de 2m/s hızı sahip vurucu için 0.00184.s’de meydana gelen z yönündeki maksimum çekme ve basma gerilmelerine ait grafikler görülmektedir. Bu grafiğin elde edilmesinde ortasında dairesel delik bulunan kompozit levha, 0.5 mm kalınlığa sahip FM73 yapıştırıcı, 0.5 mm kalınlığa sahip 60x60 mm² ölçülerinde yama ve yarı küresel uca sahip vurucu kullanılmıştır.



Şekil 8.36 2m/s hızı sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri.

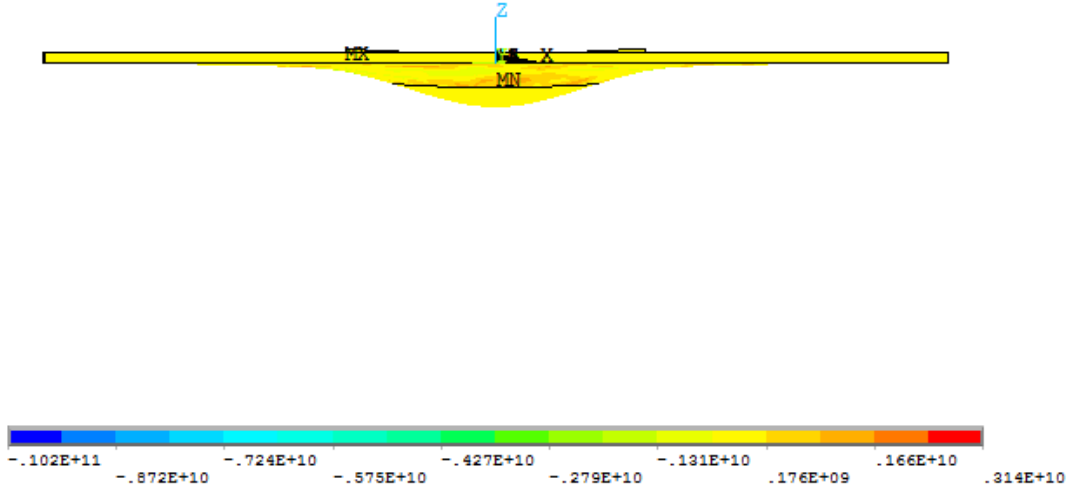


Şekil 8.37 2 m/s hıza sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri.

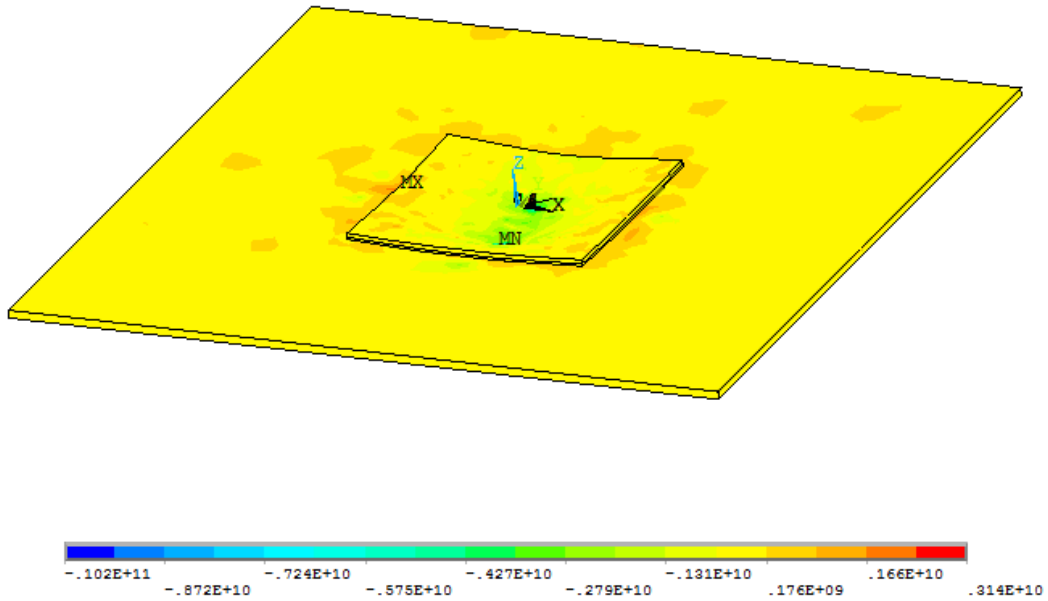


Şekil 8.38 2 m/s hıza sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri.

Şekil 8.39-40'da 3m/s hızı sahip vurucu için 0.002.s'de meydana gelen x yönündeki maksimum çekme ve basma gerilmelerine ait grafikler görülmektedir. Bu grafiğin elde edilmesinde ortasında dairesel delik bulunan kompozit levha, 0.5 mm kalınlığa sahip FM73 yapıştırıcı, 0.5 mm kalınlığa sahip 60x60 mm² ölçülerinde yama ve yarı küresel uca sahip vurucu kullanılmıştır.

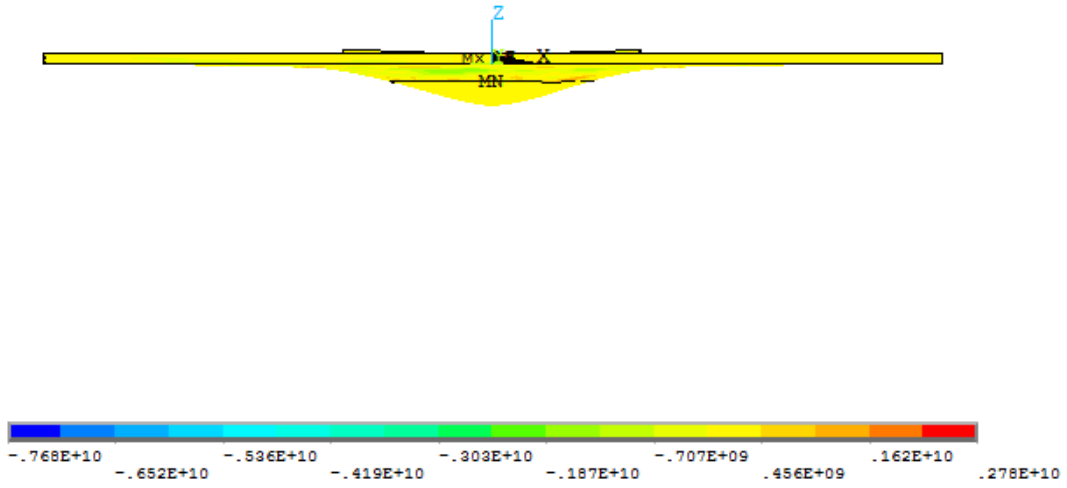


Şekil 8.39 3m/s hızı sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri.

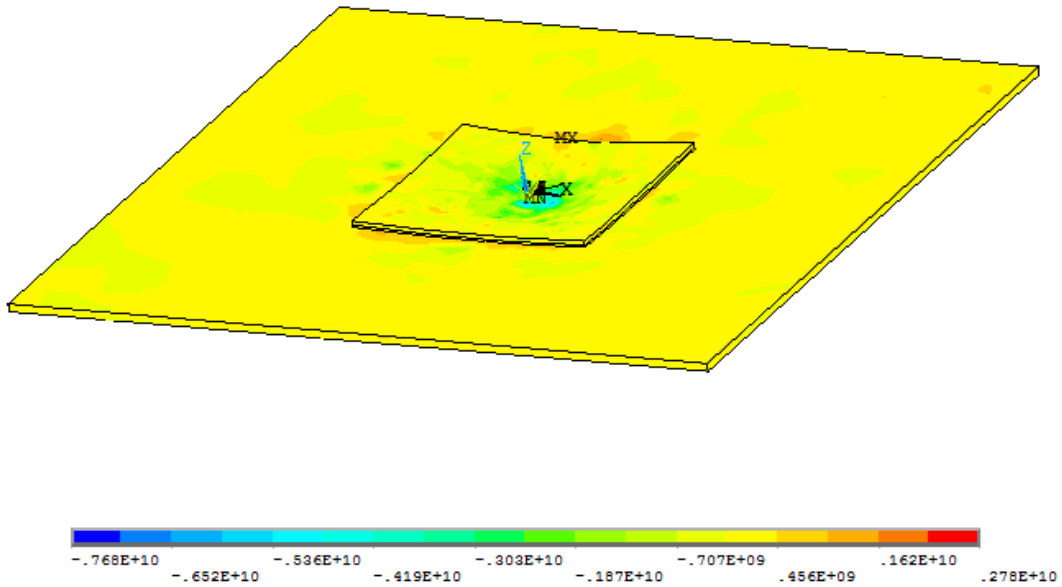


Şekil 8.40 3 m/s hızı sahip vurucu için x yönünde gerilme değerleri.

Şekil 8.41-42’de 3m/s hıza sahip vurucu için 0.00198.s’de meydana gelen y yönündeki maksimum çekme ve basma gerilmelerine ait grafikler görülmektedir. Bu grafiğin elde edilmesinde ortasında dairesel delik bulunan kompozit levha, 0.5 mm kalınlığa sahip FM73 yapıştırıcı, 0.5 mm kalınlığa sahip 60x60 mm² ölçülerinde yama ve yarı küresel uca sahip vurucu kullanılmıştır.

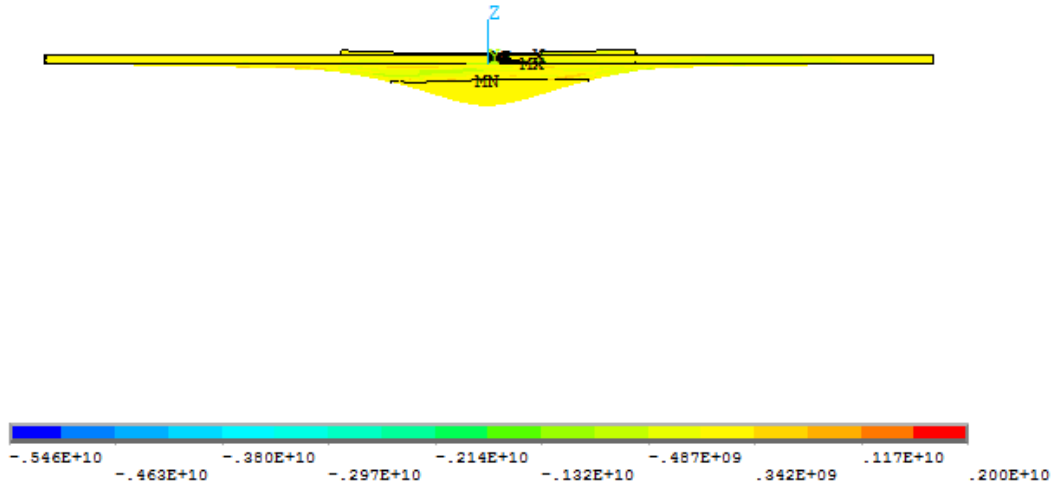


Şekil 8.41 3 m/s hıza sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri.

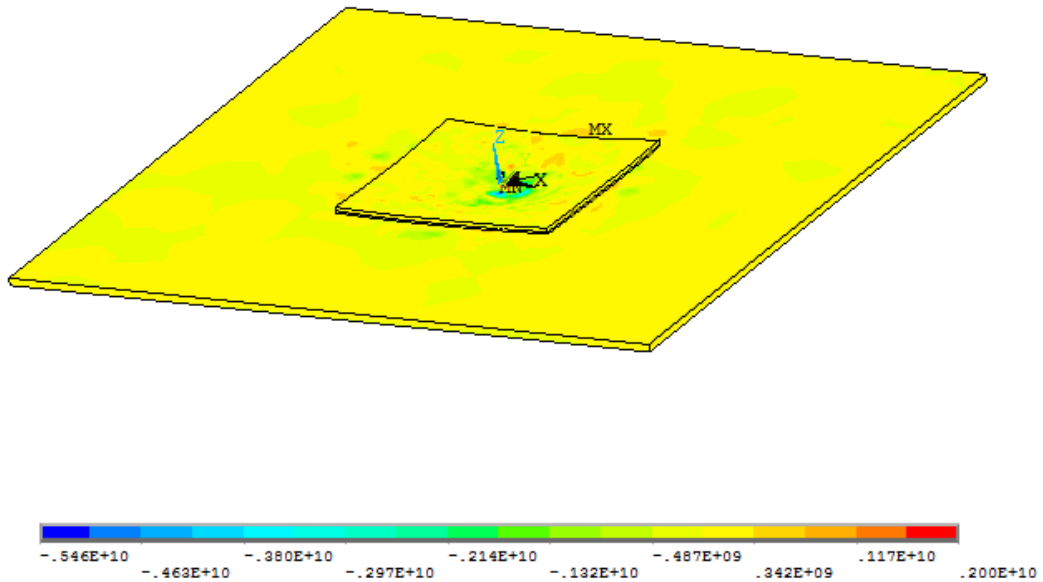


Şekil 8.42 3m/s hıza sahip vurucu için y yönünde gerilme değerleri.

Şekil 8.43-44'de 3m/s hıza sahip vurucu için 0.00242.s'de meydana gelen z yönündeki maksimum çekme ve basma gerilmelerine ait grafikler görülmektedir. Bu grafiğin elde edilmesinde ortasında dairesel delik bulunan kompozit levha, 0.5 mm kalınlığa sahip FM73 yapıştırıcı, 0.5 mm kalınlığa sahip 60x60 mm² ölçülerinde yama ve yarı küresel uca sahip vurucu kullanılmıştır.



Şekil 8.43 3 m/s hıza sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri.



Şekil 8.44 3m/s hıza sahip vurucu için z yönünde gerilme değerleri.

9. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

8.Bölümde darbe hızına bağlı olarak elde edilen temas kuvveti, maksimum çekme ve basma gerilemeleri, toplam enerji ve yer değiştirme grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre şu değerlendirmeler yapılabilir;

1. Şekil 8.3’de ortasında dairesel delik bulunan kompozit levha, 0.5 mm kalınlığa sahip FM73 yapıştırıcı, 0.5 mm kalınlığa sahip 60x60 mm² ölçülerinde yama ve yarı küresel uca sahip vurucu kullanılmış olup vurucu temas hızlarının değişimine bağlı olarak temas kuvvetinin değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre temas hızlarının artışına paralel olarak temas kuvvetlerinin arttığı analiz edilmiştir.

2. Şekil 8.4 ile Şekil 8.9 arasındaki grafiklerde, modelin mekanik ve geometrik özellikleri sabit tutulup vurucu temas hızlarının değişimine bağlı olarak maksimum çekme ve basma gerilmelerinin değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre maksimum çekme gerilmesinin 3 m/s’de ve elastisite modülünün maksimum olduğu x yönünde meydana gelmiştir.

3. Şekil 8.10’da vurucu temas hızının değişimine bağlı olarak toplam enerji (kinetik enerji, iç enerji, vs.) değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre temas hızının artmasıyla birlikte levhada absorbe edilen enerji miktarının da arttığı gözlemlenmiştir.

4. Şekil 8.12’de vurucu temas hızının değişimine bağlı olarak levhanın darbe yönüne paralel yöndeki yer değiştirmesi incelendiğinde temas hızının artışına paralel olarak yer değişiminin arttığı belirlenmiştir. Bu değer; 1 m/s hıza sahip vurucu için yaklaşık 1.1 mm, 2 m/s hıza sahip vurucu için 2.2mm ve 3 m/s hıza sahip vurucu için 2.9 mm olarak elde edilmiştir.

5. Şekil 8.13’de levha delik çapının değişimine bağlı olarak temas kuvvetinin değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre delik çapının artmasına bağlı olarak temas kuvvetinin azaldığı gözlemlenmiştir. 30 mm delik çapına sahip levha için temas kuvveti 7800 N civarında iken bu değer 50mm delik çapına sahip levha için 6800 N kadar düştüğü belirlenmiştir.

6. Şekil8.14’de levha delik tipinin değişimine bağlı olarak temas kuvvetinin değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en fazla temas kuvvetinin altıgen tip delikte meydana geldiği ve en az temas kuvvetinin kare tip delikte meydana geldiği gözlemlenmiştir.

7. Ortasında dairesel delik bulunan levhanın yama ile tamir edilmesi çeşitli yapıştırıcılar aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.15de farklı türdeki bu yapıştırıcıların temas kuvveti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kullanılan yapıştırıcıların elastisite modülleri büyükten küçüğe doğru sırasıyla; EA9395, FM73, EN11343’dür.Elde edilen sonuçlara göre elastisite modülünün artışına paralel olarak temas kuvvetinin de arttığı tespit edilmiştir.

8. Şekil 8.16’da yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak temas kuvveti değişimi incelenmiştir. Yapıştırıcı kalınlığı 1 mm, 0.5 mm ve 0.25 mm için çözümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yapıştırıcı kalınlığı arttıkça temas kuvveti de buna bağlı olarak arttığı belirlenmiştir.

9. Şekil 8.17’de farklı yama boyutlarının temas kuvveti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen bilgilere göre yama yüzey alanı arttıkça temas kuvvetinin azaldığı gözlemlenmiştir.

10. Şekil 8.18’de yama tipinin darbe davranışına etkisini incelemek amacıyla çeşitli geometrik şekillere sahip yamalar kullanılarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre temas kuvvetinin en büyük altıgen tip yamada en küçük ise kare tip yamada çıktığı gözlenmiştir.

11. Şekil 8.19’da vurucu ağırlıkları, hızları ve bırakıldıkları yükseklikler sabit tutularak vurucu ucu farklı geometrik şekillerde modellenip çözülmüştür. Vurucu ucu 0 mm² kontak alanına sahip (kesik uç) ,kare, üçgen ve dairesel(yarı küresel) geometrilere sahiptir. Elde edilen bilgilere göre kare tip vurucu ucu en yüksek temas kuvvetine sahip olup sırası ile üçgen uç ve kesik uçta bu kuvvet daha da düşerek dairesel uçta en düşük değerine ulaştığı belirlenmiştir.

12. Şekil8.20’de 4 kenar ankastre, 4 kenar sabit mesnet, 2 kenar ankastre 2 kenar serbest, 2 kenar sabit mesnet 2 kenar serbest olmak üzere dört farklı mesnet durumunun darbe davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 4 kenar ankastre durumu ile 4kenar sabit mesnet durumundaki temas kuvveti değerleri bir birine yakın olmakla birlikte 4kenar ankastre mesnet durumunda meydana gelen temas kuvvetinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Aynı şekilde 2 kenar ankastre ve 2 kenar sabit mesnetli durumlar için elde edilen sonuçlardan 2 kenar ankastre 2 kenar serbest mesnet durumu için bulunan temas kuvvetinin daha fazla olduğu gözlenmiştir.

13. Şekil 8.21 ile Şekil 8.44 arasındaki grafiklerde temas hızına bağlı olarak x, y ve z yönlerindeki maksimum çekme ve basma gerilemelerine ait grafikler ve maksimum çekme ve basma gerilmelerinin meydana geldiği zamanlar verilmiştir. Elde edilen bilgilere göre x ve z yönlerinde vurucu temas hızının artmasına bağlı olarak maksimum çekme ve basma gerilmesinin meydana geldiği zaman da artmaktadır.

14.Yapılan çalışmaya ek olarak fiber takviye açısının etkisi incelenebilir.

15.Elasto-plastik çözüm yapılabilir.

16.Hasar analizi yapılabilir.

17.Tabaka sayısının etkisi incelenebilir.

18.Pim bağlantılı yapılar için hasar analizi tekrarlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1]. **Goo, N.S. & Kim, S.J.**, 1997. Dynamic Contact Analysis of Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact , *AIAA Journal*, 35, 1518-1521..
- [2]. **Lee, L.J., Huang, K.Y., & Fann, Y.J.**, 1993. Dynamic Responses of Composite Sandwich Plate Impacted By Rigid Ball, *Journal of Composite Materials*, 27, 1238-1256.
- [3]. **Wang, H., & Vukhanh.**, 1994. Damage Extension in Carbon Fiber/PEEK Cross Ply Laminates under Low-Velocity Impact, *Journal of Composite Materials*. 28,684-704..
- [4]. **Whittingham, B., Marshall, I.H., Mitrevski, T., Jones, R.**, 2004. The Response of Composite Structures with Pre-Stress Subject to Low Velocity Impact Damage, *Composite Structures*, 66, 685-698.
- [5]. **Belingardi, G., Vadori, R.**, 2003. Influence of Laminate Thickness in Low Velocity Impact Behavior of Composite Material Plate, *Composite Structures*, 61, 27-38.
- [6]. **Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R. Whittingham, B.**, 2004. The Effect of Impactor Shape on the Impact Response of Composite Laminates, *Composite Structures*, 67, 139-148.
- [7]. **Husseinzadeh, R., Shokrieh, M.M. and Lessard, L.**, 2006. Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts, *Composite Science and Technology*, 66, 61-68.
- [8]. **Sugun, B.S., and Rao, R.M.V.G.K.**, 2004. Low Velocity Impact of Glass, Carbon and Kevlar Composites Using Repeated Drop Tests, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.,No.15, 1583-1599.
- [9]. **Gür, M., ve Örcen, G.**, 2005.Çelik Takviyeli Termoplastik Kompozit Levhada Elasto-Plastik Gerilme Analizi, *Yüksek Lisans Tezi* 147, Elazığ,
- [10]. **Mili, F., and Necip, B.**, 2001. Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates under Low Velocities, *Composite Structures*. 51, 237-224.
- [11]. **Aslan, Z., Karakuzu, R. and Okutan, B.**, 2003. The Response of Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading. *Composite Structures*, 59, 119-127.
- [12]. **Aslan, Z. and Karakuzu, R.**, 2002. Transient Dynamic Analysis of Laminated Composite Plate Subjected to Low-Velocity Impact, *Mathematical & Computational Applications*, No.1, 73-82.
- [13]. **Baucom, J.N., and Zikry, M.A.**, 2005. Low Velocity Impact Damage Progression in Woven E-glass. *Composite Systems, Composites Part A, Applied science and manufacturing*, 36, 658-664.

- [14] **Belingardi, G., Vadori, R.**, 2002. Low Velocity Impact Tests of Laminate Glass-Fiber-Epoxy Matrix Composite Material Plates. *International Journal of Impact Engineering*, 27, 213-229.
- [15] **Abatan, A., Hu, H., & Olowokere, D.**, (1998). Impact Resistance Modeling of Hybrid Laminated Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 11, 249-260.
- [16] **Akın C., Şenel M.**, 2010. An Experimental Study Of Low Velocity Impact Response For Composite Laminated Plates. *DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Sayı 21*, ANSYS LS-DYNA User's Guide, Release 12.0.
- [17] **Aslan, Z., Karakuzu, R. & Okutan, B.**, (2003). The Response of Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading, *Composite Structures*, 59, 119-127.
- [18] **Baucom, J.N., & Zikry, M.A.**, (2005). Low Velocity Impact Damage Progression in Woven E-glass Composite Systems, *Composites*, 36, 658-664.
- [19] **Belingardi, G., Vadori, R.**, (2002). Low Velocity Impact Tests of Laminate Glass- Fiber Epoxy Matrix Composite Material Plates, *International Journal of Impact Engineering*, 27, 213-229.
- [20] **Cantwell W.J. , Morton J.**, (1991). The Impact Resistance of Composite Materials-a Review. *Composites*. Vol:22, p:347-362.
- [21] **Caprino, G., Spataro, G. ve Del Luongo S.**, (2004). Low-Velocity Impact Behaviour of Fibreglass-Aluminium Laminates, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Vol:35, p:605-616.
- [22] **Chakraborty D.**, (2007). Delamination of laminated fiber reinforced plastic composites under multiple cylindrical impact, *Materials and Design* 28 (2007) 1142–115.
- [23] **Chiu, S. T. , Liou, Y. Y. , Chang, Y. C. , Ong. C. L.**, (1997) Low velocity impact behavior of prestressed composite laminates, *Materials Chemistry and Physics* Vol:47, p:268-272.
- [24] **Dhakal N. H., Zhang Y. Z., Richardson W. O. M., Errajhi Z.A. O.**, (2006). The low velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites, *Composite Structures*.
- [25] **Dobyns, A.L.**, (1981). Analysis of Simply Supported Orthotropic Plates Subjected To Static and Dynamic Loads, *AIAA Journal*, 19, 642-680.
- [26] **Gautam S. Chandekar, Bhushan S. Thatte, Ajit D. Kelkar.**, (2010). On the Behavior of Fiberglass Epoxy Composites under Low Velocity Impact Loading, *Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering*, 11 pages 10.1155/2010/621406.

- [27]**Gong, S.W., & Lam, K.Y.**, (1999). Transient Response of Stiffened Composite Plates Subjected to Low Velocity Impact, **Composites**, Part B, 30, 473-484.
- [28]**Goo, N.S. & Kim, S.J.**, (1997). Dynamic Contact Analysis of Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact. *AIAA Journal*, 35, 1518-1521.
- [29]**Guan Z. ve Yang C.**, (2002). Low-Velocity Impact and Damage Process of Composite Laminates, *Journal of composite materials*, Vol. 36, No. 07.
- [30] **Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M.M. & Lessard, L.**, (2006) Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts, *Composite Science and Technology*, 66, 61-68.
- [31]**Hosur V. M., Islam M. M. and Jeelani S.**, (2008). Low-Velocity Impact Response of Braided Carbon/Epoxy Composites. *ICCES*, vol.6, no.1, pp.81-89.
- [32]**Jih CJ, Sun CT.**, (1993). Prediction of delamination in composite laminates subjected to low velocity impact, *J Compos Mater*, Vol:27, p:684-701.
- [33]**Jones, R.M. Mc Graw-Hill.**, (1998). composites of metarials, Newyork. **Karakuzu, R., Erbil E. & Aktas M.**, (2010). Damage prediction in glass/epoxy laminates subjected to impact loading, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* Vol. 17, June 2010, pp. 186-198.
- [34]**Kim, J.K. & Kang, K.W.**, (2001) An Analysis of Impact Force in Plain-weave Glass/epoxy Composite Plates Subjected to Transverse Impact, *Composite Science and Technology*, 61, 135-143.
- [35]**Lal, K.M.**, (1982) . Prediction of Residual Tensile Strength of Transversely Impacted Composite Laminates, *Structure Solid Mech*, NASA CP-2245, pp.97-111. Laminates. *Journal of Reinforced Plastics Composites*, 11, 297-305.
- [36]**Lee, L.J., Huang, K.Y., & Fann, Y.J.**, (1993) Dynamic Responses of Composite Sandwich Plate Impacted By Rigid Ball, *Journal of Composite Materials*, 27, 1238- 1256.
- [37]**Lee, Y.S. , Kang, K.H., & Park, O.**, (1997). Response of Hybrid Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact, *Computers & Structures*, 65, 965-974.
- [38]**Lin, C. J., Chang, L.C., Nien, M.H., ve Ho, H.L.**, (2005). Mechanical Behavior of Various Nanoparticul Filled Composites at Low-Velocity Impact, *Composite Structures*, Vol:74, p:30-36.
- [39]**Liu, Z.S., Lee, H.P. ve Lu C.**, (2005). Structural Intensity Study of Plates Under Low-Velocity Impact, *International Journal of Impact Engineering*. Vol:31, p:957- 975.
- [41]**Mili, F., & Necip, B.**, (2001). Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates under Low Velocities, *Composite Structures*. 51, 237-224.

- [42]Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R. Whittingham, B., (2005). The Effect of Impactor Shape on the Impact Response of Composite Laminates, *Composite Structures*, 67, 139-148
- [43]. Şenel, M. Ünal,R. Mumyalmaz, B. Karakoç ,F., 2009.Ön Gerilmeli Kompozit Plakaların Düşük Hızlı Darbe Yüğü Etkisi Altında Davranışlarının İncelenmesi, *Tübitak Mühendislik Araştırma Gurubu*, Kütahya p:105M195.
- [44]. Abrate, S., 1998.Impact on Composite Structures, *Cambridge University Pres*.
- [45] .Liu, D., Raju, B. B., Dang, X., 2000.Impact Perforation Resistance of Laminated and Assembled Composite Plates, *International Journal of Impact Engineering*, 24,733-746.
- [46]. Coppens, G. J., 2004. Effect of Three Dimensional Geometry on Penetration and Perforation Resistance, *Yüksek Lisans Tezi*, Michigan State University, MI.
- [47]. Abrate, S., 1994.Impact on laminated composites: recent advances, *Amer Soc Mech Eng*, p:517–44.
- [48]. Zukus, JA., 1982. Penetration and perforation of solids. Impact Dynamics, *John Wiley*, p:155–214.
- [49]. Sankar, BV., 1996. Low-velocity impact response and damage in composite Materials, *Key Eng Mater*, 121–122, p:549–82.
- [50]. Hong, S., & Liu, D., 1989. On the relationship between impact energy and delamination area, *Exp. Mech*, p:115–20.
- [51]. N.K.Naik, Y.C.Sekhar, S.Meduri., 2000. Damage in woven fabric composites subjected to low-velocity impact, *Composite Science and Technology* 60, 731-744
- [52].H.Park,H.Kim., 2010.Damge resistance of single lap adhesive composite joints by transverse ice impact, *International Journoal of Impact Engineering* 37 ,177-84
- [53]. G.Challita , R.othman., 2010.Finite-element analysis of SHPB tests on double-lap adhesive joints, *International Journoal of Adhesion and Ahesives* 30, 236-244
- [54].W.K.Chiv, Z,Zhou, J.Wang, A.Bakır., 2012.Battle damage repair of helicopter composite manin rötär blade, *Composite Part B* 43, 739-753
- [55] Kara,M. Akdemir,A. Uyaner,M. Dağhan,B., 2009.Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı, *Yüksek Lisans Tezi*, Konya.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa ALBAYRAK 1988 yılında Elazığ'da doğdu. Elazığ Cumhuriyet İlkokulunu(1999), Elazığ Mezre Ortaokulunu(2002), Elazığ Yavuz Selim Lisesini(2005), Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü(2010)'da tamamladı. 2010-2011 yılları arasında Zorlu Şirketler Grubunun Tunceli Ovacıktaki Hidroelektrik Santralinde türbin bakım şefi olarak görev aldı.2011-2012 yılları arasında Elazığ Eti Krom A.Ş' de makine bakım onarım şefi olarak görev aldı.