

**VİSKOELASTİK JEL DOLGULU KORUGE
ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ PLAKLARIN ŞOK YÜKÜ
PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ
İLE İNCELENMESİ**

Sercan DEVRİM



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**VİSKOELASTİK JEL DOLGULU KORUGE ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ
PLAKLARIN ŞOK YÜKÜ PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Sercan DEVRİM
ORCID No: 0000-0002-0728-5067

Prof. Dr. Murat YAZICI
(Danışman)
ORCID No: 0000-0002-8720-7594

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Sercan DEVRİM tarafından hazırlanan “VİSKOZELASTİK JEL DOLGULU KORUGE ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ PLAKLARIN ŞOK YÜKÜ PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Murat YAZICI

Başkan: Prof. Dr. Murat YAZICI
ORCID No: 0000-0002-8720-7594
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Ali Rıza MOTORCU
ORCID No: 0000-0002-9129-08935
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
Anabilim Dalı

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Zeliha Kamış KOCABIÇAK
ORCID No: 0000-0003-3292-8324
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN,
Enstitü Müdürü
04/09/2020

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

11/08/2020

Sercan DEVRİM

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

VİSKOELASTİK JEL DOLGULU KORUGE ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ PLAKLARIN ŞOK YÜKÜ PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Sercan DEVRİM

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Zırhlı araçların mayın patlamasına karşı korunması için son yıllarda ciddi çalışmalar yapılmaktadır. Zırhlı araçların patlama etkisine karşı dayanımlarını arttırmak için enerji sönmüleme kabiliyetleri yüksek malzemeler tercih edilmektedir. Sunulan Yüksek Lisans Tezinde koruge (ondula) geometrisine sahip çekirdekten oluşan sandviç plakların şok dalgası etkisi altında sönmüleme performansı Sonlu Elemanlar Yöntemi ile incelenmiştir. İlk çalışma olarak dört model oluşturulmuştur. Bu dört model şok tüp testlerindeki numuneler ile belirlenmiştir. Ardından Sonlu Elemanlar Yöntemi ile şok yükü altındaki performansı incelenmiştir. Şok tüp test cihazında Yüksek Hızlı kameralar desteği ile gerçekleştirilmiş olan şok testlerinden elde edilen deplasman-zaman değişimleri Sonlu Elemanlar Modellerinin doğrulanması için kullanılmıştır. Sonlu Elemanlar analizleri Ls-Dyna kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı deplasman değerlerini elde etmek amacıyla CONWEP patlayıcı modeli oluşturulmuş ve patlama analizleri gerçekleştirilmiştir. Patlama analizlerinde elde edilen deplasman değerleri şok testi ve şok analizi ile karşılaştırılıp değerlendirilmiştir. Maksimum deplasmanların birbirlerine çok yakın olması farklı bir modelin sadece patlama analizi ile doğrulanmasının önünü açmıştır. İkinci çalışma olarak koruge çekirdek içerisindeki hücre boşluklarının balistik jel dolgu (viskoelastik jel) ile doldurma yönteminden elde edilen alternatif sandviç modellerin performansları incelenmiştir. Viskoelastik jel için beş model oluşturulmuştur. Viskoelastik jel dolgulu sandviç tasarımlarının Sonlu Elemanlar Analizleri CONWEP yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda viskoelastik jel dolgunun şok dalgasını sönmülemeye dönük sağladığı iyileştirme ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Şok testi, Şok Analizi, Patlama Analizi, CONWEP, Viskoelastik Jel

2020, ix+78 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

AN INVESTIGATION OF SHOCK LOAD PERFORMANCE OF VISCOELASTIC GEL FILLED CORRUGATED CORE SANDWICH PLATES BY FINITE ELEMENT METHOD

Sercan DEVRİM

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

In recent years, major works have been carried out to protect armored vehicles against mine blast. In order to enhance the strength of armored vehicles against blast effects, materials that have high energy absorbing capability are preferred. In the presented Master Thesis, damping performance of sandwich plates consisting of core with corrugated geometry under the effect of shock wave was investigated with Finite Element Method. Four models were created for the first study. These four models were determined by samples in the shock tube tests. Then, performances under shock load were investigated with the Finite Element Method. Displacement-time changes obtained from the shock tests performed with the support of High-Speed cameras in the shock tube test device were used to verify the Finite Element Models. Finite Element Analyses were performed using Ls-Dyna. CONWEP blast model was created to obtain the same displacement values and blast analyses were performed. The displacement values in the blast analysis were compared and evaluated by shock test and shock analysis. The maximum displacements are very close to each other paved the way for a different model to be verified by only the blast analysis. As the second study, performances of alternative sandwich models obtained by filling cell cavities in corrugated core with ballistic gel filling (viscoelastic gel) method were investigated. Five models were created for the viscoelastic gel. Finite Element Analysis of viscoelastic gel filled sandwich designs were performed using CONWEP method. As a result, improvement provided by the viscoelastic gel filler to dampen the shock wave was revealed.

Key words: Shock Test, Shock Analysis, Blast Analysis, CONWEP, Viscoelastic Gel

2020, ix+78 pages.

TEŞEKKÜR

Bu alıŐma, TUBITAK-ARDEB 218M468 nolu “*Kendi Kendine Makro Seviyede İyileŐebilir Özellikli Yeni Hibrit Sandviç Panel GeliŐtirilmesi ve Statik, Anlık Dinamik ve Şok Yükleri Altında İyileŐme Performansının İncelenmesi*” proje kapsamında gerçekleŐmiŐtir.

Bu çalışmada emeği geçen değerli hocam Prof. Dr. Murat YAZICI’ya yardımlarını esirgemediği ve sürekli destek olduğu için teŐekkürlerimi sunarım.

Buğnlere gelmemde büyük emeği olan, maddi ve manevi her zaman yanımda olan, beni sürekli destekleyen değerli aileme teŐekkürlerimi sunarım.

Sercan DEVRİM
11/08/2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Zırhlı Araçların Tarihçesi.....	3
2.1.1. Üretilen ilk mayın korumalı muharebe aracı	3
2.1.2. Üretilen ilk mayın korumalı tank	4
2.2. Zırh Üretim Çeşitleri	5
2.2.1. Mono blok zırh.....	5
2.2.2. Çok bloklu zırh.....	6
2.2.3. Aralıklı çok bloklu zırh	6
2.2.4. Eğimli aralıklı çok bloklu zırh	6
2.3. Zırh Çeşitleri	6
2.3.1. Parçacık kalkanı	7
2.3.2. Sıvı zırh	7
2.3.3. Patlayıcı reaktif zırh	7
2.4. Zırhlı Araçlarda Kullanılan Zırh Malzemeleri	7
2.4.1. Zırh çeliği	7
2.4.2. Alüminyum	8
2.4.3. Titanyum	8
2.4.4. Zayıflatılmış uranyum.....	8
2.4.5. Kompozit.....	8
2.5. Metalik Köpükler	9
2.5.1. Metalik köpüklerin tarihçesi	9
2.5.2. Metalik köpüklerin sınıflandırılması.....	10
2.5.3. Metalik köpükleri üretim yöntemleri	12
2.5.4. Metalik köpüklerin kullanım alanları.....	13
2.6. Balistik Jel.....	17
2.6.1. Balistik jel hazırlama.....	17
2.6.2. Balistik jel kullanım alanları	18
2.7. Mayınlar	19
2.7.1. Mayının icadı	19
2.7.2. Mayın türleri.....	19
2.8. Patlama Türleri.....	21
2.8.1. Serbest patlamalar	21
2.8.2. Kapalı patlamalar	22
2.9. Şok Dalgaları.....	23
2.10. Dijital Görüntü Korelasyonu Yöntemi.....	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1. Sonlu Elemanlar Teorisi.....	27
3.2. Ls-Dyna Tarihçesi.....	28
3.2.1. Ls-Dyna eksplisit çözüm teorisi.....	29

3.2.2. Johnson-Cook malzeme modeli	31
3.2.3. Poliüretan köpük malzeme modeli	32
3.2.4. Viskoelastik jel malzeme modeli	33
3.3. CONWEP Patlama Teorisi	33
4. BULGULAR	35
4.1 Sonlu Elemanlar Analizi	35
4.1.1. Ağ örgüsü oluşturma	35
4.1.2. Malzeme özelliklerinin tanımlanması	35
4.1.3. Kesit özelliklerinin tanımlanması	37
4.1.4. Diğer analiz parametreleri	38
4.2. Test ve Analiz Korelasyon Çalışmaları	40
4.2.1. Şok basıncı testi	40
4.2.2. Tek plaka korelasyon çalışması	44
4.2.3. Koruge çekirdekli sandviç model korelasyon çalışması	48
4.2.4. Poliüretan köpük dolgulu sandviç model korelasyon çalışması	51
4.2.5. Poliüretan köpük dolgulu koruge model korelasyon çalışması	55
4.3. Viskoelastik Jel Dolgulu Koruge Model Analizleri	58
4.3.1. Viskoelastik jel sonlu elemanlar modelleri	59
4.3.2. Patlama analizi	59
4.3.3. Viskoelastik jel dolgulu koruge model analizi	60
4.3.4. 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model analizi	62
4.3.5. 1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge model analizi	64
4.3.6. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge model analizi	66
4.3.7. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge model analizi	68
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	71
KAYNAKLAR	72
EKLER	75
EK 1. Ls-Dyna Kontrol Kartları	76
EK 2. Ls-Dyna Malzeme ve Kesit Kartları	77
ÖZGEÇMİŞ	78

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

P_{so}	Maksimum Aşırı Basınç
P_{so}^-	Maksimum Bir Negatif Basınç
A	Malzeme Akma Gerilimi
B	Gerinim Sertleştirme Sabiti
C	Gerinim Oranını Güçlendirme Katsayısı
ϵ_p	Efektif Plastik Gerinim
M	TNT kütlesi
m	Isıl Yumuşatma Katsayısı
n	Gerinim Sertleştirme Katsayısı
T	Etkin Sıcaklık
T_{melt}	Malzeme Erime Sıcaklığı
T_{room}	Oda Sıcaklığı

Kısaltmalar

Açıklama

CONWEP	Geleneksel patlayıcı modeli (Conventional Weapons)
DGK	Dijital görüntü korelasyonu
LBE	İyileştirilmiş patlayıcı yükü (LOAD_BLAST_ENHANCED)
LSTC	Livermore yazılım teknolojileri şirketi (Livermore Software Technology Corporation)
SEM	Sonlu elemanlar metodu
TNT	Trinitrotoluen

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Leonardo Da Vinci zırhlı tankı	3
Şekil 2.2. İlk mayın korumalı muharebe aracı Spook	4
Şekil 2.3. İlk mayın korumalı tank Leopard 2 A6M	5
Şekil 2.4. Metalik köpük kesiti	9
Şekil 2.5. Açık hücreli metalik köpük yapısı	11
Şekil 2.6. Kapalı hücreli metalik köpük yapısı	12
Şekil 2.7. İçi metalik köpük dolu çarpışma kutularının analiz görüntüleri	14
Şekil 2.8. İçi boş ve metalik köpük dolu çarpışma kutularının yer değiştirme karşılaştırması	15
Şekil 2.9. Sandviç köpük panelden yapılmış bir roket konisi	15
Şekil 2.10. Gelişmiş yüksek sıcaklık radyatörü	16
Şekil 2.11. Köpük metalde gerçekleşen ısı transferi	17
Şekil 2.12. Anti-personel mayın kesiti	20
Şekil 2.13. Serbest patlamalar	22
Şekil 2.14. Kapalı patlamalar	23
Şekil 2.15. Hava patlamasının bir yapıyla etkileşimi	24
Şekil 2.16. Serbest hava paralanma basınç-zaman değişimi	24
Şekil 2.17. İdealleştirilmiş basınç-zaman değişimi	25
Şekil 3.1. Çizgi elemanlar	27
Şekil 3.2. Düzlem elemanlar	28
Şekil 3.3. Hacim elemanlar	28
Şekil 3.4. Ls-Dyna eksplisit çözüm döngüsü	30
Şekil 3.5. Gerilme hızına duyarlı ezilebilir köpüğün davranışı	32
Şekil 4.1. Poliüretan köpük akma gerilimi-hacimsel gerinimi	37
Şekil 4.2. Automatic surface to surface kontak kontrolü	38
Şekil 4.3. Şok tüpü	40
Şekil 4.4. Deplasman ölçümleri için deneysel kurulum	41
Şekil 4.5. Test modelleri şematik gösterimi	41
Şekil 4.6. Tek plakada meydana gelen kalıcı deplasman	42
Şekil 4.7. Koruge çekirdekli sandviç modelde gerçekleşen şekil değiştirme	43
Şekil 4.8. Poliüretan köpük dolgulu sandviç modelde gerçekleşen şekil değiştirme	43
Şekil 4.9. Poliüretan köpük dolgulu koruge modelde gerçekleşen şekil değiştirme	44
Şekil 4.10. Tek plaka modeli önden görünüş	44
Şekil 4.11. Şok basıncının zamana bağlı değişimi	45
Şekil 4.12. Deplasman değerlerinin karşılaştırılması	46
Şekil 4.13. Şok basıncı analizi maksimum deplasman anı	47
Şekil 4.14. Patlama analizi maksimum deplasman anı	47
Şekil 4.15. Koruge model önden görünüş	48
Şekil 4.16. Koruge model yandan görünüş	48
Şekil 4.17. Şok basıncının zamana bağlı değişimi	49
Şekil 4.18. Deplasman değerlerinin karşılaştırılması	50
Şekil 4.19. Şok basıncı analizi maksimum deplasman anı	51
Şekil 4.20. Patlama analizi maksimum deplasman anı	51
Şekil 4.21. Sandviç model önden görünüş	52
Şekil 4.22. Sandviç model yandan görünüş	52
Şekil 4.23. Şok basıncının zamana bağlı değişimi	52

Şekil 4.24. Deplasman değerlerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.25. Şok basıncı analizi maksimum deplasman anı.....	54
Şekil 4.26. Patlama analizi maksimum deplasman anı	55
Şekil 4.27. Poliüretan köpük dolgulu koruge model önden görünüş	55
Şekil 4.28. Poliüretan köpük dolgulu koruge model yandan görünüş	56
Şekil 4.29. Şok basıncının zamana bağlı değişimi	56
Şekil 4.30. Deplasman değerlerinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.31. Şok basıncı analizi maksimum deplasman anı.....	58
Şekil 4.32. Patlama analizi maksimum deplasman anı	58
Şekil 4.33. Sınır koşullarının uygulanması	59
Şekil 4.34. Viskoelastik jel dolgulu koruge önden görünüş.....	60
Şekil 4.35. Viskoelastik jel dolgulu koruge yandan görünüş.....	60
Şekil 4.36. Viskoelastik jel dolgulu koruge model deplasman değerleri.....	61
Şekil 4.37. Patlama analizi ön yapı maksimum deplasman anı	62
Şekil 4.38. 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model önden görünüş	62
Şekil 4.39. 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model yandan görünüş.....	63
Şekil 4.40. 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model deplasman değerleri.....	63
Şekil 4.41. Patlama analizi ön yapı maksimum deplasman anı	64
Şekil 4.42. 1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge model önden görünüş	64
Şekil 4.43. 1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge model yandan görünüş.....	65
Şekil 4.44. 1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge model deplasman değerleri.....	65
Şekil 4.45. Patlama analizi ön yapı maksimum deplasman anı	66
Şekil 4.46. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge model önden görünüş.....	66
Şekil 4.47. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge model yandan görünüş.....	67
Şekil 4.48. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge model deplasman değerleri	67
Şekil 4.49. Patlama analizi ön yapı maksimum deplasman anı	68
Şekil 4.50. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge model önden görünüşü	69
Şekil 4.51. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge model yandan görünüşü	69
Şekil 4.52. Delikli koruge yapı	69
Şekil 4.53. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge model deplasman değerleri.....	69
Şekil 4.54. Patlama analizi ön yapı maksimum deplasman anı	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Metal plakaların malzeme değerleri.....	36
Çizelge 4.2. Poliüretan köpük malzeme değerleri	36
Çizelge 4.3. Viskoelastik jel malzeme değerleri.....	37
Çizelge 4.4. Patlayıcı parametreleri	45
Çizelge 4.5. Tek plaka maksimum deplasman değerleri.....	46
Çizelge 4.6. Patlayıcı parametreleri	49
Çizelge 4.7. Koruge çekirdekli sandviç model maksimum deplasman değerleri	50
Çizelge 4.8. Patlayıcı parametreleri	53
Çizelge 4.9. Poliüretan köpük dolgulu sandviç model maksimum deplasman değerleri	54
Çizelge 4.10. Patlayıcı parametreleri	57
Çizelge 4.11. Poliüretan köpük dolgulu koruge model maksimum deplasman değerleri	57
Çizelge 4.12. Patlayıcı parametreleri	60
Çizelge 4.13. Viskoelastik jel dolgulu koruge model maksimum deplasman değerleri .	61
Çizelge 4.14. 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model maksimum deplasman değerleri.....	63
Çizelge 4.15. 1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge model maksimum deplasman değerleri.....	65
Çizelge 4.16. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge model maksimum deplasman değerleri.....	67
Çizelge 4.17. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge model maksimum deplasman değerleri	70

1. GİRİŞ

Dünya tarihi incelendiğinde savaşların her zaman var olduğu görülmektedir. Eski çağlardaki savaşlarda ok ve mızrak kullanırken gelişen teknoloji ve sanayi devrimi ile birlikte ok ve mızrak yerini top ve tüfeğe bırakmıştır. Sanayinin daha da ileriye gitmesi ile birlikte savaşlarda zırhlı araç ve tanklar da kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum ise tank ve zırhlı araçları tahrip etmek ve savaş dışına itmek adına mayınların icadını ortaya çıkarmıştır. Mayınlar toprak altına gömüldükleri için görünmez düşman olarak nitelendirilebilirler. Mayın patlamasının milisaniyeler içerisinde gerçekleştiği düşünülürse mayına bastıktan sonra patlamayı durdurmak imkânsızdır. Bu özellik ile mayınlar, kara birliklerinin en büyük tehdidi olarak algılanmaktadır. Nitekim ülkemizin terörist saldırıları önlemek adına yıllardan beri gerçekleştirdiği operasyonlarda mayın patlaması sonucu birçok askeri aracımız tahrip olmuş, askerlerimiz ise şehit olmuştur. Bu durum zırhlı araçları patlama etkisine karşı daha dayanıklı olarak üretilmeye yöneltmiştir. Malzeme teknolojisinin gelişmesi ile birlikte zırhlı araçlarda kullanılan malzeme çeşitleri de artmıştır. İlk zırhlı araçlarda zırh malzemesi olarak haddelenmiş zırh çeliği kullanılırken, daha sonralarda döküm zırh çeliği, sertleştirilmiş çelik zırh, titanyum, magnezyum alaşımları, alüminyum, naylon ve fiberglas kullanılmıştır. Fakat gelişen teknoloji ile birlikte zırhlı araçları tahrip etmeye yönelik mayınlar, el yapımı patlayıcılar da gelişmiştir. Bu durum patlama etkisini en aza indirecek malzeme arayışına yol açmıştır.

Gelişen teknoloji ile birlikte zırh malzemesi olarak metalik köpüklerin ortaya çıkması sağlanmıştır. Metalik köpükler düşük yoğunluğa sahip olmalarına rağmen yüksek enerji emme kabiliyetleri nedeniyle savunma sanayi alanında son yılların gözdesi haline gelmiştir. Metalik köpükler alüminyum, titanyum, nikel ve birkaç farklı materyalden yapılır. Köpük metaller tipik olarak ana metalin bazı fiziksel özelliklerini korurlar. Yanmaz niteliktedir ve genellikle ana malzemeye geri dönüştürülebilirler. Termal iletkenlik katsayısı düşerken termal genleşme katsayısı hemen hemen aynı kalır.

Malzeme teknolojisi konusunda bilgiler artması ile farklı türde malzemelerin mayın korumaya yönelik dayanımsal özellikleri üzerinde araştırma ve geliştirme çalışmaları da

artmıştır. Yüksek lisans tezi kapsamında kullanılan viskoelastik jel malzeme de yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarına katkı niteliğindedir. Kullanılan jel malzeme balistik alanında kullanılmaktadır. Günümüzde bu malzemenin mayın korumaya karşı zırh malzemesi olarak kullanıldığına dair henüz bir bilgi yoktur. Bu sebeple mayın patlamasına karşı dayanım özelliklerini incelemek amacıyla patlama analizleri gerçekleştirilmiştir.

Teknoloji geliştikçe mayın korumaya yönelik daha etkin malzemelerin kullanılacağı aşikârdır. Buna karşılık geliştirilen her bir malzeme için mayın koruma dayanımını görmek adına testlerin yapılması mümkün değildir. Çünkü yapılar üzerindeki patlama yüklerinin deneysel testleri çok pahalı ve tehlikelidir. Bilgisayarların hayatımıza girmesi ile sağladıkları yararlar çok fazladır. Mühendislik uygulamalarında bilgisayarların kullanılmaya başlanması ile birlikte hem zaman olarak hem de maddi olarak büyük kazançlar sağlanmıştır. Sonlu elemanlar metodu (SEM) ile gerçekleştirilen analizlerin bilgisayar ortamına aktarılması ile birlikte yeni geliştirilen malzemelerin dayanımları hakkında öngörüle bulunmak kolaylaşmıştır. Böylece deneysel testler yapmak yerine bilgisayar ortamında analizler gerçekleştirmek malzemenin dayanımı hakkında bilgi verdiği için cezbedici hale gelmiştir. Bilgisayarlar ilk üretilmeye başladığı zamanlarda çok güçlü özelliklere sahip değillerdi. Fakat günümüz teknolojisi ile çok daha güçlü konuma geldiler. Bu sayede bilgisayarların yardımıyla mayın patlaması, çarpışma, devrilme gibi karmaşık analizleri sonlu elemanlar yöntemiyle yapmak mümkündür. Teknolojinin gelişme hızı da göz önüne alındığında ilerleyen zamanlarda test sayılarının çok düşük olacağı, sonlu elemanlar analizlerinin ise daha da popüler hale geleceği ön görülmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Zırhlı Araçların Tarihçesi

Zırhlı araçların tarihi Leonardo Da Vinci'ye kadar uzanmaktadır. Tarihte bilinen ilk zırhlı savaş aracının tasarımını 1487 yılında Leonardo Da Vinci yapmıştır. Tasarım kaplumbağa kabuğundan esinlenilerek yapıldığı için konik bir şekle sahipti.



Şekil 2.1. Leonardo Da Vinci zırhlı tankı (A.C.B. 1886a)

Zırh ahşaptan yapılmış ve kalınlık sağlayan metal plakalarla güçlendirilmişti. Konik şekil sayesinde oluşan eğik açılar ile düşman ateşini saptırmak hedeflenmiştir. Makine dört güçlü adam tarafından çalıştırılan iki büyük iç krank tarafından desteklenmiştir. Araç, çevresine yerleştirilmiş bir dizi hafif top ile donatılmıştı (A.C.B. 1886b). Zırhlı araç, ciddi bir askeri silah olarak kullanılmak yerine düşmanı korkutmak için tasarlandı. Araç etkileyici boyutu nedeniyle engebeli arazide hareket edemeyeceği düşünülüyordu. Bu yüzden proje, 15. yüzyılda uygulanamadı ve gerçekleştirilemedi (Goran 2008).

2.1.1. Üretilen ilk mayın korumalı muharebe aracı

İlk mayın korumalı muharebe aracı 1979'da tanıtılan ve Mercedes-Benz Unimog hafif kamyonun gövdesine dayanan, Rodoslu bir 4x4 piyade savaş aracıydı. On kişi taşıyabilen bir Unimog şasisine monte edilmiş düşük maliyetli, mayın ve pusuya karşı

korumalı piyade savaş aracı Rodos ordusunun gereksinimlerini karşılayabilmek amacıyla üretilmişti. Mayın patlamalarını engellemek için V şeklinde bir taban kullanılmıştı. Ancak Rodezya'da¹ üretilen mayın korumalı araçların aksine, gövde şasiye sürekli olarak sağlam bir şekilde monte edilmemişti. Bunun yerine, şasinin ortasına, her bir ucuna uzunlamasına yerleştirilmiş sessiz blok millerle sabitlenmiş ve sonraki milin kapasitesini sonuna kadar bükmesine izin verilmişti. Aracın yol dışında iyi bir performans göstermesine izin vermesinin yanı sıra, bu özellik aynı zamanda gövdeyi mayın patlamalarından da korumaktadır (Anonim 2020).



Şekil 2.2. İlk mayın korumalı muharebe aracı Spook (Anonim 2005)

2.1.2. Üretilen ilk mayın korumalı tank

İsveç'te Leo 2 A6M veya MBT 122M olarak bilinen Leopard 2 A6M, gövdenin (patlayan tel tetiğine sahip mayınlar gibi) ve patlayarak oluşan nüfuz edici mayınların altında patlayabilecek mayınlara karşı koruma sağlayan gelişmiş bir mayın koruma kiti ile geliştirilmiştir (Hilmes 2008).

¹ Rodezya, 1965'ten 1978'e kadar Afrika'nın güneyinde var olmuş eski devlet.



Şekil 2.3. İlk mayın korumalı tank Leopard 2 A6M (Anonim 2016)

7 Temmuz 2004'te, ilk mayın korumalı Leopard A6M, Almanya'nın Münih kentindeki Krauss-Maffei Wegmann tesislerinde Alman ve İsveç Ordusuna teslim edilmişti. Leopard 2 A6M tankı, Leopard 2 A6 tankının mayın koruma kiti eklenmiş versiyonudur. Mayın koruma kiti, tank tabanının altında yeni bir plaka içeren ek zırh elemanlarından oluşmaktadır. Şubat 2004'teki denemeler, yeni zırh paketi ile Leopard 2 tank mürettebatının, tankın altında bir anti-tank mayının patlamasında herhangi bir yaralanma yaşanmadan yaşayabileceğini göstermişti (British Army 2015).

2.2. Zırh Üretim Çeşitleri

Zırh üretim yöntemleri dört başlık altında incelenmektedir.

2.2.1 Mono blok zırh

Mono blok zırh üretim yönteminde malzeme tek parça halinde çıkarılmaktadır. Bu sebeple gövde ve kule tek parçadır. Mono blok zırh olası harekât anında zırh bütünlüğünü bozabilir ve zırh çatlayabilir.

2.2.2 Çok bloklu zırh

Çok bloklu zırh ardı ardına kaynaklanan zırh bloklarından oluşan kalın bir tabakadır. Birçok katmandan oluştuğu için mühimmatın hasar verme oranını her katmanda düşürmektedir. Bu durum yüksek balistik koruma sağlamaktadır.

2.2.3. Aralıklı çok bloklu zırh

Zırh bloklarının boşluklu şekilde kaynaklanmasıdır. Aralıklı çok bloklu zırhın en büyük avantajı isabet eden mühimmat ilk bloğu deldikten sonra enerjisinin bir kısmını bırakılan boşluklarda kaybeder ve enerji tamamıyla diğer bloğa aktarılmaz. Bu sayede ilk iki metoda göre daha yüksek balistik koruma sağlanır. Bu yöntem en güzel örnek olarak Sovyet T-72 tankı gösterilebilir. Bu tankların zırhı 130 milimetre olmasına rağmen 600 milimetrelik bir bloğun direncine eş değerdir.

2.2.4 Eğimli aralıklı çok bloklu zırh

Belirli bir açı ile blokların boşluklu şekilde kaynaklanması ile oluşturulan zırh üretme yöntemidir. Diğer yöntemlere kıyasla mühimmatın daha uzun bir yol kat etmesi gerekmektedir. Ayrıca eğimli olmasından dolayı mühimmat sekebilir veya ucu kırılabilir. Bu üretim metodlarından herhangi biri birçok farklı parametrenin oranlanması ile seçilmektedir. Bir ülkenin sanayisi, yetişmiş personel kapasitesi, tehdit algılama, harekât ihtiyaçları ve ekonomik koşullar üretim şeklini ortaya çıkartacaktır. Kolay üretim yöntemleri seçilip araçlar üzerine alternatif zırh konuşturmak da bir sağlamlaştırma yöntemidir.

2.3. Zırh Çeşitleri

Zırh çeşitleri üç başlık altında incelenmektedir.

2.3.1. Parçacık kalkanı

Araçların iç kısmına yerleştirilen zırh herhangi bir delinme sonucunda personele ve iç aksama zarar vermemesi için şarapneli engeller. İç kısma yerleştirilen zırhların hafif ve ince olma zorunluluğundan dolayı kompozit tercih edilir.

2.3.2. Sıvı zırh

Sveldolsk araştırma laboratuvarında başarılı bir şekilde denemesi yapılan sıvı zırhın Rus araçlarında kullanıldığı tahmin edilmektedir. Nanoteknoloji kullanılarak üretilen jel iki çelik blok arasında sıvı halde olup mühimmatın teması ile katı hale geçmektedir. Diğer malzemelere göre hafifliği dikkat çekmektedir.

2.3.3. Patlayıcı reaktif zırh

Çelik kutular içerisine yerleştirilen patlayıcıdan oluşan zırh, şasenin dış yüzüne perçinleme metodu ile yerleştirilir. Mühimmatın teması ile aktifleşen patlayıcı karşı yöne doğru patlar ve etkiyi azaltır. Bu zırh kendisinden on kat fazla olan çelik zırh ile aynı dayanımı sağlamaktadır.

2.4. Zırhlı Araçlarda Kullanılan Zırh Malzemeleri

Zırhlı araçlarda kullanılan zırh malzemeleri beş başlık altında incelenmektedir.

2.4.1. Zırh çeliği

Eski adıyla MIL-A-12560 yeni adıyla ile MIL-A-46177 standardında ve Brinell 380 metodu ile üretilmiş 230 milimetre kalınlığındaki haddelenmiş çeliğin (yoğunluğu 7,8 ton/mm³) dayanıklılığı NATO tarafından referans kabul edilmektedir. Daha yüksek dayanım için Brinell 500 ve Brinell 600 yöntemi tercih edilmektedir. Kara araçlarının zırhlandırılmasında genel olarak dışa sert içe yumuşak çelik uygulanmasıdır. Böylece

ilk yüzey direnci alır ikinci yüzey enerjiyi emer. Açığa çıkan enerji daha az hasar verir (Anonim 2018a).

2.4.2. Alüminyum

Genel olarak 7020 ve AZ5G balistik koruma için kullanılan alüminyum çeşididir. Alüminyum çeliğe göre hafif olup birleştirme işlemi çabuk gerçekleşmektedir. Alüminyum kullanılan araçlarda ayrıca iskelet yapısına gerek duyulmaz. Alüminyumun yoğunluğunun düşük olmasının yanında iskelet yapısına gerek duyulmaması aracın hafiflemesini sağlayan büyük bir faktördür. Alüminyum ile üretilen araçlar ek zırhlar ile donatılır (Anonim 2018a).

2.4.3. Titanyum

Titanyum, zırhlı araçların tamamında kullanılmak yerine kısmi olarak kullanımı tercih edilmektedir. Yüksek sertliğe sahip olan titanyum çeliğe göre daha hafiftir. TA6V olarak isimlendirilen titanyum, çelik zırhtan 1,5 kat daha dayanıklı olmasına rağmen çok daha pahalıdır (Anonim 2018a).

2.4.4. Zayıflatılmış uranyum

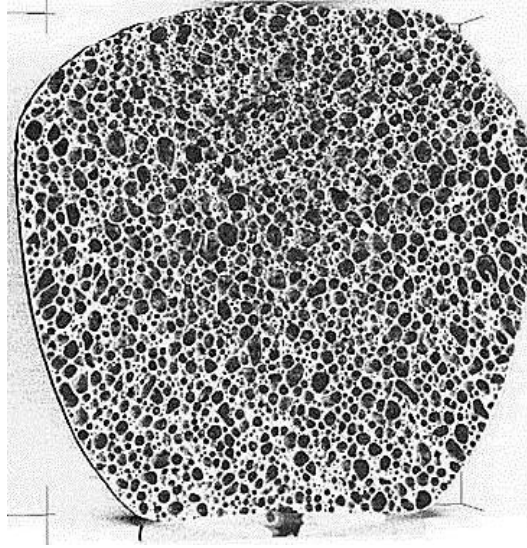
Zırh üretiminde 238 izotopu kullanılan uranyum zenginleştirilme işleminden arta kalan malzemedir. Uranyum 18,5 ton/mm³ yoğunluğa sahip ağır bir malzemedir. Alev alması ve radyasyon yaymasından dolayı kullanımı tercih edilmemektedir (Anonim 2018a).

2.4.5. Kompozit

İlk kompozit lamine zırh uygulamasında çukur imlali mühimmatların zırha nüfuzu sırasında enerjiyi geri yansıtan cam eriyiğin bütünlüğü bozulur. Bütünlüğü bozulan cam eriyik dağılarak katılaşır. Katılaştıran eriyiğin sayesinde dayanım 2,5 kat artar. Cam elyaf haricinde kullanılan naylon, kauçuk, teflon, poliüretan, Al₂O₃, TiB₂, SiC, B₄C gibi malzemelerin kullanımı da yaygındır (Anonim 2018a).

2.5. Metalik Köpükler

Metalik köpükler, metal veya metal alaşımlı matris içinde yüksek gözenek hacmi içeren bir malzeme sınıfıdır. Metalik köpük malzemeler düşük yoğunluğa sahip olmaları sayesinde çok hafiftirler. Bununla birlikte mekanik özellikler açısından iyi performans gösterirler.



Şekil 2.4. Metalik köpük kesiti (Adams 2013)

2.5.1. Metalik köpüklerin tarihçesi

Metalik köpüklerle ilgili ilk çalışma 1948 yılına dayanmaktadır. Bu çalışmada Sosnik, alüminyum içerisinden cıva buharlaştırarak köpük elde etmeyi denemiştir. Sosnik, alüminyum ve cıva karışımını kapalı bir kaptaki yüksek basınç altında eritti. Yüksek basınç kaldırılınca cıva, alüminyumun erime ısısında buharlaştı. Böylece köpük oluştu. 1950'lerde sıvı metallerin, önceden akışmazlıklarını arttırıcı işlemlerden geçirildiklerinde çok daha kolay köpükleştirilebilecekleri anlaşıldı. Bu sayede daha tehlikesiz işlemler gerçekleştirilmeye başlandı. 1950'lerin sonlarında, William Elliot ve Stuard Fiedler, Amerika Birleşik Devletleri Donanması için bir alüminyum köpükleştirme işlemi gerçekleştirdiler. Bu çalışmanın ardından yaklaşık 10x20x0,25 santimetre büyüklüğünde paneller üretecek bir pilot fabrika kuruldu. Bu süreçte arabalar için ezilen tampon yapımı gibi, alüminyum köpüklerin olası kullanımları da araştırıldı.

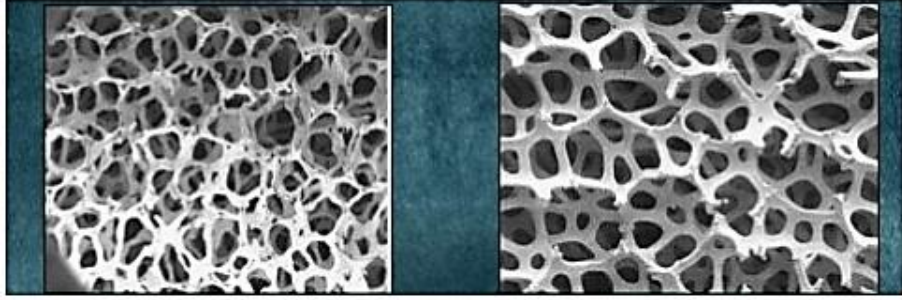
Ayrıca kurşun ve çinko gibi başka metalleri köpükleştirme yöntemleri üzerine araştırmalar uzun yıllar boyunca sürdürüldü. İlk yıllarda günümüzde de kullanılan ergimiş maddeye sürekli gaz püskürtme ve ergimiş kütleyle plastik köpük endüstrisindeki şişirici maddelere (kabartma tozuna) benzeyen gaz çıkaran yakıtlar eklenmesi yöntemleri kullanıldı. Yapılan çalışmalar sonrasında o yıllarda alüminyumun köpük üretimi için çok uygun bir malzeme olduğu anlaşıldı. 1972 yılında Ethyl şirketi, dikkate değer ölçüde yüksek kaliteli alüminyum köpük üreterek değerlendirme yapması için Ford Motor Şirketi'ne verdi. Ancak bu girişimlerin hepsi başarısızlıkla sonuçlandı. Bu başarısızlıkların temel nedeni o dönemde enerji kaynakları sınırsızmış gibi görülmekteydi. Bu görüşten dolayı 1970li yıllar hafif malzemeler için uygun bir zaman değildi. Güvenlik ve geri dönüşüm gibi konular da bugünkü kadar önemsenmiyordu. 1975 yılından sonra metalik köpük araştırma ve geliştirme çalışmalarının sayısı azaldı. 1980'lerin sonlarında ise metalik köpük araştırmaları tüm Dünyada yeniden canlılık kazandı. Shinko Wire şirketindeki Japon mühendisler bugün "Alporas işlemi" olarak bilinen işleme yöntemini geliştirdiler. Norveç'teki Norsk Hydro ve Kanada'daki Alcan şirketleri, birbirinden ayrı olarak parçacıkları stabilize edilmiş eriyikler için bir köpükleştirme işlemi geliştirdiler. 1990 yılında Alman fizikçi Joachim Baumeister, 1950'lerin sonunda United Aircraft Şirketi'nden Benjamin Allen'in geliştirdiği sıkıştırılmış toz köpükleştirme işlemi yeniden keşfetti. İlk etapta sıkıştırılan sonra yeniden ergitilerek köpükleştirilen toz karışımlarının kullanıldığı bu yöntem, Almanya'daki Fraunhofer Enstitüsü'nde daha da geliştirildi. Tüm bu işlemler ve başka çalışmalar, sürekli geliştirilip iyileştirilerek günümüze kadar geldi (Degischer ve Kriszt 2002).

2.5.2. Metalik köpüklerin sınıflandırılması

Metalik köpükleri açık hücreli ve kapalı hücreli olarak sınıflandırmak mümkündür.

Metal sünger olarak da adlandırılan açık hücreli köpük metal, ısı eşanjörlerinde (kompakt elektronik soğutma, kriyojen tankları, PCM ısı değiştiriciler), enerji emilimi, akış difüzyonu ve hafif optiklerde kullanılabilir. Malzemenin yüksek maliyetli olmasından dolayı genellikle kullanımı ileri teknoloji ve havacılık ile sınırlanmaktadır

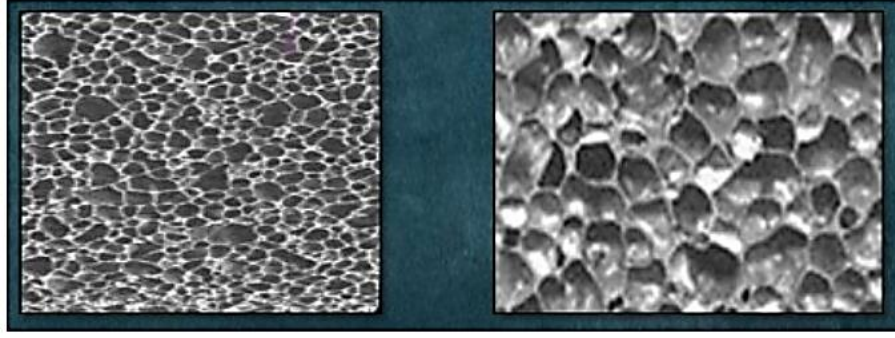
(Banhart 2001). İnce ölçekli açık hücreli köpükler kimya endüstrisinde yüksek sıcaklık filtreleri olarak kullanılır. Metal sünger, birim ağırlık başına çok geniş bir yüzey alanına sahiptir. Çoğunlukla paladyum siyahı, platin süngeri ve süngerimsi nikel gibi metal sünger içinde katalizörler oluşur. Osmiyum ve paladyum hidrit gibi metaller metaforik olarak “metal süngerler” olarak adlandırılırlar. Fakat bu terim fiziksel yapıdan ziyade hidrojen bağlama özelliklerine değinmektedir.



Şekil 2.5. Açık hücreli metalik köpük yapısı (Anonim 2018b)

Kapalı hücreli metalik köpük ilk olarak 1926 yılında Meller tarafından, hafif metallerin inert gaz enjeksiyonu veya şişirici madde ile köpükleştirildiği bir Fransız patentinde bildirilmiştir. Sünger benzeri metal üzerine iki patent 1948 ve 1951 yıllarında sıvı alüminyum üflemek için cıva buharı uygulayan Benjamin Sosnik’e verilmiştir. Kapalı hücreli metalik köpükler 1956’da John C. Elliott tarafından geliştirildi. İlk prototipler 1950’lerde mevcut olmasına rağmen ticari üretime 1990’larda Japonya’daki Shinko Wire şirketi tarafından başlandı (Anonim, 2020b).

Kapalı hücreli metalik köpükler bir bisiklet kaskı içindeki polimer köpüklere benzemektedir. Ancak daha yüksek darbe yükleri için darbe emici bir malzeme olarak kullanılırlar. Birçok polimer köpüğünden farklı olarak metalik köpükler darbe sonrası deforme olur ve eski şekillerine geri dönmezler. Bu nedenle sadece bir kez deforme olabilirler. Kapalı hücreli metalik köpükler hafiftirler, serttirler ve sıklıkla hafif bir yapısal malzeme olarak önerilmektedirler. Ancak bu amaç için yaygın olarak kullanılmamıştır. Kapalı hücreli köpükler diğer metalik köpüklerin yangına karşı dayanıklılığını ve geri dönüşüm potansiyelini korurlar. Ayrıca sudaki yüzdürme özelliğini de eklerler.



Şekil 2.6. Kapalı hücreli metalik köpük yapısı (Anonim 2018b)

2.5.3. Metalik köpüklerin üretim yöntemleri

Metalik eriyikler sıvı içerisinde gaz baloncukları oluşturarak köpükleştirilebilirler. Metalik eriyikteki bu gaz baloncukları, yüksek yoğunluğa sahip sıvıda yüksek kaldırma kuvveti nedeniyle yüzeye yükselme eğilimindedirler. Bunun olmasını önlemek için, erimiş metalin viskozitesinin artırılması gerekmektedir. Bu işlem, eriyikte dengeleyici parçacıklar oluşturmak için ince seramik tozlar veya alaşım elementleri eklenerek yapılabilir. Metalik eriyikleri köpükleştirmenin üç yolu aşağıda listelenmiştir:

- Sıvı metale harici bir kaynaktan gaz enjekte etmek,
- Sıvıda henüz çözünmüş olan gazın çökmesine neden olmak,
- Gaz salınan üfleme maddelerini eriyiğe karıştırarak sıvıda yerinde gaz oluşumuna neden olma.

Gaz enjeksiyonu kullanılarak metalik eriyiklerin köpüklenmesi yönteminde silikon karbit, alüminyum oksit ve magnezyum oksit partikülleri eriyiğin viskozitesini arttırmak için kullanılabilir. Karışım teknikleri, partiküllerin eriyik boyunca eşit dağılımını sağlamak için tutarlı olmalıdır. Eriyik daha sonra, dönen çarklar veya titreşimli ağızlıklar kullanılarak içine hava, azot ve argon enjekte edilerek köpürtülür (Banhart 2000).

Üfleme aracılığıyla eriyiğin köpükleştirilmesi yönteminde eriyikleri direkt olarak köpükleştirmek için eriyiğin içerisine gaz enjekte etmek yerine üfleyci bir araç eklenir. Hidritler veya karbonatlar gibi bileşikler kullanılarak eriyik içine gaz verilir. Bileşik, bir sıvı metal veya yarı katı topakta ısıtıldığında ayrışma ve gaz kabarcıkları oluşturma

eğilimindedir. Gözenekli metallerin eşit gözenek boyutlarına ve yoğunluklarına sahip olmaları için elde edilen köpüğün kararlı olması gerekmektedir. Üfleme aracılığıyla eriyiğin köpükleştirilmesi yönteminde 680°C'de (1256F°) bir alüminyum eriyiğine ağırlıkça yaklaşık %1,5 kalsiyum metal eklenir. Eriyik iyice karıştırılır. Kalsiyum oksit, kalsiyum alüminyum oksit veya Al_4Ca ara metallerin oluşumuna bağlı olarak viskozite artmaya başlar. Bu, sıvı metalin kalınlaşmasına yardımcı olur. Viskozite istenen değere ulaştığında, sıcak viskoz sıvıda hidrojen gazının salınması için bir üfleme maddesi olarak titanyum hidrit eklenir. Eriyik daha sonra yavaş yavaş ve kademeli olarak genişlemeye başlar ve köpük kabını doldurur. Köpükleştirme sabit basınçta gerçekleşmelidir. Kap, alaşımın erime noktasının altına soğutulduğunda, sıvı köpük katı alüminyum köpüğe dönüşür ve daha ileri işlemler için kalıptan çıkarılabilir (Banhart 2000).

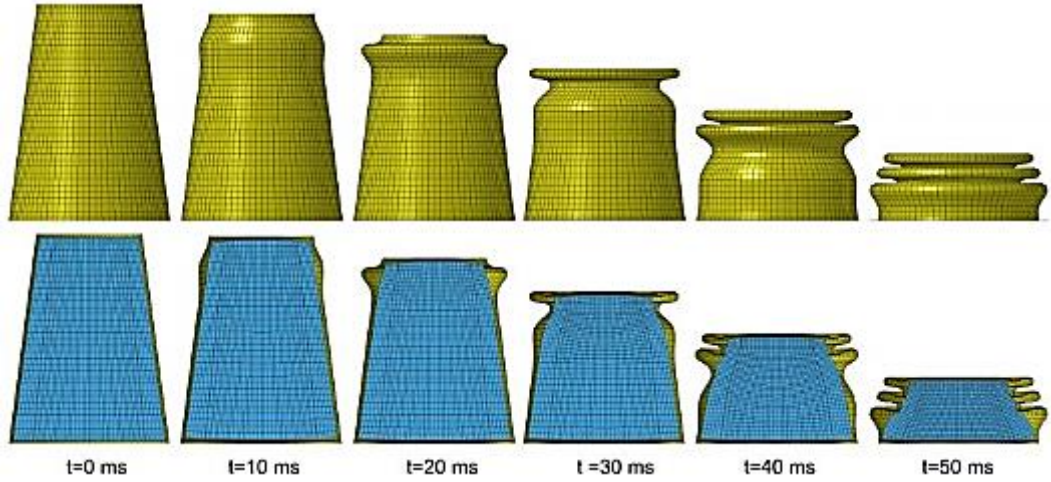
Katı-gaz ötektik katılaşması yönteminde katı gaz ötektik katılaşmasının oluşturduğu gözenekli malzemelere "gaz takviyeli" anlamına gelen "gasar" denir. Bazı sıvı metallerin hidrojen gazı ile ötektik bir sistem oluşturduğu bilinen bir gerçektir. Bu metallerden biri hidrojen atmosferinde 50 atmosfer basınca kadar yüksek basınç altında eritildiğinde elde edilen eriyik homojendir ve hidrojen ile yüklenir. Eriyik, sıcaklık düşürüldüğünde heterojen bir katı gaz sistemine ötektik bir geçişe sahip olur. Katı gaz sistemi ötektik bir konsantrasyona sahip olmalıdır ve daha sonra belirli bir sıcaklıkta bir ayrışma reaksiyonu meydana gelecektir. Eriyik, gaz gözeneklerinin çökmesine ve metale sıkışmasına neden olacak şekilde katılaşmaya başlar. Çoğunlukla katılaşma yönünde yönlendirilmiş olan uzun gözenekler oluşur (Banhart 2000).

2.5.4. Metalik köpüklerin kullanım alanları

Metalik köpükler birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

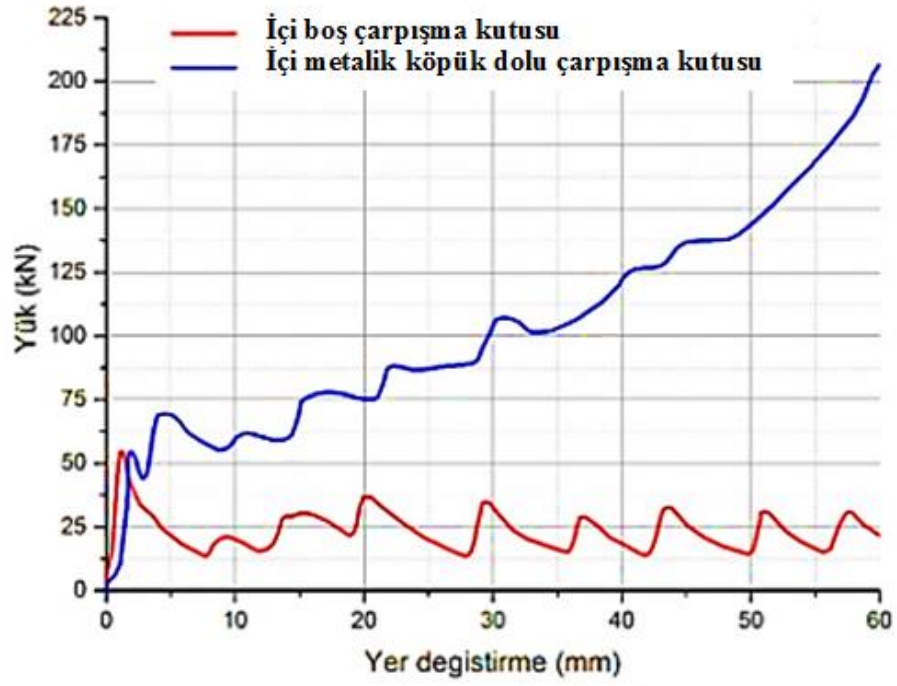
Metalik köpükler ağırlığının hafif olmasından ve sesi çok iyi seviyede yalıtmasından dolayı otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Bir otomobilin hafif olması yakıt tasarrufu ve kolay ivme kazanabilmesi açısından önemlidir. Ayrıca yüksek hızda seyir halinde oluşan sesin emilmesinde de önemli rol oynamaktadırlar. Darbeleri emme gücünün

yüksek olması da otomotiv sektöründe kullanılmasının en önemli nedenlerindedir. Bu özelliklerinden dolayı özellikle otomotiv sanayisinde araçlardaki çarpışma emicilerde kullanılmaktadır. Bunun sonucunda çarpışma kutuları geliştirilmiştir. Çarpışma kutuları araçlarda darbe tamponuyla ön korkuluk arasında yer almaktadır.



Şekil 2.7. İçi metalik köpük dolu çarpışma kutularının analiz görüntüleri (Anonim 2018b)

Şekil 2.7'de içi metalik köpük dolu çarpışma kutularının çarpışma anını simüle eden analiz görüntüleri yer almaktadır. Şekil 2.8'de ise aynı çarpışma kutusunun hem içi boş modeli hem de içi metalik köpük dolu modeli arasında karşılaştırma yapılmıştır. Açıkça görüldüğü gibi aynı yer değiştirmenin yakalanabilmesi için içi metalik köpük dolu çarpışma kutusuna daha fazla kuvvet uygulanması gerekmektedir. Bu durum metalik köpüğün enerji emme kabiliyetinin yüksek olduğunu göstermektedir.



şekil 2.8. İçi boş ve metalik köpük dolu çarpışma kutularının yer değiştirme karşılaştırması (Anonim 2018b)

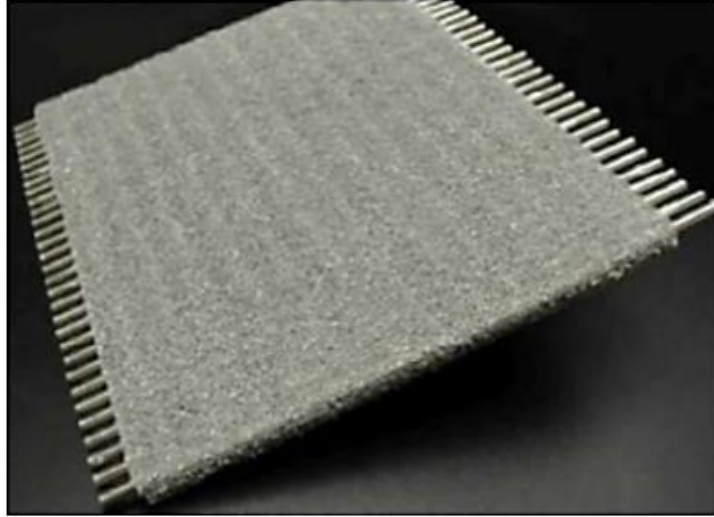
Enerji emme kabiliyetinin yüksek olmasından dolayı metalik köpükler uzay sanayisinde uzay araçları iniş takımlarında, uçak gövde ve helikopter kuyruklarında kullanılmaktadır. şekil 2.9’da sandviç köpük panelden yapılmış bir roket konisi görülmektedir.



şekil 2.9. Sandviç köpük panelden yapılmış bir roket konisi (Anonim 2018b)

Hafif ağırlığa sahip yapılar gemi inşa sektöründe büyük bir yere sahiptir. Köpük metallerin gemi uygulamaları ambar platformları, gemi bölmeleri, anten platformları ve fişek ambarları gibi alanları kapsamaktadır.

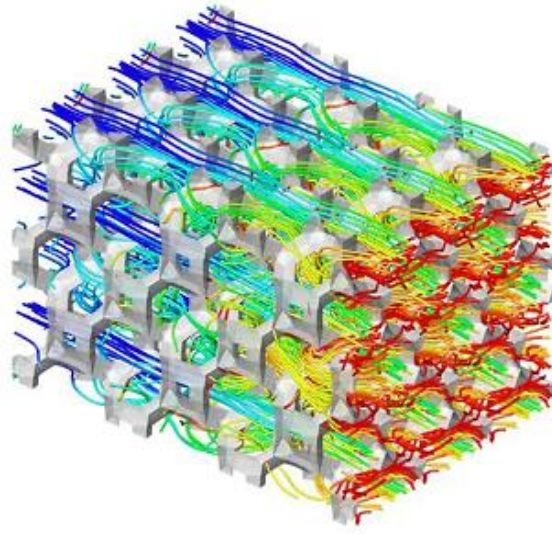
Yüksek binaların inşa edilmesi ile çok hızlı modern asansörler de üretilmeye başlanmıştır. Asansörlerin istenilen hıza ulaşabilmesi için yeterince hafif olması gerekmektedir. Hafiflik aynı zamanda enerji tüketimini de azalmaktadır. Metalik köpük ve köpük paneller hafiflikleri ile asansörlerin enerji tüketimlerini azaltmak için oldukça yardımcı olmaktadır. Bununla beraber yangın duvarları ve çıkışları zayıf termal iletkenliği ve yangın direnci olan metalik köpük malzemelerle yapılmaktadır.



Şekil 2.10. Gelişmiş yüksek sıcaklık radyatörü (Anonim 2018b)

Spor teçhizatları sektör itibariyle yüksek sayılabilecek maliyetlerine rağmen uygulamaya değer alanlar bulmuştur. İyi enerji emiliminden dolayı metalik köpükler futbolcular için kaval kemiği koruyucuları (tekmelik) yapımında kullanılabilir.

Korozyon direnci, yüksek termal iletkenliği gibi özelliklerinden dolayı açık hücreli alüminyum ve bakır bazlı köpük metalleri ısı değiştirici olarak kullanılabilirler. Düşük termal iletkenliklerinden dolayı kapalı hücreli köpük metalleri ise termal kalkan olarak kullanılırlar. Termal kalkan uygulamasına bilgisayar çipleri ile güç elektroniği için mikro elektronik cihazlar ve yekpare soğutma radyatörleri örnek verilebilir. Şekil 2.10'da metal köpük matrisi içine gömülmüş tüplerden oluşturulan gelişmiş yüksek sıcaklık radyatörü görülmektedir.



Şekil 2.11. Köpük metalde gerçekleşen ısı transferi (Anonim 2018b)

2.6. Balistik Jel

Balistik jel, mermi yaralarının etkilerinin simüle edilebildiği domuz kas dokusu (bu da insan kas dokusu ile karşılaştırılabilir) ile bilimsel olarak ilişkilendirilmiş bir test aracıdır. Yara balistikleri alanındaki Martin Fackler ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve iyileştirilmiştir (Fackler MD. ve ark. 1989). Balistik jel, su içindeki bir jel tozu çözeltisidir. Balistik jel, insan ve hayvan kas dokusunun yoğunluğunu ve viskozitesini yakından simüle eder ve ateşli silahlar mühimmatının terminal performansını test etmek için standart bir araç olarak kullanılır. Balistik jel, kasların gerilme mukavemetini veya cilt ve kemik gibi vücut yapılarını modellemese de, bir doku yaklaşımı olarak oldukça iyi çalışır ve çoğu balistik test için benzer performans sağlar. Ancak çok düşük hız mermileri için bir model olarak yararlılığı sınırlandırılabilir. Balistik jel, terminal balistiklerin tutarlı ve güvenilir bir şekilde karşılaştırılmasına izin veren jelin özelliklerini dikkatle kontrol etme kabiliyeti nedeniyle gerçek kas dokusu yerine kullanılır.

2.6.1. Balistik jel hazırlama

En yaygın olarak kullanılan formül, 1 pay 250A bloom jeli 9 pay ılık suya (kütle olarak) eritip, toz haline getirilmiş jelin içine dökülürken suyu karıştırarak hazırlanan bir %10

balistik jeldir. Bu karışım 4°C'ye (39°F) soğutulur. Eski NATO formülü, 10°C'ye (50°F) kadar soğutulmuş %20'lik bir çözelti belirtir, ancak jel miktarının iki katı kullandığından bu çözeltinin hazırlanması daha pahalıdır. Her iki durumda da, Martin Fackler tarafından yapılan 1988 tarihli bir araştırma makalesinde suyun 40°C'nin (104°F) üzerine ısıtılmaması önerilmektedir, çünkü bu durum balistik performansta önemli bir değişikliğe neden olabilir (Fackler ve Malinowski 1988).

Doğru sonuçlar elde etmek için, kullanımdan hemen önce jel bloğu, bir hava tabancasından standart bir 177 kalibrelik (4,5 mm) çelik BB'nin jele bir tabanca kronografı üzerine ateşlenmesi ve ölçülen penetrasyon derinliği ile "kalibre edilir". Kesin kalibrasyon yöntemleri biraz farklılık gösterse de, INS Ulusal Ateşli Silahlar Birimi tarafından kullanılan kalibrasyon yöntemi oldukça tipiktir. Kalibrasyon 183 ± 3 m/s (600 ± 10 f/s) hız ve 8,3 ile 9,5 cm (3,25 ila 3,75 inç) arasında bir BB penetrasyonu gerektirir (Fackler ve Malinowski 1988).

Doğal jelden yapılan balistik jeller tipik olarak açık sarı-kahverengi renktedir ve genellikle tekrar kullanılamazlar. Daha pahalı sentetik ikameler, başlangıçta renksiz ve berrakken, doğal jelin balistik özelliklerini simüle etmek için tasarlanmıştır. Bazı sentetik jeller de yeniden kullanılabilir, çünkü jellerin balistik özelliklerini etkilemeden eritilip yeniden biçimlendirilebilirler.

2.6.2. Balistik jel kullanım alanları

Balistik jel, kas dokusu ile karşılaştırıldığında kas dokusunun özelliklerini taklit ettiğinden (Breeze ve ark. 2013), içi boş nokta ve yumuşak nokta mermileri gibi farklı genişleyen mühimmatın terminal performansını karşılaştırmak için tercih edilen araçtır. Bu mermiler, penetrasyonu sınırlandıran ve yol boyunca doku hasarını artıran, çapın genişlemesi için dokunun veya jelin hidrolik basıncını kullanır. Lahey Kongresi bu tür mühimmatın savaşta kullanımını kısıtlasa da polis ve siviller tarafından savunma silahlarının yanı sıra ikincil zararı azaltmak için gerekli olan hedefin hızlı bir şekilde etkisiz hale getirilmesi ve fazla penetrasyonun asgari riskli olduğu durumlarda polis keskin nişancı ve rehine kurtarma ekipleri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.7. Mayınlar

Mayın, çeşitli metotlarla toprak altına, üstüne veya su içine yerleştirilen veya atılan; harp araçlarını, tankları ve gemileri tahrip etmek, personeli öldürmek amacıyla üretilmiş, genellikle bir kap içine yerleştirilmiş şiddetli patlayıcı maddedir. Mayınlar üzerinden geçilmesi halinde, zaman ayarlı olarak veya uzaktan kontrol araçları ile patlatılabilir. Günümüzün savaşlarında gerek saldırı ve gerekse savunma harekâtında, engellerin özellikle mayınların kullanılması son derece önem kazanmıştır. Mayınlar, düşmanın ilerlemesini geciktirmek veya sınırlandırmak için yapılmıştır. Bir mayının asıl görevi başarıya yardım etmek olup, zayıf verdirici tesiri ikinci derecede kalır.

2.7.1 Mayının icadı

İlk kara mayınları, Birinci Dünya Savaşında Almanlar tarafından top mermilerinin toprak altına gömülmesi suretiyle İngiliz tanklarına karşı kullanıldı. Mayınların esas gelişimi, İkinci Dünya Savaşı sırasında. Düşman silahlı kuvvetlerini durdurmak, geciktirmek veya taciz etmek için ilk mayın tarlaları döşendi. Tank zayıfatının %20'si mayınlar sebebiyle oldu. Amerika, Rusya, İngiltere, Almanya gibi devletler daha mükemmel mayın imal etme hususunda birbirleriyle yarıştılar. Bunun sonucunda, ağır ve hafif tanklara veya insanlara karşı kullanılabilen çeşitli basınçlara göre infilak edebilen mayınlar imal edildi.

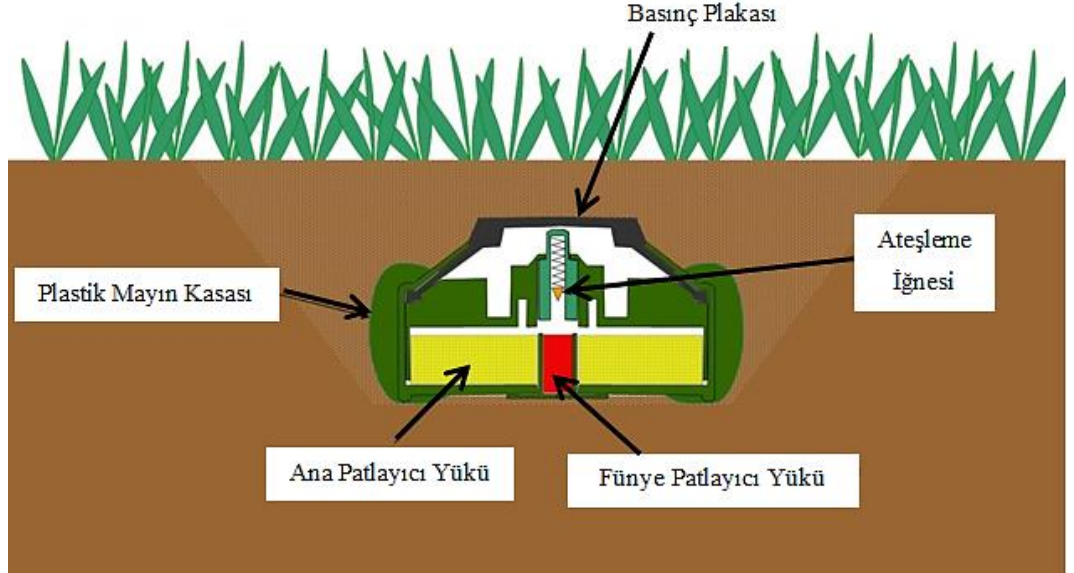
2.7.2. Mayın türleri

Mayınlar anti-personel mayını ve tanksavar mayını olmak üzere iki grupta değerlendirilebilirler.

Anti-personel mayını, kara mayını sınıfı içerisinde tanksavar mayını gibi taşıtlara karşı kullanılan türün dışındaki canlı insan hedeflerine karşı geliştirilmiş bir mayın türüdür. Bu tür mayınlar genellikle öldürmemek üzere geliştirilmiştir, yaralama amacı taşımaktadır. Bunun nedeni yaralı bir askerin ölü bir askere göre daha fazla lojistik özellikle sağlık desteğine ihtiyaç duyması ve kendinden başka askeri de savaş dışına

itmesidir. Bazı anti-personel mayınları insan haricinde zırhlı taşıtların özellikle tekerlek kısmında hasar vererek iş göremez hale getirebilmektedir. Başlıca türleri şunlardır:

- Dağılan ve kazıklı mayın
- Boşluklu imla haklı mayın
- Parça tesirli yönsel mayın
- Basınç mayını
- Sıçrayan mayın
- Napalm mayını
- Kimyasal mayın



Şekil 2.12. Anti-personel mayın kesiti (Bisyk ve ark. 2019)

Tanksavar mayını, bir tür kara mayını olup tank ve zırhlı savaş araçlarına hasar vermek veya imha etmek amacıyla geliştirilmiştir. Anti-personel mayınlarına göre tanksavar mayınları çok daha fazla patlayıcıya sahiptir. Ateşlenmesi için ise bir aracın ona değmesi gerekmektedir. Tanksavar mayınlarının etkisi hedef büyük olduğundan daha fazla olmaktadır. Yapımında baş edilmesi gereken tankın büyüklüğü, hareket yetenekleri, zırh kalınlığı gibi özellikleri göz önüne alınır. Ateşleme düzeneği anti-personel mayınlarına çok benzer ve basınç tesirli olarak patlarlar. Askerler bu tür mayınları patlatmaya yetecek kadar baskıyı yaratamaz çünkü bir tankın ağırlığıyla karşılaştırıldığında insanlar çok hafif kalmaktadır. Bu tür mayınların patlaması için 200

kilogramlık bir basınç gerekebilir. Bazen anti-personel mayınları da bu mayınların tetikleyicisi görevini üstlenebilir. Amacı üstünden geçen tankın zırhını delmek, yırtmak ya da koparmaktır. Bunu da yarattığı yüksek basınç ve ısıyla yapar. Başlıca türleri şunlardır:

- Tahripli
- Boşluklu imla haklı
- Çubuk tipi
- Yandan saldırı
- Arazi

2.8. Patlama Türleri

Patlama, ani enerji salınımının yol açtığı bir basınç bozukluğudur (Dusenberry 2010). Oluşan basınç patlama merkezinden şok basıncı veya patlama dalgası denilen bir dalga şeklinde hareket eder. Yüksek patlayıcılar tarafından oluşan süpersonik (ses üstü) patlamalar süpersonik şok dalgaları ile ilerler. Bu patlamalar infilak olarak bilinirler. Ses altı patlamalar “Parlama” olarak bilinen daha yavaş bir yanma süreci sayesinde düşük patlayıcılar tarafından oluşturulur. Patlamaların kaynağı fiziksel, kimyasal veya nükleer olabilir. Fiziksel patlamalar, sıkıştırılmış bir gaz silindirin ani bir bozukluğunu ve iki sıvının farklı sıcaklıklarla karıştırılmasını içerir. Kimyasal patlamalar, yakıtın hızlı oksidasyonu gibi iki malzeme arasındaki reaksiyonun neden olduğu hızlı enerji salımı olabilir. Bazı malzemelerin reaksiyona girmesi ve enerjiyi salması için bir şoka ihtiyacı vardır. Nükleer patlama en tehlikeli patlamadır ve bir maddenin çekirdeğinin içindeki protonların ve nötronların yeniden dağıtılmasıyla yeni çekirdeklerin oluşumundan kaynaklanmaktadır. Patlayıcılar, patlayıcı yükünün hapsedilmesine bağlı olarak serbest ve kapalı patlamalar olarak sınıflandırılabilir (US Department of Defense 2008).

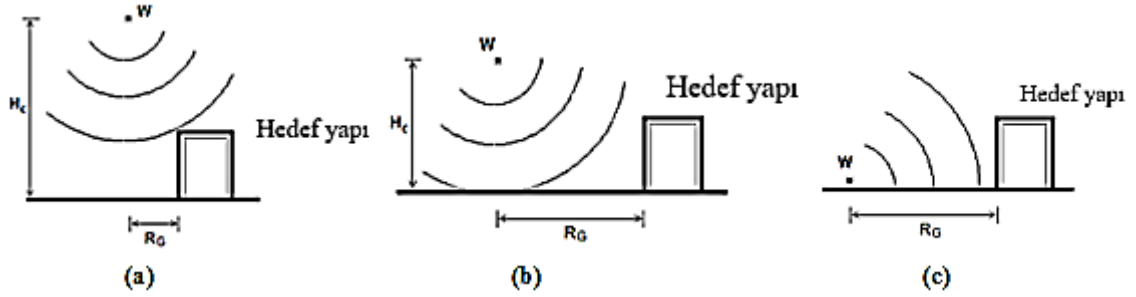
2.8.1 Serbest patlamalar

Bu grupta şok dalgası yapıya direkt olarak yansımali veya yansıma olmadan ve güçlenerek ulaşır. Serbest patlamalar üç gruba ayrılırlar.

Serbest hava paralanma patlamalarında patlama binanın yukarısında gerçekleşir. Böylece patlama dalgası patlama merkezinden yayılır ve ilk şok dalgasının yansıması ve büyümesi olmadan yapıyı doğrudan vurur (Şekil 2.13.a).

Hava paralanma patlamalarında patlama binanın üzerinde gerçekleşir. Böylece oluşan şok dalgası yer yüzeyine ulaşır ve yapıya ulaşmadan önce yansır (Şekil 2.13.b).

Yüzey paralanma patlamalarında patlama zeminde veya bina yakınında meydana gelir. Böylece oluşan şok dalgası yapıya ulaşmak için yansıyan dalga ile birleşir, güçlenir ve yansır (Şekil 2.13.c).



Şekil 2.13. Serbest patlamalar; (a)serbest hava paralanma patlamaları, (b) Hava paralanma patlamaları, (c) Yüzey paralanma patlamaları (Karlos ve Solomon 2013)

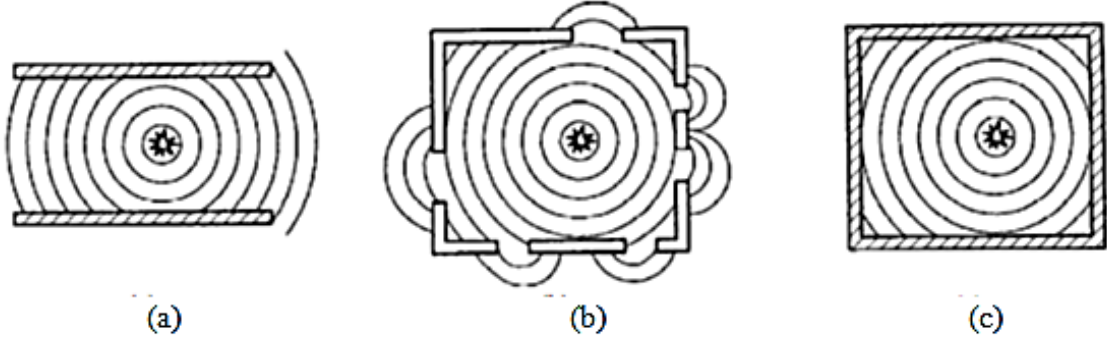
2.8.2 Kapalı patlamalar

Bu grupta, patlayıcı tamamen veya kısmen kapalı bir yapının içinde patlar. Yapının iç yüzeyleri oluşan şok dalgasını birçok kez yansıtır. Yansıyan şok dalgalarının genlikleri birleşerek güçlenir. Böylece basıncın değeri daha yüksek değerlere çıkar. Kapalı patlamalar üç gruba ayrılırlar (Kocaz ve ark. 2008).

Tamamen havalandırılmış bir patlamada, patlayıcı yük bir veya daha fazla açık yüzeye sahip bir yapıda patlar. İlk şok dalgası kapalı yüzeyler tarafından yansıtılır, güçlendirilir ve açık yüzeylerden atmosfere açılır (Şekil 2.14.a).

Kısmen kapalı bir patlamada, patlayıcı yük sınırlı boyutta açıklıkları olan bir yapıda patlar. İlk dalga, yüzeyler tarafından büyütülür ve bir süre sonra açıklıklardan atmosfere açılır (Şekil 2.14.b).

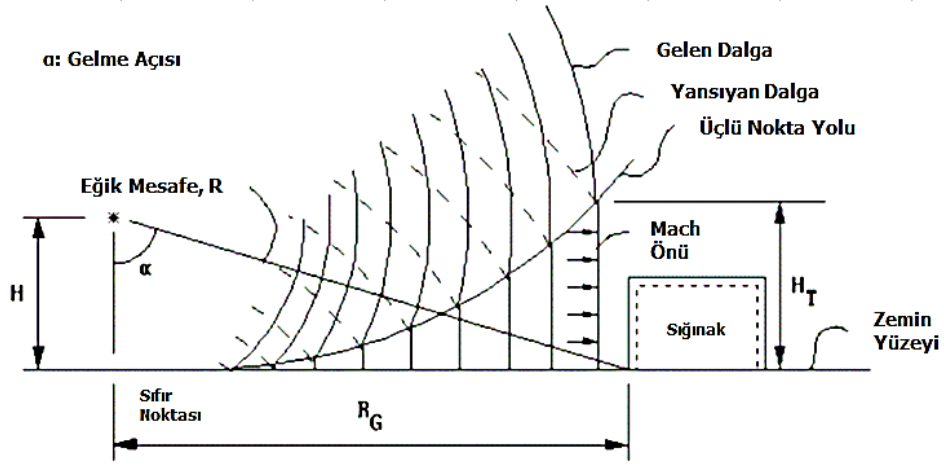
Tamamen kapalı patlamada, patlayıcı yük tamamen kapalı veya neredeyse tamamen kapalı bir yapıda patlar (Şekil 2.14.c).



Şekil 2.14. Kapalı patlamalar; (a) Tamamen havalandırılmış patlamalar, (b) Kısmen kapalı patlamalar, (c) Tamamen kapalı patlamalar (Janssen 2009)

2.9. Şok Dalgaları

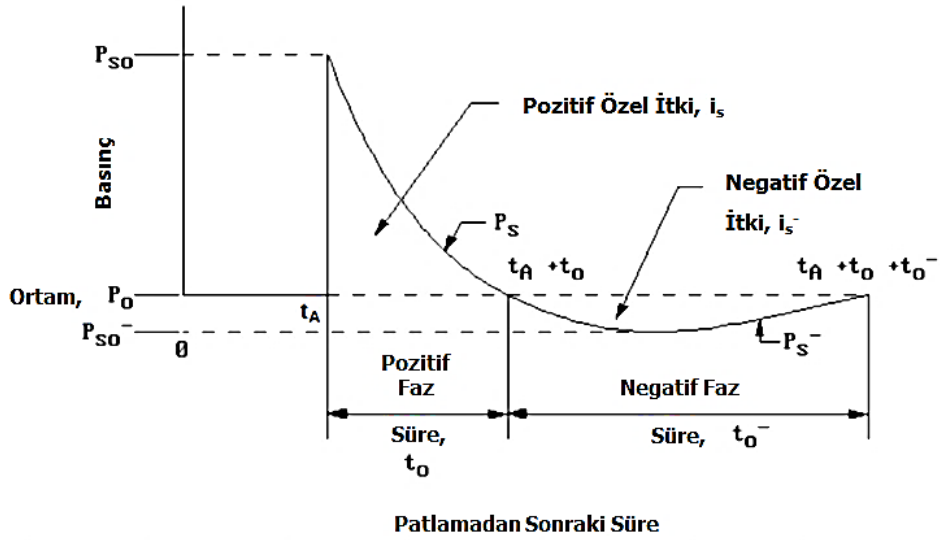
Patlayıcı yükünün patlamasından oluşan enerjinin hızlı salınımı ortamda ani bir basınç artışına neden olur. Bu basınç artışı, havada radyal olarak şok dalgası denilen bir dalga şekline dönüşür. Şok dalgası, maksimum basınçla ses hızından daha büyük bir hızda patlama merkezinden uzaklaşır. Maksimum basınca aşırı basınç denir. Basınç dalgaları bir engelle karşı karşıya geldiğinde, ilk değerlerinden daha yüksek bir genlikle yansır. Yansıma patlamanın gücünün ve şok dalgasının geliş açısının bir fonksiyonudur (Marchand ve Alfawakhiri 2004). Hava patlamasının bir yapıyla olan etkileşimi Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Hava patlamasının bir yapıyla etkileşimi (Karlos ve Solomon 2013)

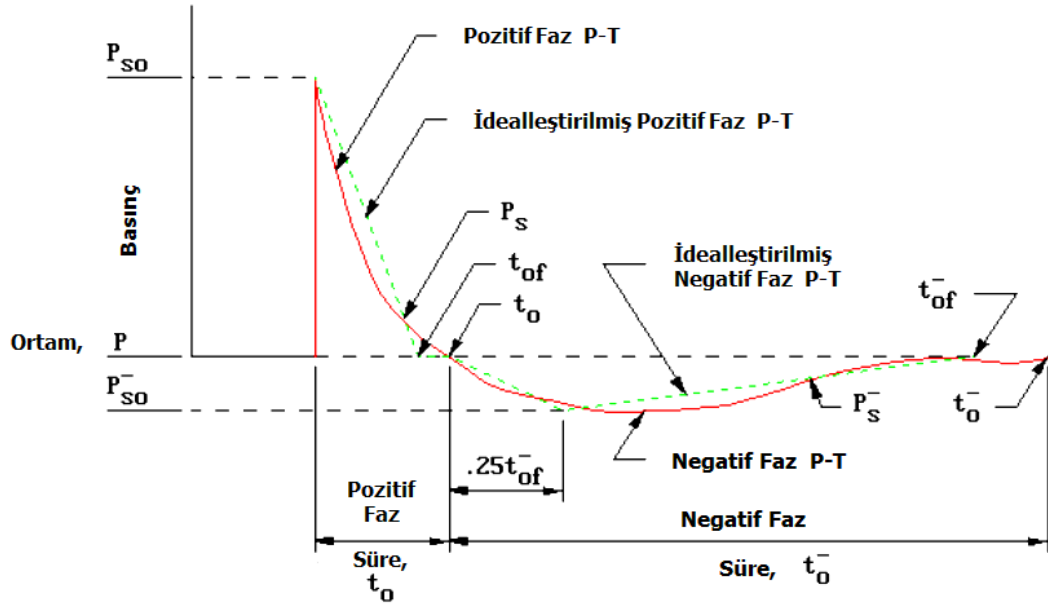
Patlama dalgasının önü, patlamanın ortasından uzaklaştıkça, hızı ses hızının altına düşene kadar zayıflar. Patlama merkezinden uzakta herhangi bir noktada, şok dalgası önü maksimum aşırı basınç (P_{so}) ile o noktaya (t_A) zamanında ulaşır. Daha sonra basınç t_o süresi boyunca pozitif fazda ortam atmosfer basıncına ulaşmak için düşer. Pozitif fazı, emme dalgası şeklinde maksimum bir negatif basınç (P_{so}^-) ile pozitif fazdan daha uzun bir süre t_o^- ile negatif bir faz takip eder.

Basınç-zaman eğrisi altındaki bütünleşik alan, patlama nedeniyle yapıya uygulanan toplam kuvvete bağlı olduğundan dolayı tasarımda önemli bir parametre olan negatif faz için (i_s^-) ve pozitif faz için (i_s) patlayan etki itmesidir (Karlos ve Solomon 2013).



Şekil 2.16. Serbest hava paralanma basınç-zaman değişimi (US Department of Defense 2008)

Tasarım amacı ve patlama dalgası parametrelerinin kullanım kolaylığı için, basınç zaman eğrisi Şekil 2.17’de gösterildiği gibi idealleştirilmiştir.



Şekil 2.17. İdealleştirilmiş basınç–zaman değişimi (US Department of Defense 2008)

2.10. Dijital Görüntü Korelasyonu Yöntemi

Dijital görüntü korelasyonu (DGK), bir malzemenin veya yapının deformasyonu, yer değişimi ve gerilimine ilişkin tam alan analizine izin veren bir optik ölçüm tekniğidir. Özellikle çeşitli parçaların ve malzemelerin gerilim ve yük tepkisini test etmek için DGK kullanılan havacılık, savunma ve otomotiv endüstrilerinde tekniğin popülerliği giderek artmaktadır. Yüksek hızlı kameralar ve çeşitli yazılım paketleri, DGK'nın yeni uygulamalara genişlemesine yardımcı olmaktadır. DGK, çeşitli açılardan kayıt yapmak için senkronize edilmiş bir veya birden fazla kamera kullanılarak gerçekleştirilebilir. Uzama, gerilme direnci veya tek düzlemsel bozulma için iki boyutlu görüntü oluştururken tek kamera kullanılır. Üç boyutlu görüntüler elde edilen DGK'da genellikle çoklu kamera sistemleri kullanılır ve titreşim testi veya çoklu düzlemlerde bozulma analizi gibi uygulamalarda kullanılır. DGK'yı gerçekleştirmek için, numunenin yüzeyine özel olarak hazırlanmış rastgele bir benek deseni uygulanır ve bu desenin hareketi kaydedilip analiz edilerek gerilme ve yer değiştirme alanları ortaya çıkarılır.

Geleneksel yöntemle sensörleri doğrudan bir nesneye yerleştirerek şekil değiştirme ve hareket bilgileri elde edilebilir. DGK ise bazı avantajlarla daha pratik bir yaklaşım önermektedir.

- DGK ek ağırlık, elektriksel ön gerilimleri ve hassas sensör bağlantısını ortadan kaldıran temassız bir tekniktir.
- DGK bir alan üzerinde birden fazla noktadan ölçümler yapmayı sağlayarak ölçümleri tekrarlamaya gerek kalmadan sensörlerden daha fazla bilgi sağlar.
- DGK sadece rölatif verileri değil, mutlak ölçümler de dâhil olmak üzere mühendislik için uygun nicel veriler sunar.
- DGK daha kısa sürer ve tasarım döngüsüne kolayca bağlanabilir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

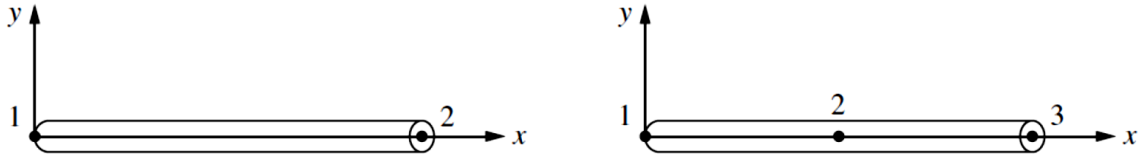
3.1. Sonlu Elemanlar Teorisi

SEM'in gelişimi, yapısal mühendislik alanında 1940larda başladı. SEM, mühendislik problemlerinin çözümlerine yakın sonuçlar bulmak için kullanılan kısmi diferansiyel denklemlerden matematiksel olarak elde edilen sayısal bir yöntemdir. SEM, analitik çözümlerle elde edilemeyecek karmaşık geometriler, yüklemeler ve malzeme özellikleri problemleri için yararlıdır. SEM problem ilgi alanları olarak yapısal analiz, ısı transferi, akışkanlar, elektromanyetik ve kütle taşımayı içerir. SEM karmaşık yapısal problemleri belli bir seviyeye kadar çözebiliyordu. Fakat daha karmaşık problemleri bilgisayarın icadına kadar çözemiyordu. Bir problemin SEM ile çözülebilmesi için aşağıdaki adımların takip edilmesi gerekmektedir:

- 1- Problem etki alanının sonlu sayıda alt alana (elemanlar) ayrılması
- 2- İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi
- 3- Alt alan (eleman) için eleman matrisinin geliştirilmesi
- 4- Tüm etki alanı için global matrisleri elde etmede her bir alt alan eleman matrislerinin birleştirilmesi
- 5- Sınır koşullarının uygulanması
- 6- Denklemlerin çözümlü
- 7- İsteğe bağlı ek hesaplamaların yapılması

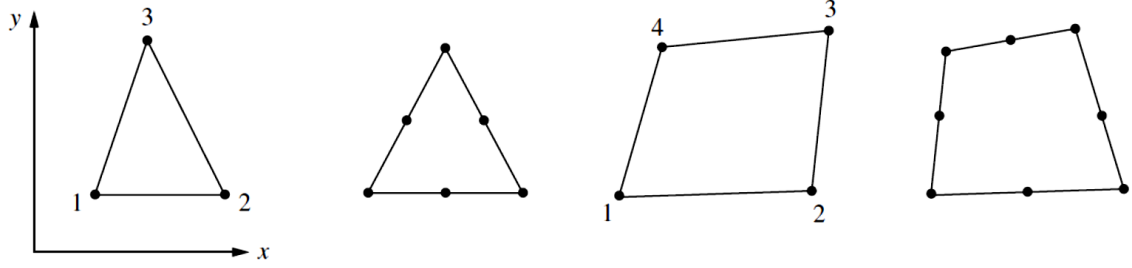
SEM ile çözülecek problemde kullanılan yapının geometri şekline bağlı olarak çizgi, düzlem veya hacim elemanları kullanılabilir.

Çizgi elemanlar, bir çubuk veya bir kiriş elemanı temsil etmek için kullanılan basit iki düğüm noktalı elemanlardır (şekil 3.1).



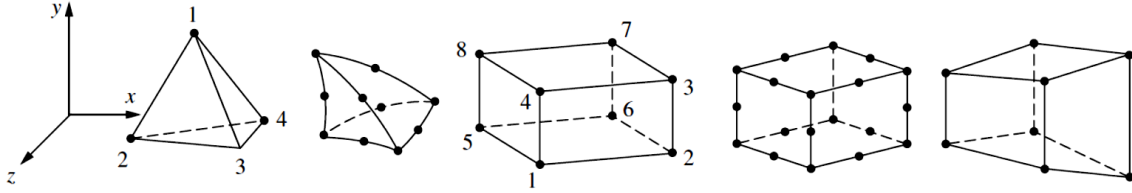
şekil 3.1. Çizgi elemanlar (Logan ve ark. 2007)

Düzlem elemanlar, yüzey gerilme/gerinimi göstermek için kullanılan köşe düğüm noktalarından oluşan iki boyutlu elemanlardır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Düzlem elemanlar (Logan ve ark. 2007)

Hacim elemanları, üç boyutlu gerilme durumlarını göstermek için kullanılan üç boyutlu elemanlardır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Hacim elemanlar (Logan ve ark. 2007)

3.2. Ls-Dyna Tarihçesi

Ls-Dyna, Livermore Software Technology Corporation (LSTC) tarafından geliştirilen ileri seviye genel amaçlı multifizik simülasyon yazılım paketidir. Paket, çoğu karmaşık gerçek dünya problemlerinin hesaplanması için daha fazla olasılık içermeye devam ederken, kökeni ve çekirdek yetkinliği büyük ölçüde eksplisit zaman entegrasyonunu kullanarak doğrusal olmayan süreksiz dinamik sonlu eleman analizine uzanmaktadır. Ls-Dyna otomotiv, havacılık, inşaat ve inşaat mühendisliği, savunma, üretim ve biyomühendislik endüstrilerinde kullanılmaktadır.

Ls-Dyna'nın kökeni, 1976 yılında Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarında Dr. John O. Hallquist tarafından geliştirilen üç boyutlu sonlu elemanlar programı DYNA3D programına dayanmaktadır (Koccaz ve ark. 2008). DYNA3D, FUFO bombası veya alçak irtifadan serbest bırakılan (40 m/s çarpma hızı) değişken akma dayanımlı nükleer bomba darbe etkisinin simülasyonu için oluşturuldu. FUFO bombası iptal edilmiş olsa

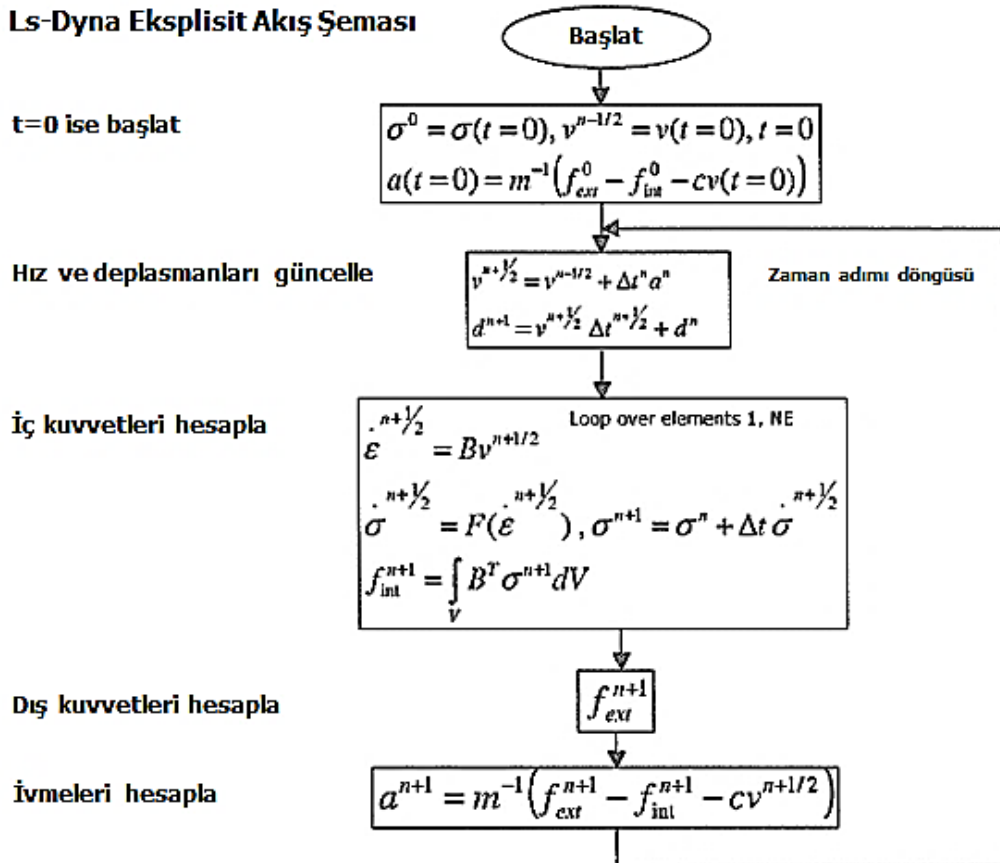
da DYNA3D programının gelişimi devam ettirildi (Marchand ve Alfawakhiri 2004). DYNA3D orijinal uygulamalar olan çoğunlukla çeşitli darbe etkilerine maruz kalan yapıların stres analizi ile lineer olmayan dinamik problemleri incelemek için eksplisit zaman entegrasyonunu kullandı. 1978 yılında Fransa'dan gelen bir talep sonrası DYNA3D kaynak kodu kısıtlama olmadan kamuya yayınlandı (Benson 2009). 1979 yılında CRAY-1 süper bilgisayarlarında optimum performans için programlanan yeni bir DYNA3D'nin sürümü yayınlandı. Bu sürüm 1974'te geliştirilen integral fark metodunun eleman tabanlı entegrasyonunu da içerirken aynı zamanda, ilk versiyonun yapısal ve yüksek dereceli katı elemanlarını da ortadan kaldırdı (Benson 2009). 1982 yılı sürümü patlayıcı-yapı ve toprak-yapı etkileşimleri gibi yeni simülasyonlara izin veren dokuz ek malzeme modeli içeriyordu. Bu sürüm ayrıca, delici mermilerden kaynaklanan yapısal tepkinin analizine de izin verdi. 1982'deki iyileştirmeler, uygulama hızını %10 artırdı. 1986 yılında birçok yetenek eklendi. Eklenen özellikler kiriş elemanlar, kabuk elemanlar, katı cisimler, tek yüzey kontak, ara yüz sürtünmesi, ayrık yaylar ve sönümleyiciler, isteğe bağlı hourglass işlemleri, isteğe bağlı tam hacim entegrasyonu ve VAX/VMS, IBM, UNIX, COS işletim sistemleri uyumluluğunu içermektedir. Bu sürüm ile DYNA3D, tek yüzey kontak algoritmasına sahip ilk kod oldu. 1987 yılında DYNA3D'ye metal şekillendirme simülasyonu ve kompozit analiz yetenekleri eklendi. 1988'de DYNA3D'nin son sürümünde birçok başka eleman ve yetenek vardı. 1988 yılında Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı, simülasyon yazılımı içeren yaklaşık 600 bant gönderdi. Hallquist, DYNA3D kullanımı konusunda yaklaşık 60 şirket ve kuruluşa danışmıştır (Benson 2009). Sonuç olarak 1988 yılının sonunda, DYNA3D'nin gelişimini çok daha odaklı bir şekilde sürdürmek için LS-DYNA3D (daha sonra LS-Dyna'ya kısaltıldı) ile sonuçlanan LSTC kuruldu. Böylece DYNA3D sürümleri ve desteği durduruldu. O zamandan beri LSTC, Ls-Dyna'nın yeteneklerini büyük ölçüde, çoğu simülasyon ihtiyacı için evrensel bir araç oluşturma çabasıyla genişletti (Benson 2009).

3.2.1. Ls-Dyna eksplisit çözüm teorisi

Ls-Dyna, doğrusal olmayan süreksiz dinamik bir sonlu elemanlar kodudur. Bu da simülasyonların zaman içerdiği anlamına gelir. Çarpışma analizi, patlama analizi veya

sac şekillendirme analizi gibi olaylar direkt olarak zamana bağlıdır. Bu analizleri gerçekleştirebilmek için modellemede kesinlikle zaman eklenmelidir.

Ls-Dyna'da eksplisit çözümün ilk aşaması modeli okumakla başlar. Modeldeki girdilerin okunmasından sonra modeldeki her bir eleman için eleman boyutu, malzeme verisinden yoğunluk ve Young modülü kullanılarak bir zaman adımı belirlenir. Her bir eleman için belirlenen bu zaman adımından en küçük olanı çözümün başlangıç zaman adımı olarak kabul edilir. Modelin girdilerine göre ilk zaman adımı kullanılarak ilk döngü tamamlanır. İlk çevrim sonrası her bir düğüm noktasındaki hızlar ve deplasmanlar hesaplanır. Daha sonra her bir düğüm noktasındaki iç ve dış kuvvetler hesaplanıp toplanır. Bu kuvvetlere bağlı olarak ivmeler hesaplanır. Elde edilen sonuçların ardından her bir eleman için tekrar zaman adımı hesabı yapılır ve en küçük zaman adımına göre ikinci döngü gerçekleşir. Bu döngü analizin bitiş süresine ulaşılan kadar devam eder. Ls-Dyna eksplisit çözüm döngüsü Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Ls-Dyna eksplisit çözüm döngüsü (Anonim 2014)

Eksplisit zaman entegrasyonunun avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yüksek doğrusal olmayan problemlerde çok verimli,
- Çözüm süresi sadece serbestlik derecesi artmasıyla lineer olarak artar,
- İmplicit çözüm yönteminde olduğu gibi denklem sistemleri çözmeye veya global sertlik matrisi oluşturmaya ihtiyaç yoktur.

Eksplisit çözüm yöntemi özellikle yüksek deformasyonların veya sonlu gerinimlerin olduğu, doğrusal olmayan malzeme modelleri ve karmaşık kontak kartları içeren doğrusal olmayan yüksek hızlı dinamik problemler için uygundur.

3.2.2. Johnson-Cook malzeme modeli

Yüksek sıcaklıklar, yüksek gerinim hızları ve büyük deformasyon koşulları altında gerilme ve gerinim arasındaki malzeme ilişkileri Ls-Dyna içerisinde en iyi Johnson-Cook malzeme modeli tarafından tanımlanır. Basit bir formda olması ve malzeme sabitlerini tahmin etmek için az çaba gerektirmesiyle, malzeme akış davranışını tahmin etmede çoğu araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Johnson-Cook malzeme modelinde akış gerilme modeli aşağıdaki gibi açıklanabilir (Hallquist 2006):

$$\sigma_y = \left[A + B(\varepsilon_p)^n \right] \left[1 + C \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_o} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right] \quad (3.1)$$

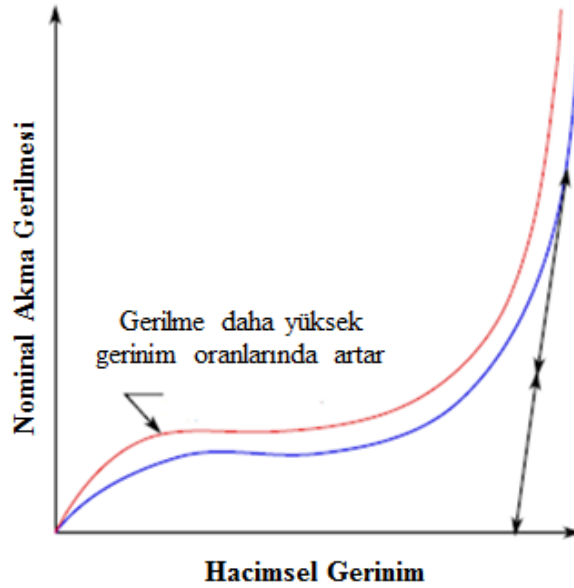
Burada A malzemenin akma gerilimi, B gerinim sertleştirme sabiti, C gerinim oranını güçlendirme katsayısı, ε_p efektif plastik gerinim, n gerinim sertleştirme katsayısı, m ısıl yumuşatma katsayısı, T etkin sıcaklığı, T_{room} oda sıcaklığı, T_{melt} malzeme erime sıcaklığı, $\varepsilon_p/\varepsilon_o$ plastik gerinim oranıdır. Yüksek lisans tezi kapsamında yapılan çalışmalarda termal etki hasarı düşünülmemiştir. Bu yüzden, MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme kartı kullanılmıştır ve malzeme kartı formülü aşağıdaki gibi indirgenmiştir (Hallquist 2006):

$$\sigma_y = \left[A + B(\varepsilon_p)^n \right] \left[1 + C \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_o} \right) \right] \quad (3.2)$$

3.2.3. Poliüretan köpük malzeme modeli

Poliüretan köpükler genel olarak viskoelastik olarak sınıflandırılabilirler. Bu da onları tekrarlı kullanım ve darbe enerjisi emilimi gerektiren uygulamalar için tercih edilen bir özellik olan sertlik için uygun hale getirir. Viskoelastik köpükler yük uygulaması altında sıkışabilir ve orijinal şekillerini geri kazanmak için genişleyebilirler. Bu durum sert köpüklerde hücrelerin uygulanan yükleme altında köpüğün daha yüksek deformasyonuna izin veren ve daha yüksek enerji emilimine yol açan açık tiplerinde yaygındır. Ancak hücre duvarlarına verilen hasar genel deformasyonun kalıcı olmasına neden olur. Yarı sert olarak adlandırılan daha fazla ezilebilir köpük, viskoelastik köpüklere kıyasla daha yüksek enerji emme kabiliyetine sahiptir (Şekil 3.5).

Ls-Dyna içerisinde köpük malzeme modellemesi için birçok malzeme kartı bulunmaktadır. Poliüretan köpüğün özelliğinden dolayı ezilebilir köpük malzemeyi en iyi temsil eden MAT_CRUSHABLE_FOAM malzeme kartı kullanılmıştır. Bu malzeme kartı Ls-Dyna'da, isteğe bağlı sönümlenme ve gerginlik kesme ile ezilebilir köpüğün modellenmesine yönelik malzeme kartıdır. Yük boşaltma tamamen elastiktir. Gerilim, gerilim kesme değerinde elastik tamamen plastik olarak davranır. Bu modelin değişiklik yapılmış bir versiyonu gerinim oranı etkilerini de içeren MAT_MODIFIED_CRUSHABLE_FOAM malzeme kartıdır.



Şekil 3.5. Gerinme hızına duyarlı ezilebilir köpüğün davranışı (LSTC 2015b)

Hacimsel gerinim, bağıl hacim (V) cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanır (LSTC 2015b):

$$\gamma = 1 - V \quad (3.3)$$

Bağıl hacim, anlık hacmin ilk hacme oranı olarak tanımlanır.

3.2.4. Viskoelastik jel malzeme modeli

Viskoelastik jel malzemeler Ls-Dyna içerisinde MAT_VISCOELASTIC malzeme kartı ile tanımlanabilmektedir. Kesme gevşeme davranışı aşağıdaki gibi tanımlanır (Hallquist 2006, LSTC 2015b).

$$G(t) = G_\infty + (G_0 - G_\infty) \exp(-\beta t) \quad (3.4)$$

Burada G_∞ uzun süreli kesme modülü, G_0 kısa süreli kesme modülü, β ise bozulma sabitini tanımlamaktadır.

Malzeme karakteristiğini belirlemek için kullanılan Jaumann oran formulasyonu ise aşağıdaki gibidir (Hallquist 2006, LSTC 2015b).

$$\overset{\nabla}{\sigma}'_{ij} = 2 \int_0^t G(t - \tau) D'_{ij}(\tau) d\tau \quad (3.5)$$

Burada $\overset{\nabla}{\sigma}'_{ij}$ gerilim oranının deviatorik kısmını, D'_{ij} ise gerinim oranını ifade etmektedir.

3.3. CONWEP Patlama Teorisi

Ls-Dyna programı içerisinde farklı tipte patlama analizleri gerçekleştirmek mümkündür. Yüksek lisans tezi kapsamında patlama analizi olarak conventional weapons (CONWEP) türü tercih edilmiştir. CONWEP patlama parametreleri Charles Kingery ve Gerald Bulmash (UNODA 2015) tarafından bulunmuştur. Patlama parametrelerini bulabilmek için küre ve yarı küre formundaki trinitrotoluene (TNT) patlayıcıları ile

hava ve zemin ortamında bir dizi patlama testleri gerçekleştirmişlerdir. Bu testleri farklı patlayıcı kütleleri ve farklı mesafeler ile gerçekleştirmişlerdir. Testler sonucunda elde ettikleri değerlere bağlı olarak patlama parametrelerini elde etmişlerdir. Bu patlama parametreleri polinom denklemlerine çevrilmiş ve ABD Ordu Mühendisleri Birliği tarafından CONWEP programı oluşturulmuştur. CONWEP yöntemi Ls-Dyna programına Randers-Pehrson ve Bannister (US Department of Defense 2014) tarafından tanımlanmıştır.

CONWEP yöntemi Ls-Dyna'da her koşulda çalışmamaktadır. Kullanılan TNT kütlesi ve TNT'nin yapıya olan mesafesine göre bir denklem oluşturulmuştur (LSTC 2015a).

$$Z = R/M^{1/3} \quad (3.6)$$

R, TNT merkezinden yapıya olan mesafeyi; M ise TNT kütlesini temsil etmektedir. Denklem 3.6'da verilen orana göre bir Z değeri hesaplanır. Hesaplanan Z değeri küresel patlamalar için $0,147 \text{ m/kg}^{1/3} < Z < 40 \text{ m/kg}^{1/3}$ aralığında, yarı küresel patlamalar için ise $0,178 \text{ m/kg}^{1/3} < Z < 40 \text{ m/kg}^{1/3}$ aralığında olmalıdır. Z değeri belirtilen aralıklar dışında ise yapılan analizler geçersiz sayılmaktadır.

4. BULGULAR

4.1. Sonlu Elemanlar Analizi

SEM ile analizi gerçekleştirilecek tasarım tamamlandıktan sonra model Ls-Prepost programına aktarılır. Bu program ön işlemci ve sonuç görüntüleyici olarak kullanılır. Ls-Prepost programı içerisinde tasarıma ait ağ örgü işlemi gerçekleştirilir. Sınır koşulları ve yükleme koşulları oluşturulur. Yapıya atanacak kesit özellikleri ve malzeme özellikleri sisteme tanımlandıktan sonra ilgili parçalarla ilişkilendirilir. Parçalar arasında uygun görülen kontak türü ve parametreleri eklenir. Gerekli kontrol parametreleri girildikten sonra sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlene gerçekleştirilir.

4.1.1. Ağ örgüsü oluşturma

Analizi yapılacak modellerde yüzeyler ve katılar bulunmaktadır. Yüzeylerin SEM ile analizinin gerçekleştirilebilmesi için ağ örgüsünün kabuk elemanlar ile oluşturulması gerekmektedir. Kabuk eleman olarak üçgen ve dörtgen elemanlar kullanılmaktadır. Üçgen sonlu elemanlar, eleman boyunca sabit bir gerilmeye sahip olduklarından daha katıdırlar. Dörtgen sonlu elemanlarda ise gerilme lineer olarak değişmektedir. Bu sebeple aynı eleman sayısına sahip yapılarda dörtgen elemanlar ile daha kesin sonuçlar elde edilebilir. Katıların SEM ile analizinin gerçekleştirilebilmesi için ağ örgüsünün katı elemanlar ile oluşturulması gerekmektedir. Katı elemanlar için dört yüzlü cisim olan tetrahedron isimli elemanlar, beş yüzlü cisim olan pentahedron isimli elemanlar ve altı yüzlü cisim olan hexahedron isimli elemanlar kullanılmaktadır. Pentahedron eleman türü katı elemanlar arasında geçiş elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple analizi yapılacak modellerde kullanılmamıştır.

4.1.2. Malzeme özelliklerinin tanımlanması

Şok dalgaları yapıya etki ederken yapıda yüksek gerinim hızlarında büyük deformasyonlara sebep verir. Ayrıca şok dalgaları ile birlikte yüksek sıcaklık oluşur. Bu sebeple analizi yapılacak modellerde metal parçaların şok dalgası altında gerçek

davranışını modelleyebilmek için Ls-Dyna programında MAT_JOHNSON_COOK malzeme modeli tercih edilmiştir. Yapılan analizlerde sıcaklık etkisi önemsiz olduğundan Ls-Dyna programında MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme kartı kullanılmıştır. Sandviç yapının malzeme özellikleri yapılan deneysel çalışmalardan elde edilmiştir.

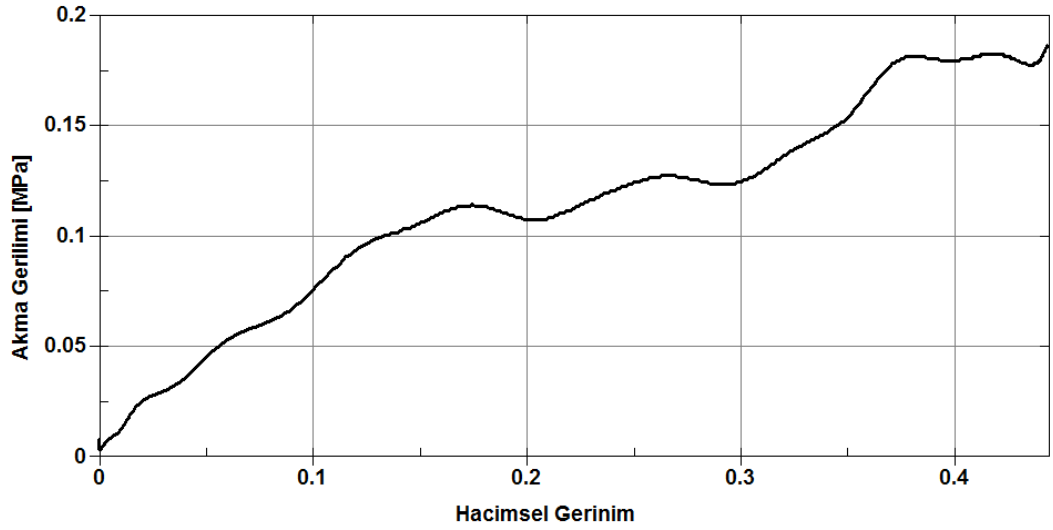
Çizelge 4.1. Metal plakaların malzeme değerleri

MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK	
Yoğunluk	$7,80 \times 10^{-9}$ ton/mm ³
Young Modülü	$2,05 \times 10^5$ N/mm ²
Poisson Oranı	0,29
A= Akma Gerilimi	220 MPa
B= Gerinim Sertleştirme Sabiti	499,87 MPa
n= Gerinim Sertleştirme Katsayısı	0,228
C= Gerinim Oranını Güçlendirme Katsayısı	0,017

Korelasyon yapılacak modellerde sandviç yapı ve koruge model arasına ise enerji sönmleme kabiliyeti yüksek olan poliüretan köpük dolgu malzemesi eklenmiştir. Yüksek lisans kapsamında kullanılan poliüretan köpük malzemeyi mekanik özelliğinden dolayı Ls-Dyna programında en iyi MAT_CRUSHABLE_FOAM malzeme kartı temsil etmektedir. Bu malzeme kartını Ls-Dyna içerisinde tanımlamak için yoğunluk, Poisson oranı, hacimsel gerinim oranına bağlı akma dayanımı değerlerini girmek yeterlidir. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1’de deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen poliüretan köpük malzemenin özellikleri bulunmaktadır.

Çizelge 4.2. Poliüretan köpük malzeme değerleri

MAT_CRUSHABLE_FOAM	
Yoğunluk	$4,46 \times 10^{-11}$ ton/mm ³
Poisson Oranı	0,13



Şekil 4.1. Poliüretan köpük akma gerilimi-hacimsel gerinimi

Patlama analizi yapılacak koruge modellerde dolgu malzemesi olarak kullanılan viskoelastik jel aynı zamanda mühimmat jeli olarak kullanılmaktadır. %10 veya %20'lik bir jel konsantrasyonu, balistik testi için bir doku taklidi olarak yaygın olarak kullanılır. Viskoelastik jel dolgulu koruge modellerde su bazlı %10 konsantrasyona sahip jel kullanılmıştır. Viskoelastik jel malzemeler Ls-Dyna'da MAT_VISCOELASTIC malzeme kartı ile modellenenbilmektedir. Viskoelastik jel malzeme değerleri literatür çalışmasından alınmış olup Çizelge 4.3'te belirtilmiştir (Datoc 2010).

Çizelge 4.3. Viskoelastik jel malzeme değerleri

MAT_VISCOELASTIC	
Yoğunluk	$1,20 \times 10^{-9}$ ton/mm ³
Kısa Süreli Kesme Modülü	$2,00 \times 10^{-6}$ MBar
Uzun Süreli Kesme Modülü	$1,95 \times 10^{-6}$ MBar
Elastik Bulk Modülü	$2,90 \times 10^{-4}$ MBar
Bozulma Sabiti	0,10

4.1.3. Kesit özelliklerinin tanımlanması

Kabuk elemanlar için kesit kartı içerisinde kalınlık ataması yapılabildiği gibi analiz için uygun eleman formülü de seçilebilmektedir. Kabuk elemanlar için hesaplama verimliliğinden dolayı en çok kullanılan Belytschko-Lin-Tsay kabuk eleman formülü

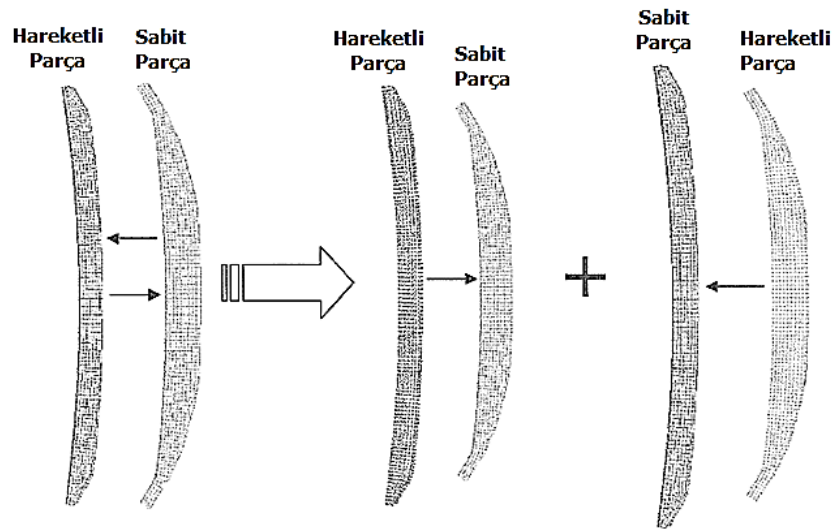
tercih edilmiştir. Bu eleman formülü hesaplama hızından dolayı daha çok çarpışma, patlama gibi eksplisit analizlerde tercih edilmektedir.

Poliüretan köpük ve viskoelastik jel katı elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Köpük ve jel için Ls-Dyna içerisinde en çok kullanılan eleman formülü ELFORM:1 sabit gerilim katı eleman tercih edilmiştir.

4.1.4. Diğer analiz parametreleri

Ls-Dyna sonlu elemanlar modellemesi gerçekleştirilirken iki kontak türü sisteme tanımlanmıştır. Bunlar Ls-Dyna içerisinde Automatic_Surface_To_Surface ve Automatic_Single_Surface olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4.2).

Çarpışma, patlama analizlerinde deformasyonlar çok büyük olabilir ve kantağın nerede ve nasıl gerçekleşeceğini önceden belirlemek zor veya imkânsız olabilir. Bu nedenle, yönelimli olmadıkları için otomatik kontak seçenekleri önerilmektedir. Yani bu kontak türleri kabuk elemanın her iki tarafından gelen penetrasyonu tespit edebilmektedir. Automatic_Surface_To_Surface kontak kartı da simetrik çalışmaktadır (Şekil 4.2). Yapılan çalışmalarda bu kontak kartı koruge yapıyı oluşturan yüzeyler arasında ve bu yüzeyler arasına dolgu malzemesi olarak eklenmiş poliüretan köpük ve jel ile temasta olduğu yüzeyler arasında tanımlanmıştır.



Şekil 4.2. Automatic surface to surface kontak kontrolü (LSTC 2003)

Automatic_Single_Surface kontak kartı Ls-Dyna'da en yaygın kullanılan kontak türüdür. Her bir parçanın kendi kendine teması da dâhil olmak üzere tüm parçalar arasında kontak göz önünde bulundurulur. Bu kontak kartı da simetrik çalışmaktadır. Model doğru tanımlanmışsa, bu kontak tipleri çok güvenilir ve doğrudur. Burulma oluşabilecek analizlerde yüzeylerin iç içe girişimini önlemek için bu kontak kartının kullanımı çok önemlidir. Yapılan analiz çalışmalarında modellerdeki bütün parçalar gruplandırılıp, grup numarası Automatic_Single_Surface kontak kartı içerisine tanımlanmıştır. Böylece analiz sırasında yüzeyler arası iç içe girişimin engellenmesi sağlanmıştır.

Ls-Dyna'da kullanılan bazı eleman formülleri ilişkilendirildikleri elemanın davranışının gerçek dışı olmasına sebebiyet vermektedir. Bu durum Ls-Dyna'da hourglass olarak tanımlanmaktadır. Hourglass problemi Ls-Dyna'da sadece tek noktalı entegrasyon formülüne sahip kabuk ve katı elemanlarda meydana gelmektedir. Bu sıfır enerjili, yüksek frekanslı hourglass modları fiziksel değildir. Gerilme veya gerinim olmadan elemanda deformasyona ve gerçekçi olmayan görünüme sebebiyet vermektedir. Bu durumun önüne geçmek için hourglass kontrol kartını kullanmak gerekmektedir. Yapılan analizlerde daha hızlı çözüm elde etmek için modelleri oluşturan yüzeyler tek noktalı entegrasyon formülüne sahip kabuk elemanlar ile poliüretan köpük ve viskoelastik jel ise tek noktalı entegrasyon formülüne sahip katı elemanlar ile modellenmiştir. Modelde herhangi bir hourglass problemi oluşmaması için hourglass kartı aktif edilmiştir.

Patlama sırasında oluşan şok dalgaları etki alanındaki yapıya milisaniyeler içerisinde ulaşmaktadır. Bu doğrultuda, şok dalgaları analiz çalışmaları yapılırken analiz bitme süresi de milisaniye mertebelerinde tanımlanmaktadır. Patlama analizi gibi eksplisit analizlerde, analiz bitme süresini arttırmak problemin çözüm süresini de arttırmaktadır. Bu nedenle uygun bir analiz bitme süresi tanımlanmalıdır. Yapılan çalışmalarda tek plaka modellerinde analiz bitiş süresi 8 milisaniye, diğer bütün modellerde ise analiz bitiş süresi 3 milisaniye olarak Ls-Dyna'ya tanımlanmıştır.

4.2. Test ve Analiz Korelasyon Çalışmaları

Analiz ortamında kullanılan sınır koşulları, malzeme modelleri, eleman büyüklüğü gibi parametrelerin doğruluğunu kontrol etmek için test çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Analiz modellemelerinin sağlıklı çalıştığına karar verebilmek için analiz sonuçları ile test sonuçları uyum içinde olmalıdır. Bu nedenle test ve analiz korelasyon çalışmaları yapılmaktadır. Bu bölümde yapılan şok basıncı testi ile ilgili bilgiler, şok basıncı testini doğrulamak için yapılan şok basıncı analizleri, şok basıncı ile elde edilen maksimum deplasmanları elde etmek amacıyla yapılan patlama analizleri hakkında bilgiler verilmiştir.

4.2.1. Şok basıncı testi

Şok basıncı testinde düzlemsel dalga yüzü şok dalgaları üretmek için bir şok tüpü aparatı kullanıldı. Kullanılan şok tüpünün çıkış namlusunun iç çapı 38,1 milimetredir (Şekil 4.3).

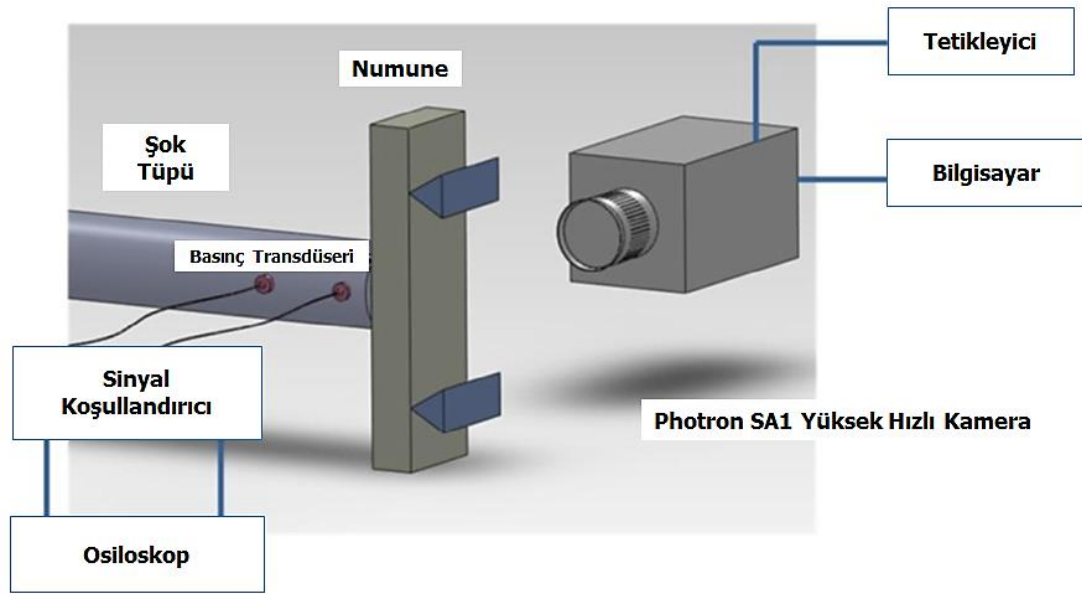


Şekil 4.3. Şok tüpü (Yazıcı ve ark. 2014)

Gelen ve yansıyan basınç değerlerini kaydetmek için namlu bölümünün uç kısmında iki basınç transdüseri (PCB102A) kullanılmaktadır. İlk basınç sensörü namludan 20 mm uzaklıkta bulunmaktadır ve ikincisi 180 mm uzağa monte edildi (ilk basınç sensörüne 160 mm mesafede). Şok tüpü testinde numuneden yansıyan basınç değerleri şok basıncı analizlerinde şok yükü olarak kullanıldı. Numune 152,4 mm mesnetler arası mesafeye

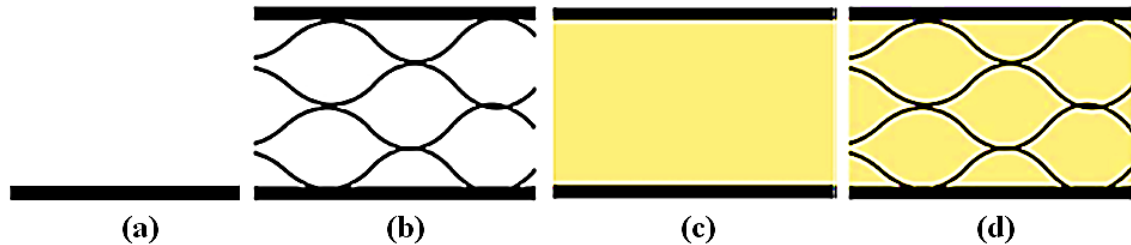
sahip olacak şekilde basit mesnetli olarak test düzeneğine yerleştirilmiştir. Numunenin düz ön yüzü şok tüpünün eksenine dik olarak test edilmektedir. Numunelerdeki hasar yayılım, deplasmanların belirlenmesi ve numunelerin hareketini yakalamak için yüksek hızlı kameralar ve dijital görüntü korelasyonu yönteminden yararlanılmıştır.

Şekil 4.4’de de görüldüğü gibi kameranın lens eksenini şok tüpüne dik olacak şekilde ayarlandı. Saniyede 20 000 kare çekme hızına sahip Photron SA1 yüksek hızlı dijital kamera, 3 milisaniye boyunca 512x512 piksel görüntü çözünürlüğünde fotoğraflar çekmek için kullanıldı (Yazıcı ve ark. 2014).



Şekil 4.4. Deplasman ölçümleri için deneysel kurulum (Yazıcı ve ark. 2014)

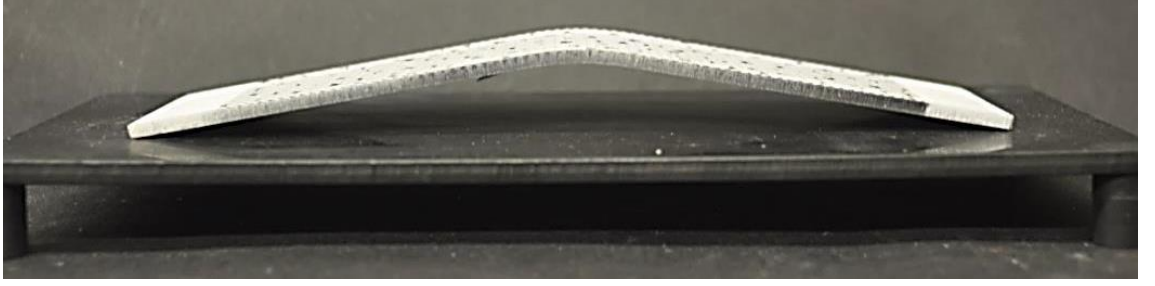
Tekrarlanabilirliği sağlamak için her modelden en az üç numuneye şok yüklendi. Testlerde dört farklı model kullanılmıştır. Testlerde kullanılan modeller Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Test modelleri şematik gösterimi (a) Tek plaka modeli (b) Koruge model (c) Sandviç model (d) Poliüretan köpük dolgulu koruge model (Yazıcı ve ark. 2014)

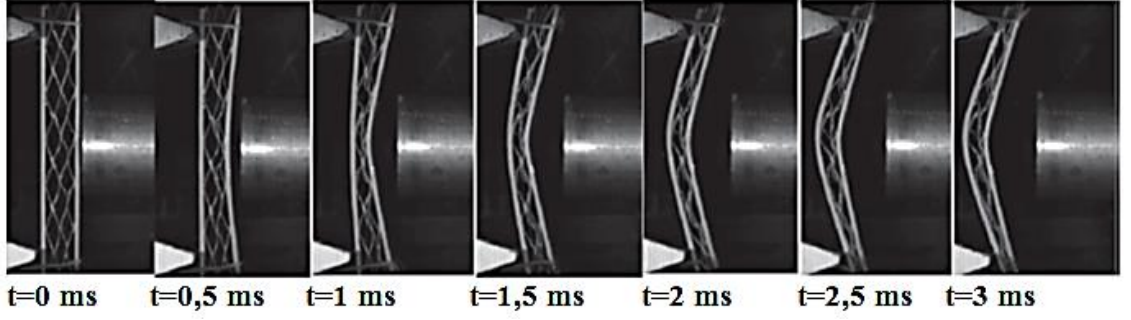
Yapılan testler sırasında modellerde gerçekleşen hareket yüksek hızlı kamera yardımıyla kaydedildi.

Tek plakada test sonunda meydana gelen kalıcı deplasman Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şok basıncının uygulanması ile tek plaka üzerinde deplasman gerçekleşmeye başladı. Tek plaka üzerindeki maksimum deplasman 2,5 milisaniyede gerçekleşti. Uygulanan basınçtan dolayı plaka üzerindeki enerji maksimum deplasman anından itibaren plakanın harmonik hareket yapmasına sebep oldu. Maksimum deplasman anından itibaren deplasmanlar önce azalıp ardından bir miktar arttı. Enerjinin sönümlenmeye başlamasından dolayı harmonik hareket sırasında elde edilen deplasmanlar maksimum deplasman değerinden daha az gerçekleşti.



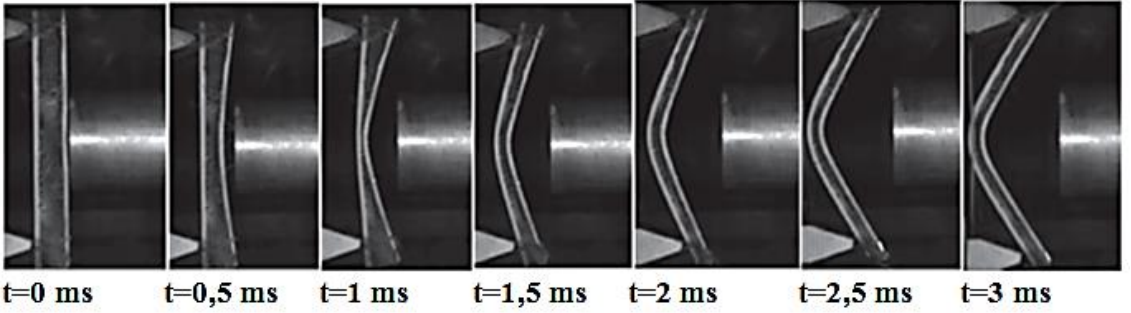
Şekil 4.6 Tek plakada meydana gelen kalıcı deplasman

Koruge çekirdekli sandviç modelde gerçekleşen şekil değiştirme Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Şok basıncının uygulandığı plakada başlangıçta gerçekleşen deplasman arka plakada 0,25 milisaniyede başladı. Koruge modeli oluşturan çekirdek panellerdeki deplasman 1,25 milisaniyeye kadar arttı. Bu süreden sonra çekirdek panellerdeki sıkışma değişim olmadan sabit kaldı. Fakat ön ve arka plakalardaki deplasman miktarı arttı. Şok yüklemesi sırasında ön plaka aniden 17 m/s hıza (3000g) ulaşır kademeli olarak 0 m/s hıza düştü. Arka plakanın hızı ise 14 m/s hıza 1,25 milisaniyede ulaştı. Bu süreden sonra, hem ön hem de arka plaka eşit hızlara sahipti.



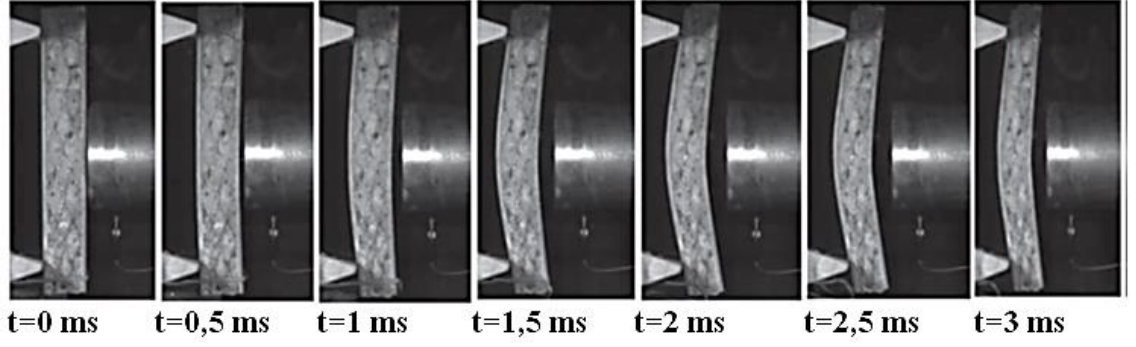
Şekil 4.7. Koruge çekirdekli sandviç modelde gerçekleşen şekil değiştirme (Yazıcı ve ark. 2014)

Poliüretan köpük dolgulu sandviç modelde gerçekleşen şekil değiştirme Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şok dalgası numuneye çarptıktan sonra zayıf köpük ön plaka hızının azalmasını 1,25 milisaniyeye kadar sağlayamadı. Köpük çok hızlı bir şekilde yaklaşık 10 milimetreye kadar sıkışıp daha sonra bu sıkışmayı koruyarak ön ve arka plaka ile birlikte hareket etti.



Şekil 4.8. Poliüretan köpük dolgulu sandviç modelde gerçekleşen şekil değiştirme (Yazıcı ve ark. 2014)

Poliüretan köpük dolgulu koruge modelde gerçekleşen şekil değiştirme Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Köpük dolgu, koruge çekirdekli sandviç model ve poliüretan köpük dolgulu sandviç model ile karşılaştırıldığında numune davranışında büyük değişikliklere neden olmuştur. Köpük dolgusu sayesinde koruge çekirdekli sandviç model ve poliüretan köpük dolgulu sandviç modele göre plakalarda meydana gelen sıkışma azaldı. Şok basıncının uygulandığı plakada başlangıçta gerçekleşen deplasman arka plakada 0,25 milisaniyede başladı.

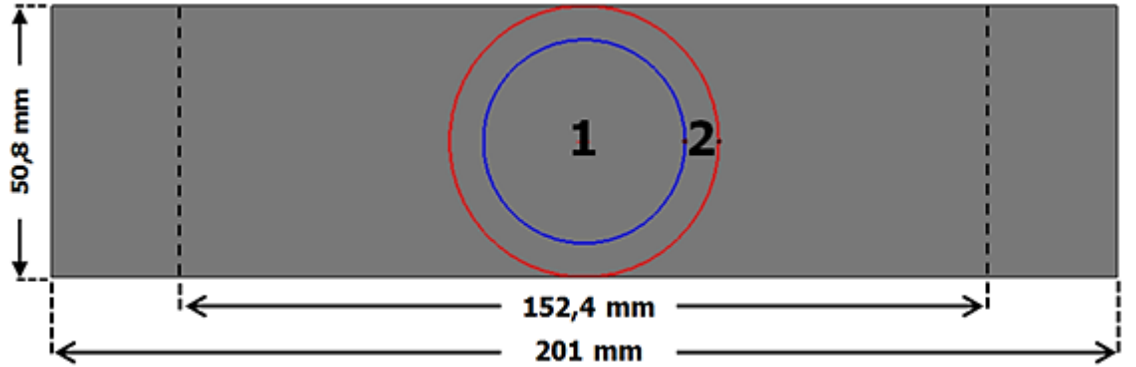


Şekil 4.9. Poliüretan köpük dolgulı koruge modelde gerçekleşen şekil değiştirme
(Yazıcı ve ark. 2014)

4.2.2. Tek plaka korelasyon çalışması

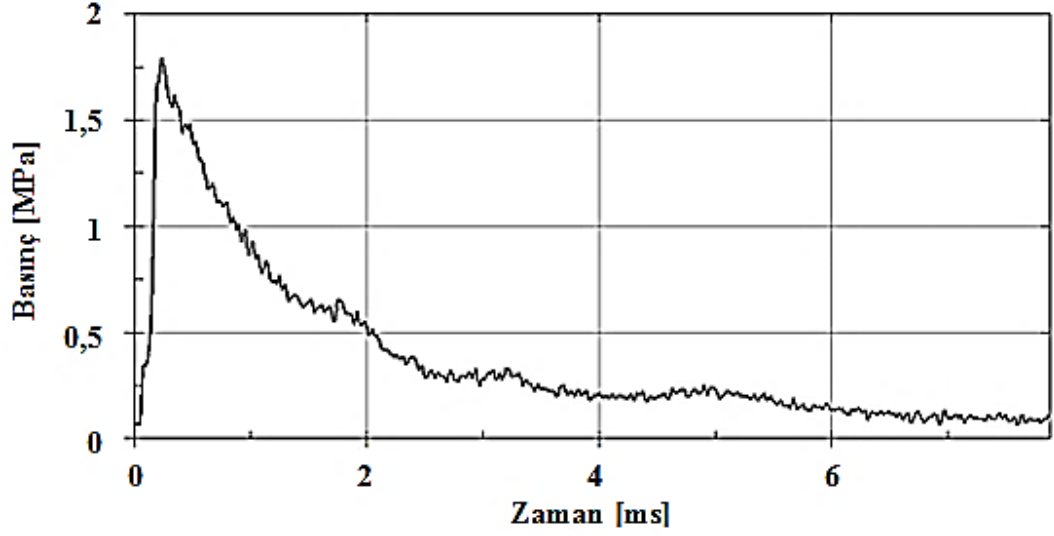
Tek plakadan oluşan model yüzey olarak modellendi. Bu sebeple sonlu elemanlar ağ örgüsü 2647 kabuk eleman ile oluşturuldu. Kabuk elemanın kalınlığı 3,175 milimetre olarak tanımlandı. Tek plaka modeli Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

Şekil 4.10’da belirtilen iki kesikli çizgi boyunca model sabitlendi. Şok basıncı analizi için Şekil 4.10’da belirtilen 1 numaralı bölgede şok basıncı homojen olarak uygulandı. 2 numaralı bölgede ise yarıçap arttıkça şok basıncı azalacak şekilde basınç uygulandı.



Şekil 4.10. Tek plaka modeli önden görünüş

Uygulanan basıncın zamana bağılı değişimi Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



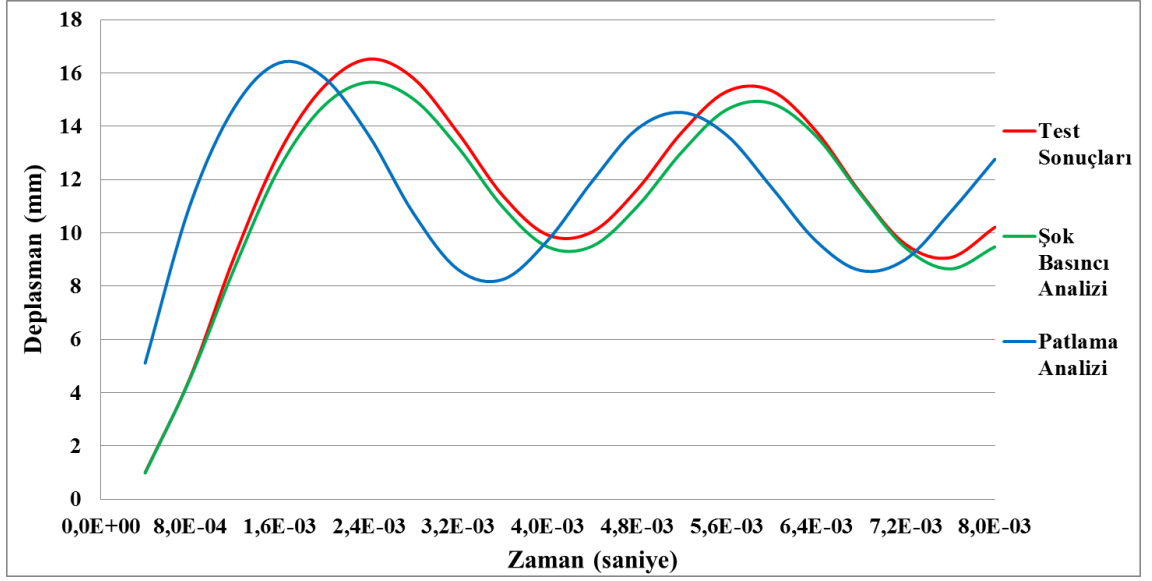
Şekil 4.11. Şok basıncının zamana bağılı değişimi (Yazıcı ve ark. 2014)

Şok basıncı analizinin ardından patlama analizi gerçekleştirildi. Patlama analizi Ls-Dyna’da LOAD_BLAST_ENHANCED (LBE) kartı kullanılarak gerçekleştirildi. Bu kart içerisinde patlama türü olarak serbest hava paralanma patlaması seçildi. Patlama analizinin uygulanabilirliğini teyit etmek amacıyla Şok basıncı testi ve Şok basıncı analizinden elde edilen deplasman değerleri göz önüne alınarak analizde kullanılacak patlayıcı kütlesi ve patlayıcının plakaya olan mesafesi için iterasyon çalışması yapıldı. Araç zemini ile yol zemini arasında olması gereken minimum 400 milimetre referans alınarak patlayıcı kütlesi tanımlandı. Tanımlanan patlayıcı kütlesi ve mesafe değiştirilerek patlama analizinde elde edilen maksimum deplasmanların Şok basıncı testi ve Şok basıncı analizine yakın olması sağlandı. Yapılan iterasyon sonucu izelge 4.4’te belirtilen patlayıcı parametreleri kullanıldı.

Çizelge 4.4. Patlayıcı parametreleri

Patlayıcı Kütlesi (kg)	Patlayıcının Plakaya Uzaklığı (mm)
0,45	414,3

Şekil 4.12’de Şok basıncı testi sonucu elde edilen zamana bağılı deplasman değerleri, Şok basıncı analizi ve patlama analizinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.12. Deplasman değerlerinin karşılaştırılması

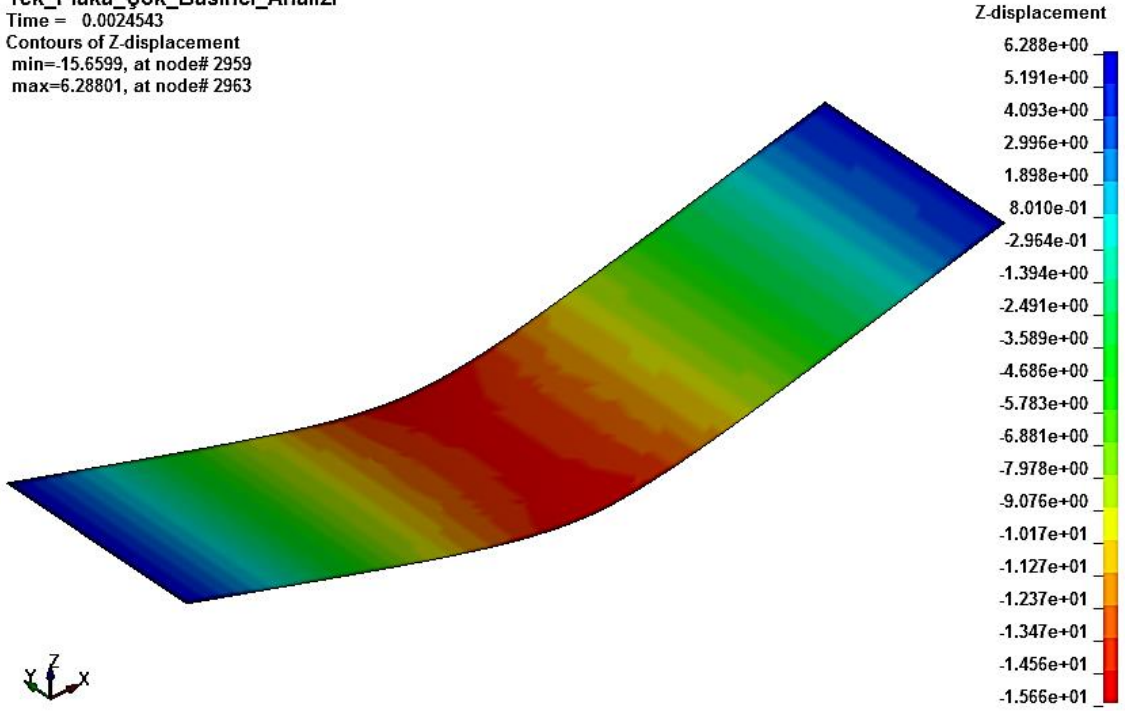
Şekil 4.12'de de görüldüğü gibi şok basıncı testi ile şok basıncı analizi değerlerinin uyumlu olduğu, patlama analizinde ise deplasman değerlerinin meydana geldiği sürelerde sapma meydana geldiği görülmektedir. Fakat maksimum deplasman değerlerinin çok yakın olması tek plaka analizinin korelasyonu açısından uygun görülmektedir. Çizelge 4.5'te elde edilen maksimum deplasman değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.5. Tek plaka maksimum deplasman değerleri

Sonuç türü	Maksimum Deplasman Değeri (mm)
Test Sonucu	16,52
Şok Basıncı Analizi Sonucu	15,66
Patlama Analizi Sonucu	16,43

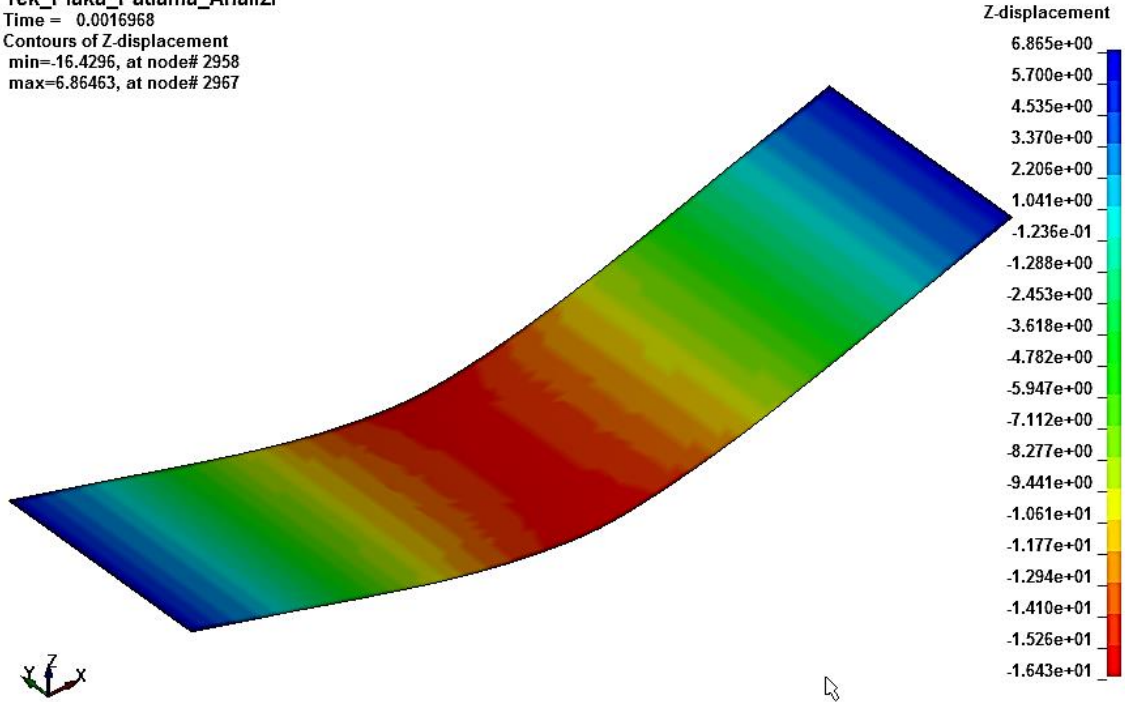
Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te analizlerde elde edilen maksimum deplasman anındaki plakanın durumu gösterilmiştir. Yükleme $-Z$ yönünde yapıldığından maksimum deplasman da $-Z$ yönünde gerçekleşti. Z yönündeki deplasman değerlerini gösteren skaladaki renklendirmeden de anlaşılacağı gibi maksimum deplasmanlar yükün uygulandığı orta bölgede meydana geldi.

Tek_Plaka_Şok_Basıncı_Analizi
Time = 0.0024543
Contours of Z-displacement
min=-15.6599, at node# 2959
max=6.28801, at node# 2963



Şekil 4.13. Şok basıncı analizi maksimum deplasman anı

Tek_Plaka_Patlama_Analizi
Time = 0.0016968
Contours of Z-displacement
min=-16.4296, at node# 2958
max=6.86463, at node# 2967

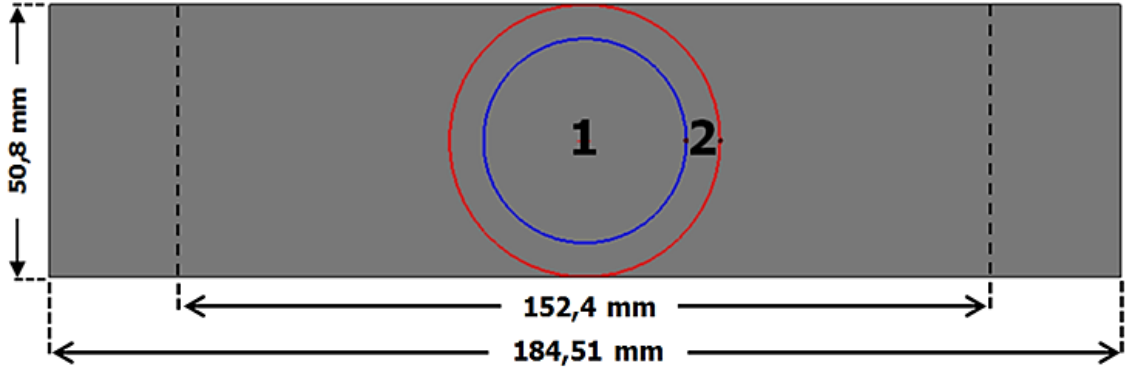


Şekil 4.14. Patlama analizi maksimum deplasman anı

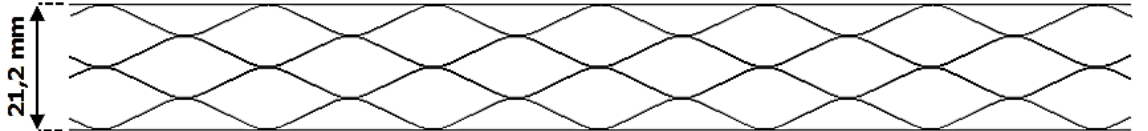
4.2.3. Koruge çekirdekli sandviç model korelasyon çalışması

Koruge çekirdekli sandviç model yüzey olarak modellendi. Bu sebeple sonlu elemanlar ağ örgüsü 18 856 kabuk eleman ile oluşturuldu. Kabuk elemanın kalınlığı ön ve arka yüzeylerde 3,175 milimetre, kıvrımlı yüzeylerde ise 0,43688 milimetre olarak tanımlandı. Koruge çekirdekli sandviç model Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

Şekil 4.15'te belirtilen iki kesikli çizgi boyunca model sabitlendi. Şok basıncı analizi için Şekil 4.15'te belirtilen 1 numaralı bölgede şok basıncı homojen olarak uygulandı. 2 numaralı bölgede ise yarıçap arttıkça şok basıncı azalacak şekilde basınç uygulandı.

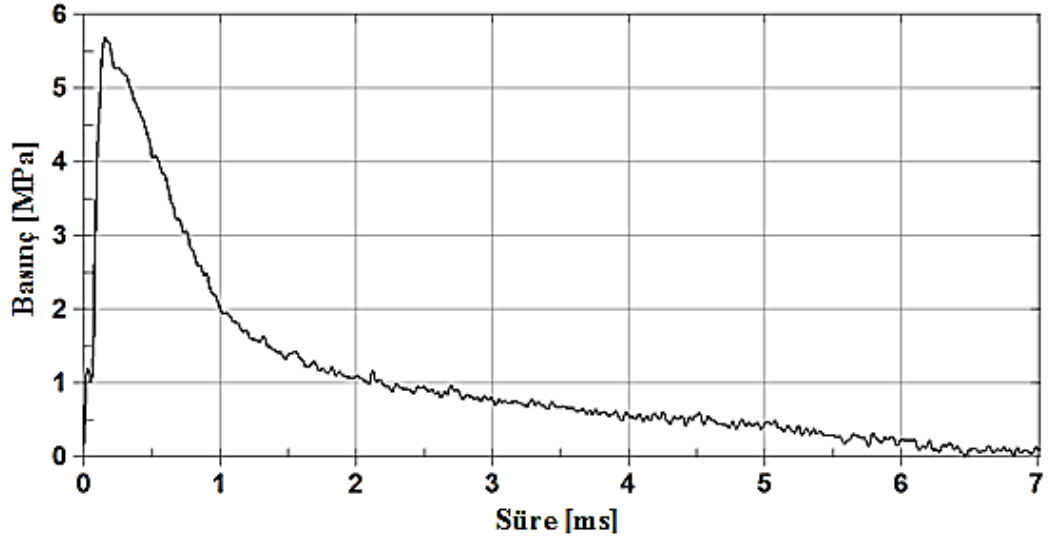


Şekil 4.15. Koruge çekirdekli sandviç model önden görünüş



Şekil 4.16. Koruge çekirdekli sandviç model yandan görünüş

Uygulanan basıncın zamana bağılı değişimi Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



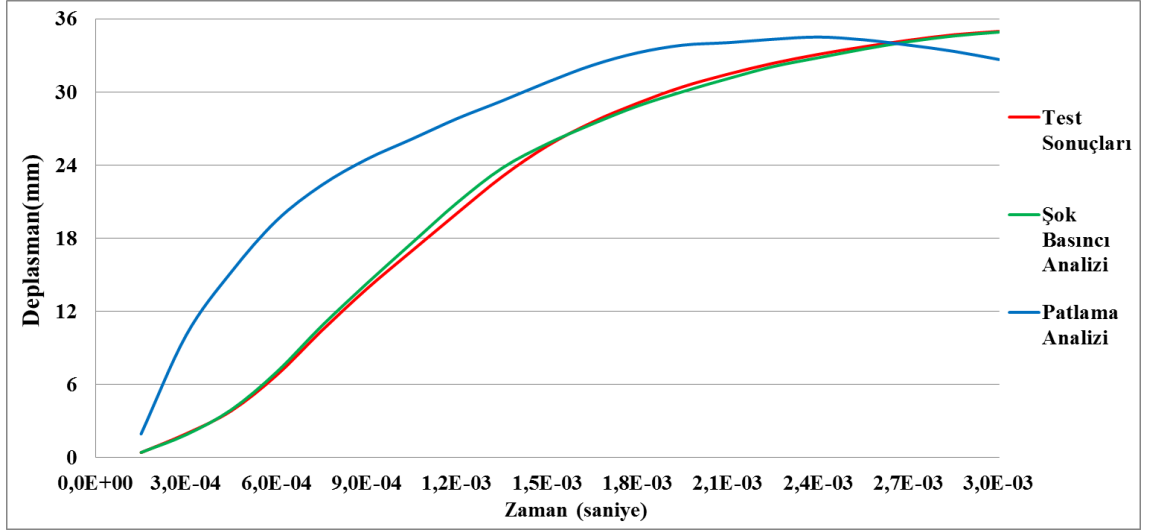
Şekil 4.17. Şok basıncının zamana bağılı değişimi (Yazıcı ve ark. 2014)

Şok basıncı analizinin ardından patlama analizi gerçekleştirildi. Patlama analizi LBE kartı kullanılarak gerçekleştirildi. Patlama türü olarak serbest hava paralanma patlaması seçildi. Patlama parametrelerini belirlemek adına Şok basıncı testi ve Şok basıncı analizi deplasman değerleri göz önüne alınarak iterasyon çalışmaları gerçekleştirildi. Araç zemini ile yol zemini arasında olması gereken minimum 400 milimetre referans alınarak patlayıcı kütlesi tanımlandı. Tanımlanan patlayıcı kütlesi ve mesafe değiştirilerek patlama analizinde elde edilen maksimum deplasmanların Şok basıncı testi ve Şok basıncı analizine yakın olması sağlandı. Yapılan iterasyon sonucu izelge 4.6’da belirtilen patlayıcı parametreleri kullanıldı.

Çizelge 4.6. Patlayıcı parametreleri

Patlayıcı Kütlesi (kg)	Patlayıcının Plakaya Uzaklığı (mm)
1,35	414,3

Şekil 4.18’de Şok basıncı testi sonucu elde edilen zamana bağılı deplasman değerleri, Şok basıncı analizi ve patlama analizinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.18. Deplasman değerlerinin karşılaştırılması

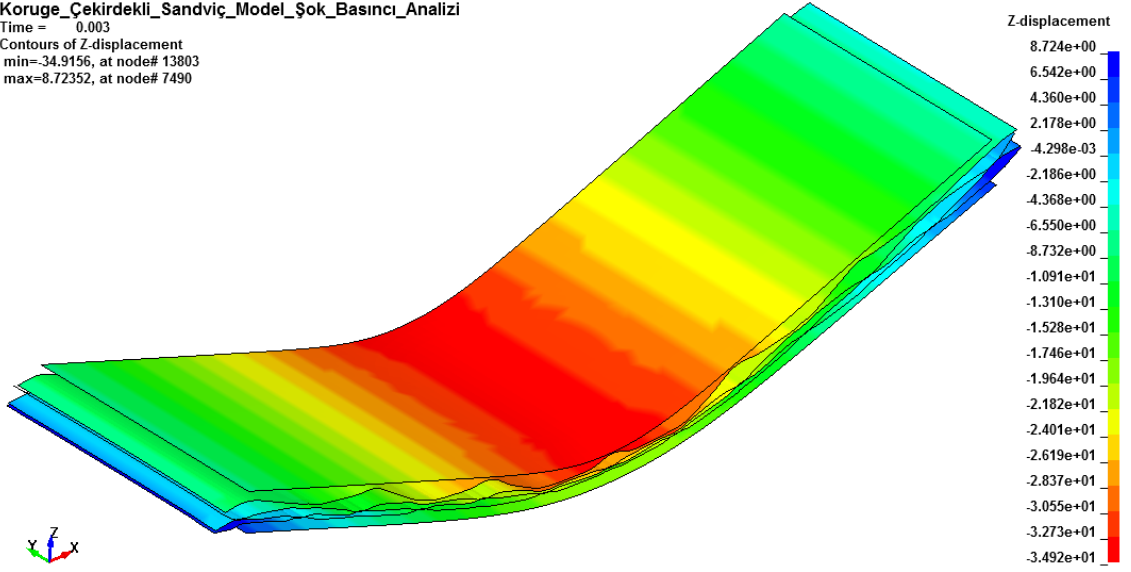
Şekil 4.18'de de görüldüğü gibi şok basıncı testi ile şok basıncı analizi değerlerinin uyumlu olduğu, patlama analizinde ise sapma meydana geldiği görülmektedir. Fakat maksimum deplasman değerlerinin çok yakın olması koruge çekirdekli sandviç model analizinin korelasyonu açısından uygun görülmektedir. Çizelge 4.7'de elde edilen maksimum deplasman değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.7. Koruge çekirdekli sandviç model maksimum deplasman değerleri

Sonuç Türü	Maksimum Deplasman Değeri (mm)
Test Sonucu	34,98
Şok Basıncı Analizi Sonucu	34,92
Patlama Analizi Sonucu	34,52

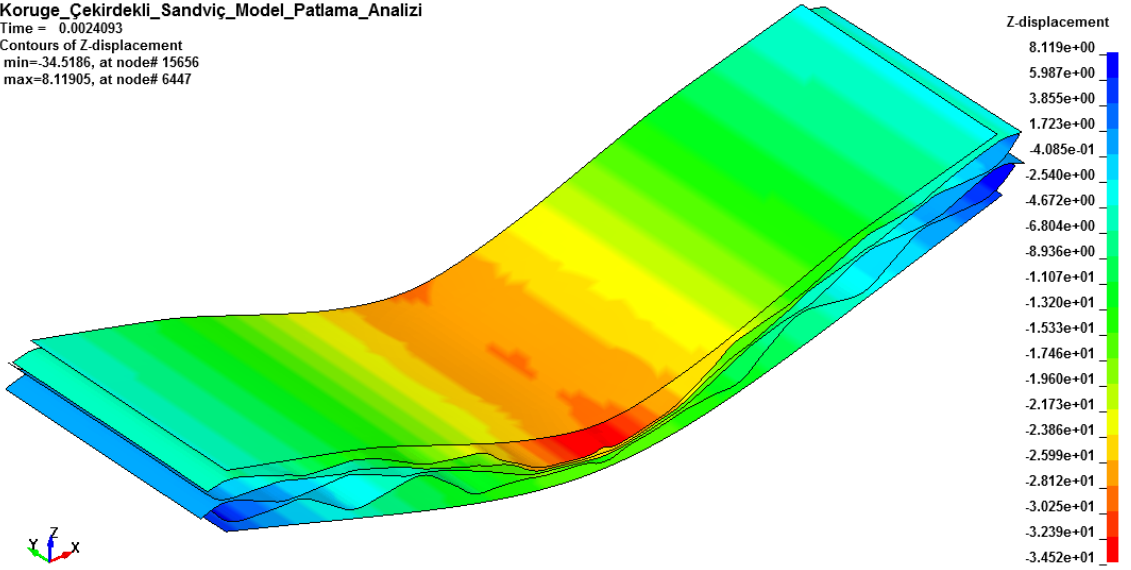
Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de analizlerde elde edilen maksimum deplasman anındaki koruge yapının durumu gösterilmiştir. Yükleme $-Z$ yönünde yapıldığından maksimum deplasman da $-Z$ yönünde gerçekleşti. Z yönündeki deplasman değerlerini gösteren skaladaki renklendirmeden de anlaşılacağı gibi maksimum deplasmanlar yükün uygulandığı orta bölgede meydana geldi.

Koruge_Çekirdekli_Sandviç_Model_Şok_Basıncı_Analizi
Time = 0.003
Contours of Z-displacement
min=-34.9156, at node# 13803
max=8.72352, at node# 7490



Şekil 4.19. Şok basıncı analizi maksimum deplasman anı

Koruge_Çekirdekli_Sandviç_Model_Patlama_Analizi
Time = 0.0024093
Contours of Z-displacement
min=-34.5186, at node# 15656
max=8.11905, at node# 6447



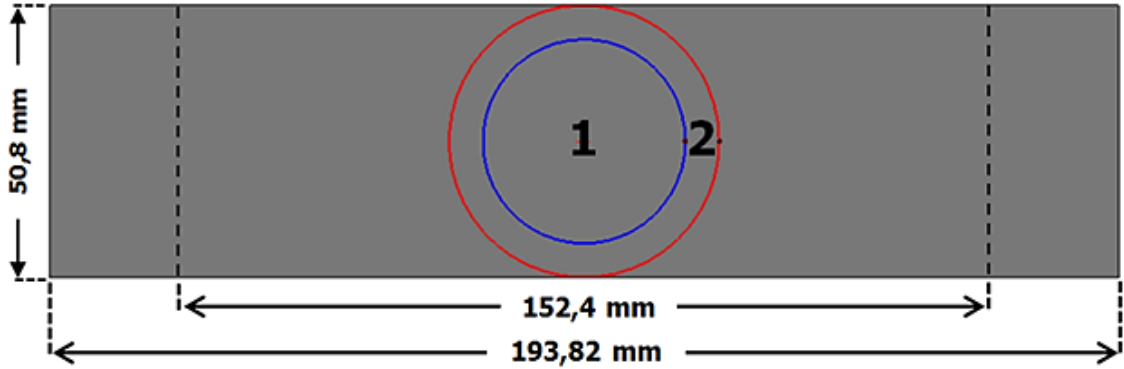
Şekil 4.20. Patlama analizi maksimum deplasman anı

4.2.4. Poliüretan köpük dolgulu sandviç model korelasyon çalışması

Poliüretan köpük dolgulu sandviç modelde ön ve arka plakalar yüzey olarak, plakalar arasındaki poliüretan köpük ise katı olarak modellendi. Bu sebeple sonlu elemanlar ağ örgüsü 4997 kabuk eleman ve 6630 katı eleman ile oluşturuldu. Kabuk elemanın kalınlığı 3,175 milimetre olarak tanımlandı. Köpük modelin kalınlığı 17,71 milimetre

olarak tasarlandı. Poliüretan köpük dolgulu sandviç model Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

Şekil 4.21’de belirtilen iki kesikli çizgi boyunca model sabitlendi. Şok basıncı analizi için Şekil 4.21’de belirtilen 1 numaralı bölgede şok basıncı homojen olarak uygulandı. 2 numaralı bölgede ise yarıçap arttıkça şok basıncı azalacak şekilde basınç uygulandı.

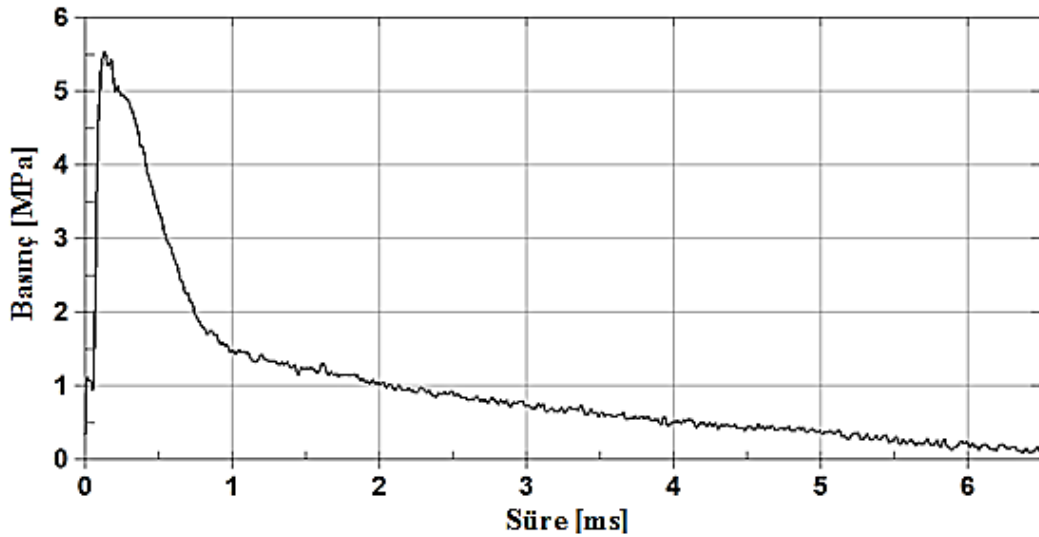


Şekil 4.21. Poliüretan köpük dolgulu sandviç model önden görünüş



Şekil 4.22. Poliüretan köpük dolgulu sandviç model yandan görünüş

Uygulanan basıncın zamana bağlı değişimi Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



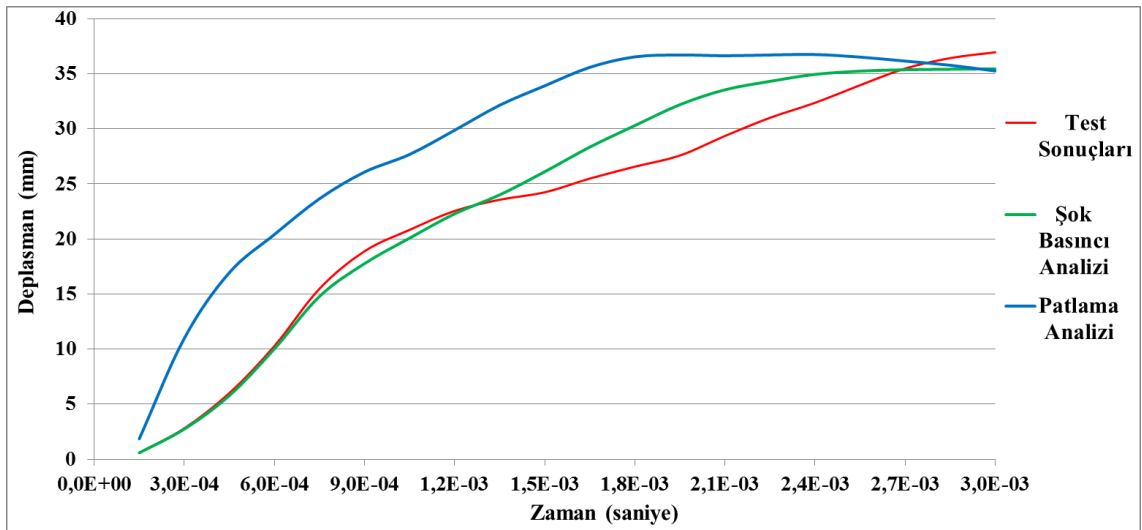
Şekil 4.23. Şok basıncının zamana bağlı değişimi (Yazıcı ve ark. 2014)

Şok basıncı analizinin ardından patlama analizi gerçekleştirildi. Patlama analizi LBE kartı kullanılarak gerçekleştirildi. Patlama türü olarak serbest hava paralanma patlaması seçildi. Patlama analizinin uygulanabilirliğini teyit etmek amacıyla testlerden elde edilen deplasman değerleri göz önüne alınarak analizde kullanılacak patlayıcı kütlesi ve patlayıcının plakaya olan mesafesi için iterasyon çalışması yapıldı. Araç zemini ile yol zemini arasında olması gereken minimum 400 milimetre referans alınarak patlayıcı kütlesi tanımlandı. Tanımlanan patlayıcı kütlesi ve mesafe değiştirilerek patlama analizinde elde edilen maksimum deplasmanların şok basıncı testi ve şok basıncı analizine yakın olması sağlandı. Yapılan iterasyon sonucu Çizelge 4.8’de belirtilen patlayıcı parametreleri kullanıldı. Yapılan iterasyon çalışmaları sonucunda elde edilen patlayıcı parametrelerinin koruge modelde kullanılan patlayıcı parametreleri ile aynı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.8. Patlayıcı parametreleri

Patlayıcı Kütlesi (kg)	Patlayıcının Plakaya Uzaklığı (mm)
1,35	414,3

Şekil 4.24’te şok basıncı testi sonucu elde edilen zamana bağlı deplasman değerleri, şok basıncı analizi ve patlama analizinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.24. Deplasman değerlerinin karşılaştırılması

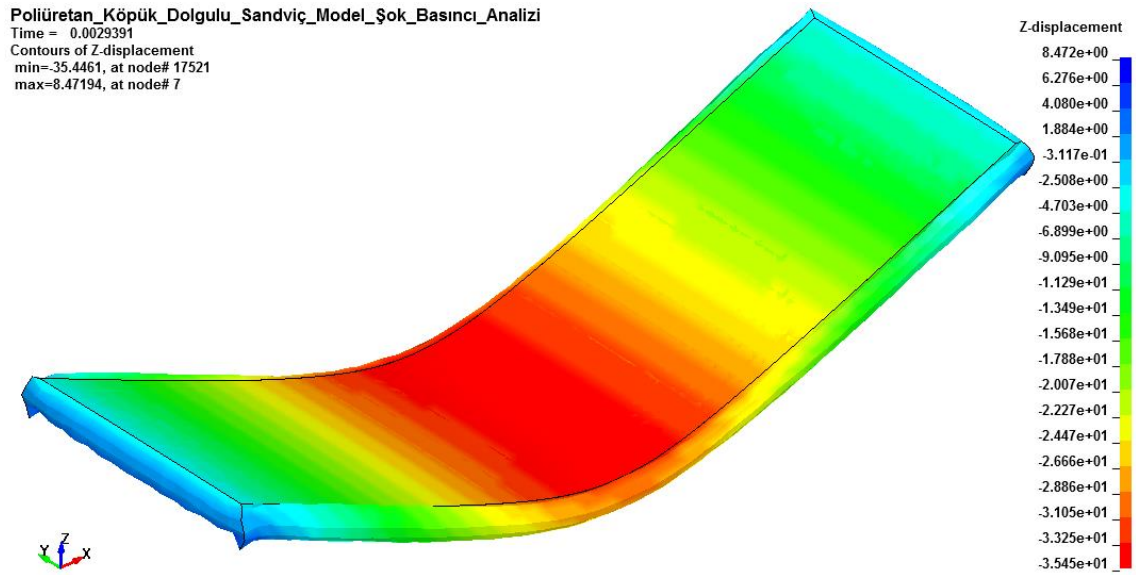
Şekil 4.24’te de görüldüğü gibi zamana bağlı deplasman değerlerinde sapma meydana geldiği görülmektedir. Fakat maksimum deplasman değerlerinin çok yakın olması

poliüretan köpük dolgulu sandviç model analizinin korelasyonu açısından uygun görülmektedir. Çizelge 4.9’da elde edilen maksimum deplasman değerleri yer almaktadır.

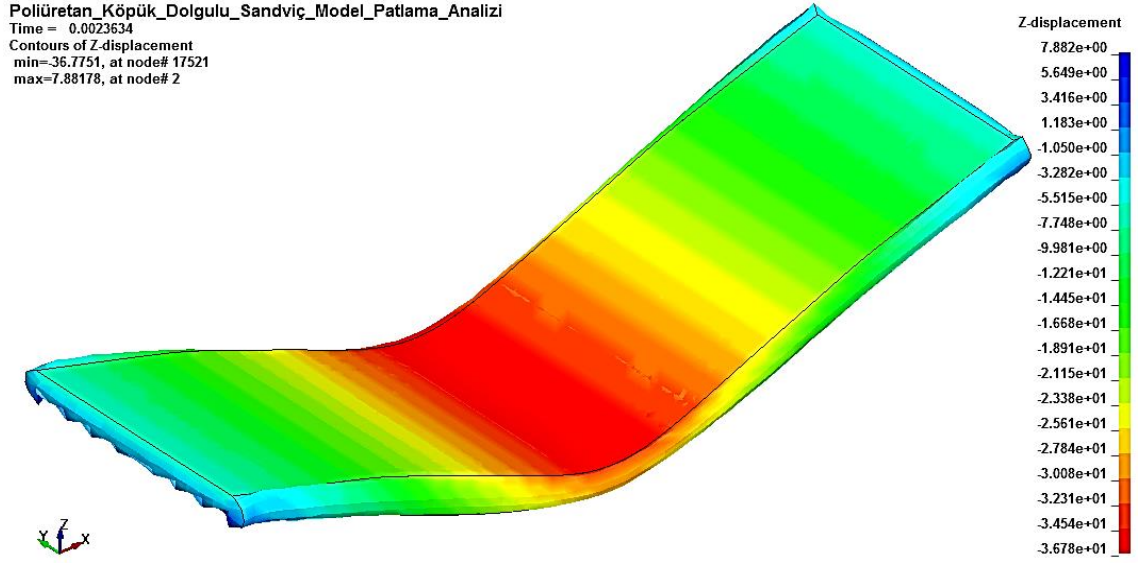
Çizelge 4.9. Poliüretan köpük dolgulu sandviç model maksimum deplasman değerleri

Sonuç Türü	Maksimum Deplasman Değeri (mm)
Test Sonucu	36,95
Şok Basıncı Analizi Sonucu	35,45
Patlama Analizi Sonucu	36,78

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da analizlerde elde edilen maksimum deplasman anındaki plakanın durumu gösterilmiştir. Yükleme $-Z$ yönünde yapıldığından maksimum deplasman da $-Z$ yönünde gerçekleşti. Z yönündeki deplasman değerlerini gösteren skaladaki renklendirmeden de anlaşılacağı gibi maksimum deplasmanlar yükün uygulandığı orta bölgede meydana geldi.



Şekil 4.25. Şok basıncı analizi maksimum deplasman anı

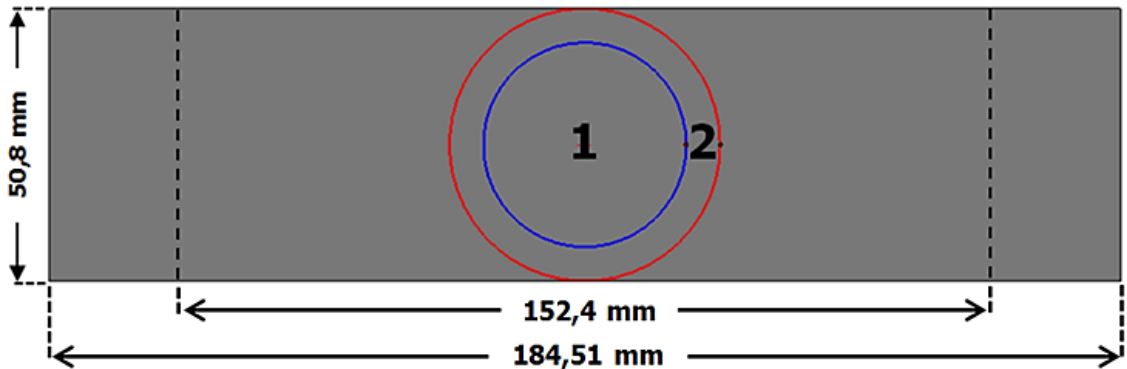


Şekil 4.26. Patlama analizi maksimum deplasman anı

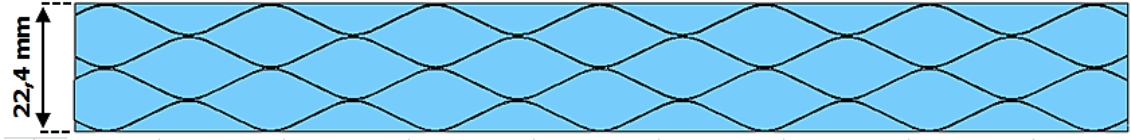
4.2.5. Poliüretan köpük dolgulu koruge model korelasyon çalışması

Koruge yapı yüzey olarak, plakalar arası poliüretan köpük ise katı olarak modellendi. Bu sebeple sonlu elemanlar ağ örgüsü 18 856 kabuk eleman ve 32 852 katı eleman ile oluşturuldu. Kabuk elemanın kalınlığı ön ve arka yüzeylerde 3,175 milimetre, kıvrımlı yüzeylerde ise 0,43688 milimetre olarak tanımlandı. Poliüretan köpük dolgulu koruge model Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de gösterilmiştir.

Şekil 4.27’de belirtilen iki kesikli çizgi boyunca model sabitlendi. Şok basıncı analizi için Şekil 4.27’de belirtilen 1 numaralı bölgede şok basıncı homojen olarak uygulandı. 2 numaralı bölgede ise yarıçap arttıkça şok basıncı azalacak şekilde basınç uygulandı.

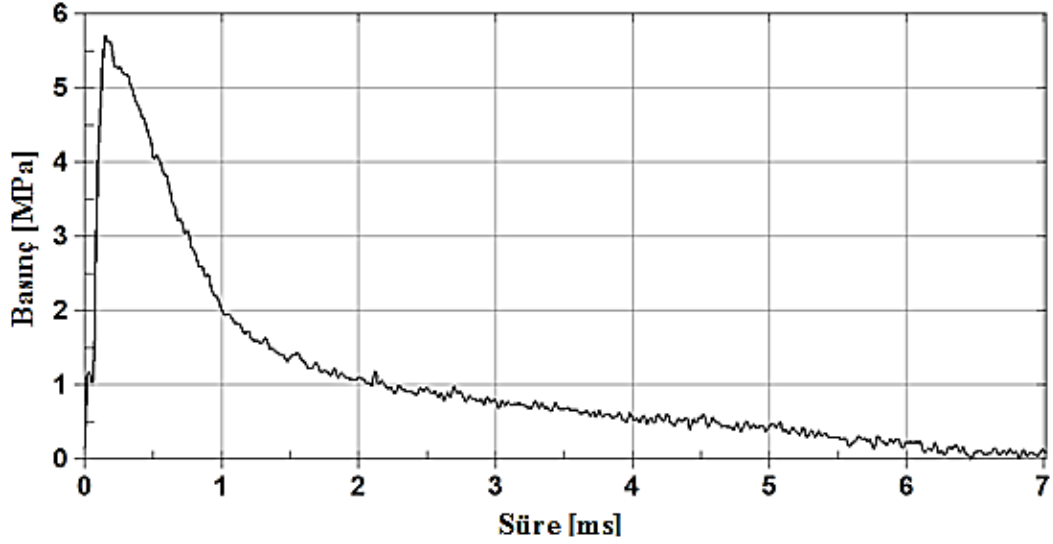


Şekil 4.27. Poliüretan köpük dolgulu koruge model önden görünüş



Şekil 4.28. Poliüretan köpük dolgu koruge model yandan görünüş

Uygulanan basıncın zamana bağlı değişimi Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



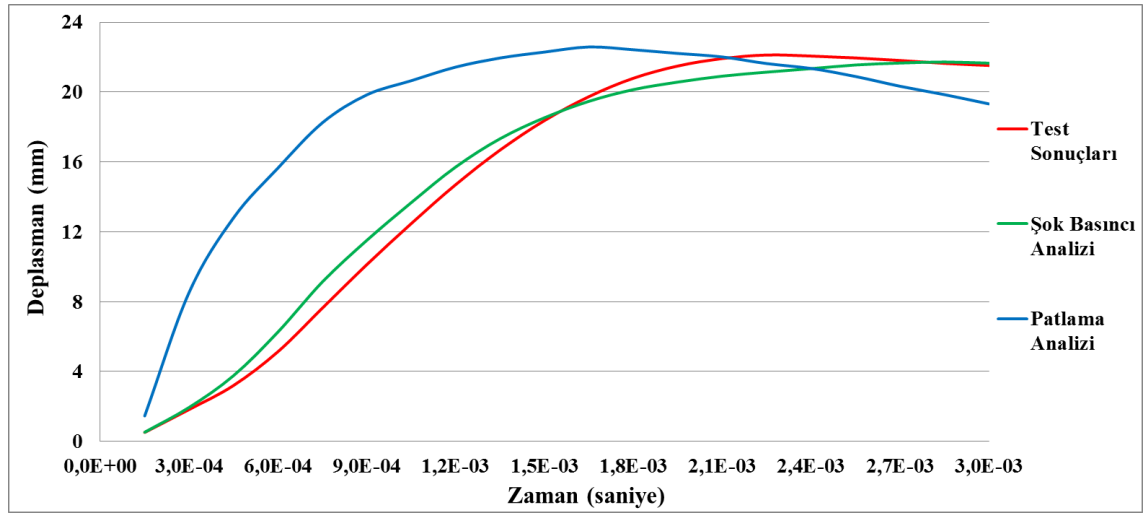
Şekil 4.29. Şok basıncının zamana bağlı değişimi (Yazıcı ve ark. 2014)

Şok basıncı analizinin ardından patlama analizi gerçekleştirildi. Patlama analizi LBE kartı kullanılarak gerçekleştirildi. Patlama türü olarak serbest hava paralanma patlaması seçildi. Patlama analizinin uygulanabilirliğini teyit etmek amacıyla testlerden elde edilen deplasman değerleri göz önüne alınarak analizde kullanılacak patlayıcı kütlesi ve patlayıcının plakaya olan mesafesi için iterasyon çalışması yapıldı. Araç zemini ile yol zemini arasında olması gereken minimum 400 milimetre referans alınarak patlayıcı kütlesi tanımlandı. Tanımlanan patlayıcı kütlesi ve mesafe değiştirilerek patlama analizinde elde edilen maksimum deplasmanların şok basıncı testi ve şok basıncı analizine yakın olması sağlandı. Yapılan iterasyon sonucu Çizelge 4.10’da belirtilen patlayıcı parametreleri kullanıldı. Görüldüğü gibi patlayıcı parametreleri koruge model ve sandviç model ile aynıdır.

Çizelge 4.10. Patlayıcı parametreleri

Patlayıcı Kütlesi (kg)	Patlayıcının Plakaya Uzaklığı (mm)
1,35	414,3

Şekil 4.30'da şok basıncı testi sonucu elde edilen zamana bağlı deplasman değerleri, şok basıncı analizi ve patlama analizinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.



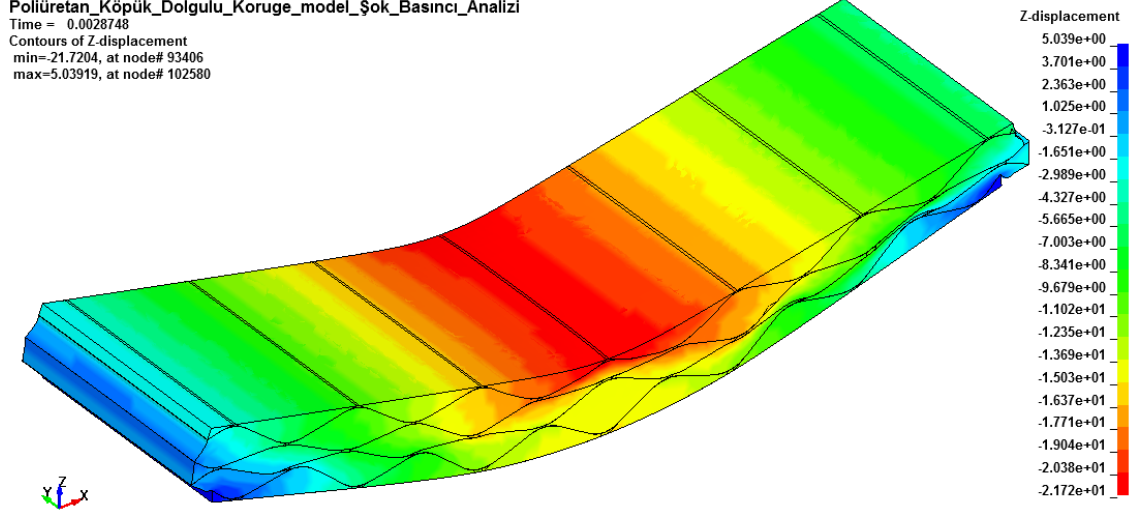
Şekil 4.30. Deplasman değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.30'da da görüldüğü gibi şok basıncı testi ile şok basıncı analizi değerlerinin uyumlu olduğu, patlama analizinde ise deplasman değerlerinin meydana geldiği süreler de sapma meydana geldiği görülmektedir. Fakat maksimum deplasman değerlerinin çok yakın olması poliüretan köpük dolgulu koruge model analizinin korelasyonu açısından uygun görülmektedir. Çizelge 4.11'de elde edilen maksimum deplasman değerleri yer almaktadır.

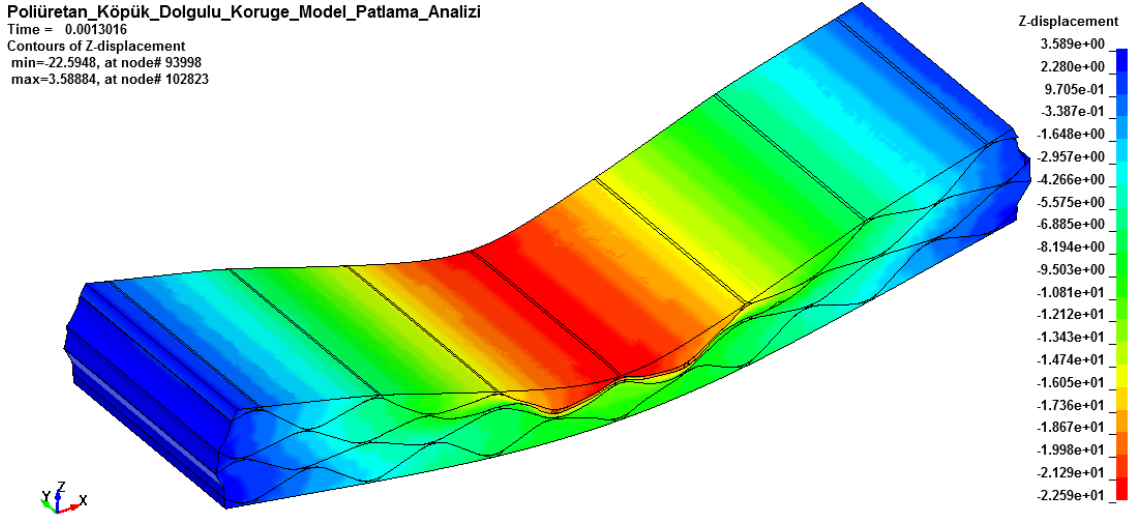
Çizelge 4.11. Poliüretan köpük dolgulu koruge model maksimum deplasman değerleri

Sonuç Türü	Maksimum Deplasman Değeri (mm)
Test Sonucu	22,12
Şok Basıncı Analizi Sonucu	21,72
Patlama Analizi Sonucu	22,59

Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de analizlerde elde edilen maksimum deplasman anındaki plakanın durumu gösterilmiştir. Yükleme $-Z$ yönünde yapıldığından maksimum deplasman da $-Z$ yönünde gerçekleşti. Z yönündeki deplasman değerlerini gösteren skaladaki renklendirmeden de anlaşılacağı gibi maksimum deplasmanlar yükün uygulandığı orta bölgede meydana geldi.



Şekil 4.31. Şok basıncı analizi maksimum deplasman anı



Şekil 4.32. Patlama analizi maksimum deplasman anı

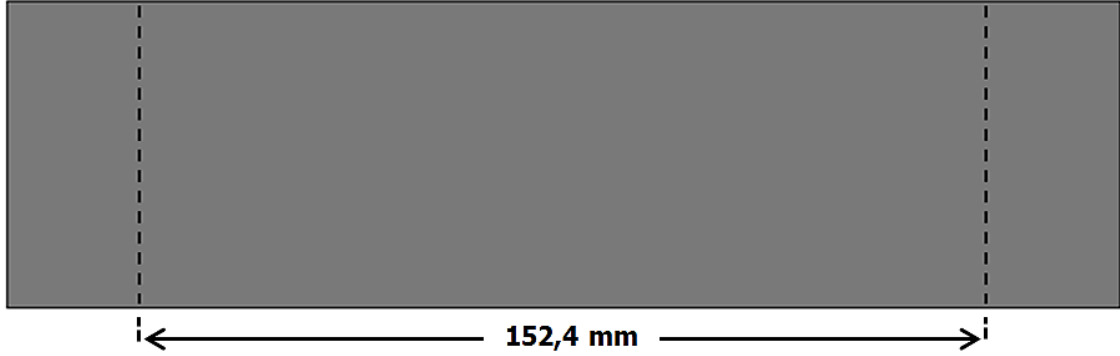
4.3. Viskoelastik Jel Dolgulu Koruge Model Analizleri

Farklı konfigürasyonlarda yapılan korelasyon çalışmalarında da görüldüğü gibi patlama analizi ile elde edilen maksimum deplasmanlar, şok basıncı testi ve şok basıncı analizi

sonuçları ile elde edilen maksimum deplasmanlara yakın olduğu görüldü. Bu sebeple viskoelastik jel dolgulu koruge modeller ile yapılacak patlama analizi çalışmalarından elde edilecek sonuçların şok basıncı testi ve analizi ile yakınsak sonuçlar vereceği ön görülmüştür.

4.3.1. Viskoelastik jel sonlu elemanlar modelleri

Kullanılacak minimum malzeme ile maksimum enerji Emilimi sağlanması amaçlandığından viskoelastik jel dolgulu koruge modeller için beş farklı model oluşturuldu. Beş model için patlama analizi gerçekleştirildi. Beş model Şekil 4.33'te gösterilen iki kesikli çizgi boyunca sabitlendi.



Şekil 4.33. Sınır koşullarının uygulanması

4.3.2. Patlama analizi

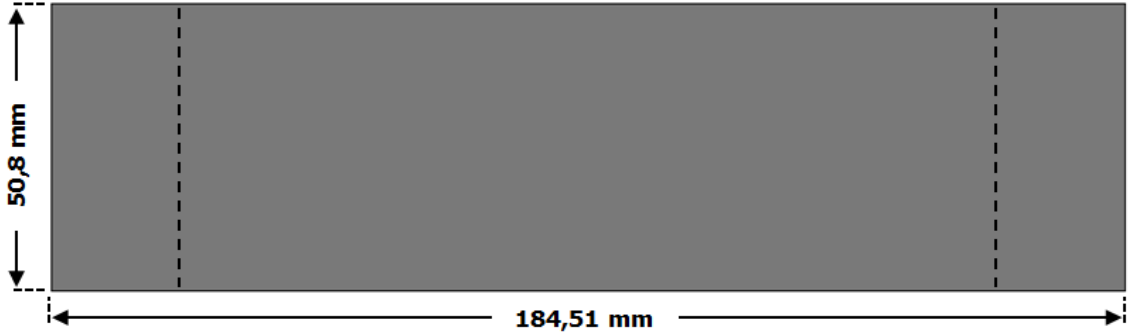
Patlama analizi LBE kartı kullanılarak gerçekleştirildi. Patlama türü, yapılan korelasyon çalışmalarında da kullanılan serbest hava paralanma patlaması olarak seçildi. Koruge model, sandviç model ve poliüretan köpük dolgulu koruge modelde kullanılan patlayıcı parametreleri ile elde edilen maksimum deplasmanlar şok basıncı testi ve şok basıncı analizi ile yakın sonuçlar elde etmeyi sağladı. Bu sebeple aynı patlayıcı parametreleri viskoelastik jel dolgulu koruge modellerde de kullanıldı. Kullanılan patlayıcı parametreleri Çizelge 4.12'de belirtilmektedir.

Çizelge 4.12. Patlayıcı parametreleri

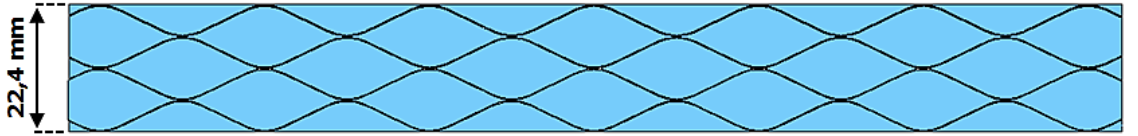
Patlayıcı Kütlesi (kg)	Patlayıcının Plakaya Uzaklığı (mm)
1,35	414,3

4.3.3. Viskoelastik jel dolgulu koruge model analizi

Viskoelastik jel dolgulu koruge modelde, plakalar arası bütün bölgeler viskoelastik jel ile dolduruldu. Koruge yapı yüzey olarak, plakalar arasındaki viskoelastik jel ise katı olarak modellendi. Sonlu elemanlar ağ örgüsü 18 856 kabuk eleman ve 36 852 katı eleman ile oluşturuldu. Kabuk elemanın kalınlığı ön ve arka yüzeylerde 3,175 milimetre, kıvrımlı yüzeylerde ise 0,43688 milimetre olarak tanımlandı. Viskoelastik jel dolgulu koruge model Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te gösterilmiştir.

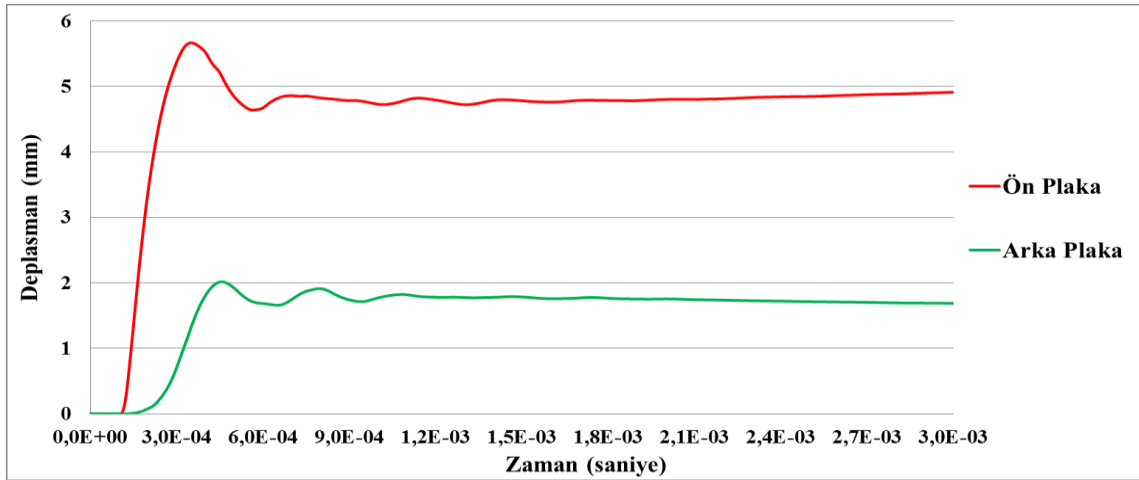


Şekil 4.34. Viskoelastik jel dolgulu koruge model önden görünüş



Şekil 4.35. Viskoelastik jel dolgulu koruge model yandan görünüş

Gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen deplasman değerleri Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Deplasmanlar ön ve arka plakanın orta düğüm noktalarından alındı.



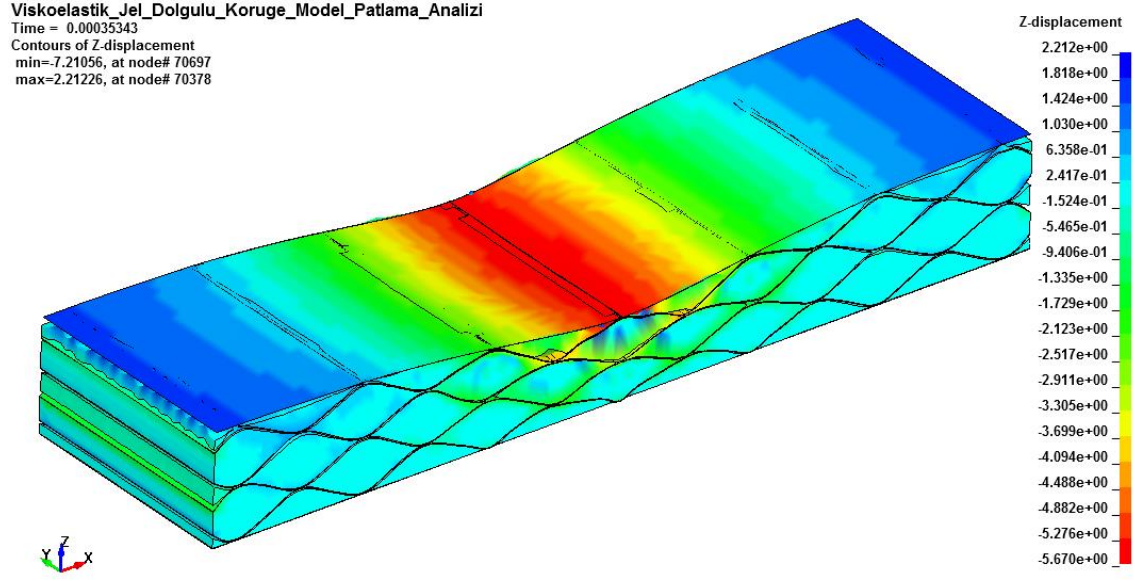
Şekil 4.36. Viskoelastik jel dolgulu koruge model deplasman değerleri

Şekil 4.36'da da görüleceği gibi patlamanın yarattığı şok dalgasını karşılayan ön plakadaki deplasmanlar arka plakaya göre daha yüksek çıkmaktadır. Ön ve arka plakada oluşan maksimum deplasman değerleri Çizelge 4.13'te görülmektedir.

Çizelge 4.13. Viskoelastik jel dolgulu koruge model maksimum deplasman değerleri

Ölçüm Noktası	Maksimum Deplasman Değeri (mm)
Ön Plaka Orta Düğüm Noktası	5,67
Arka Plaka Orta Düğüm Noktası	2,02

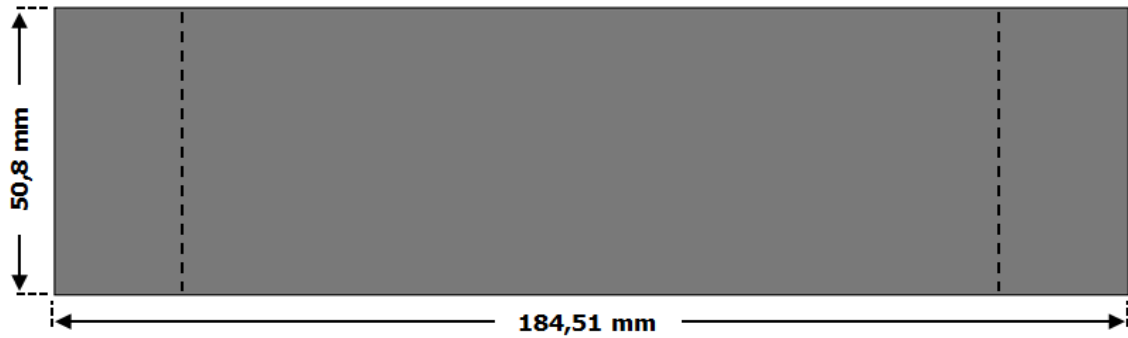
Ön yapıda maksimum deplasmanın olduğu an yapının aldığı görünüm Şekil 4.37’de gösterilmiştir.



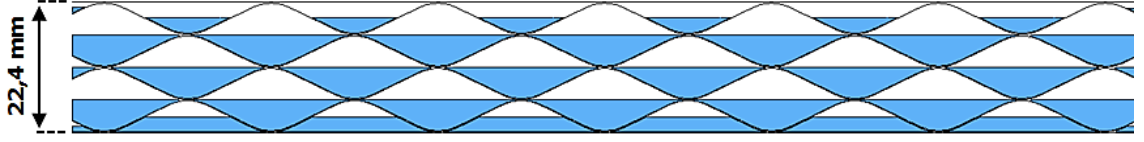
Şekil 4.37. Patlama analizi ön yapı maksimum deplasman anı

4.3.4. 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model analizi

1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge modelde, plakalar arası bütün bölgeler boşluğun yarısı kadar viskoelastik jel ile dolduruldu. Koruge yapı yüzey olarak, plakalar arasındaki viskoelastik jel ise katı olarak modellendi. Sonlu elemanlar ağ örgüsü 18 856 kabuk eleman ve 19 860 katı eleman ile oluşturuldu. Kabuk elemanın kalınlığı ön ve arka yüzeylerde 3,175 milimetre, kıvrımlı yüzeylerde ise 0,43688 milimetre olarak tanımlandı. 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da gösterilmiştir.

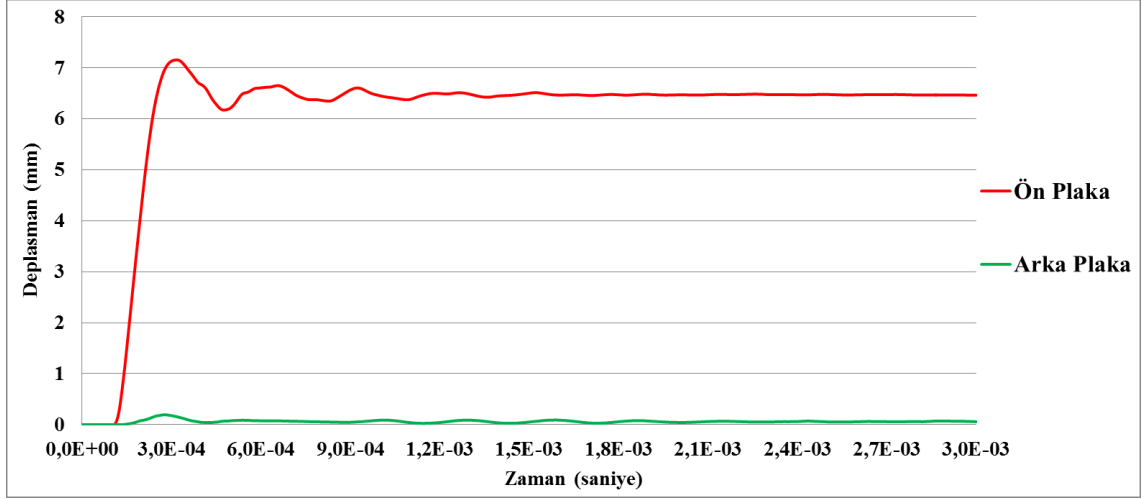


Şekil 4.38. 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model önden görünüş



Şekil 4.39. 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model yandan görünüş

Gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen deplasman değerleri Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Deplasmanlar ön ve arka plakanın orta düğüm noktalarından alındı.



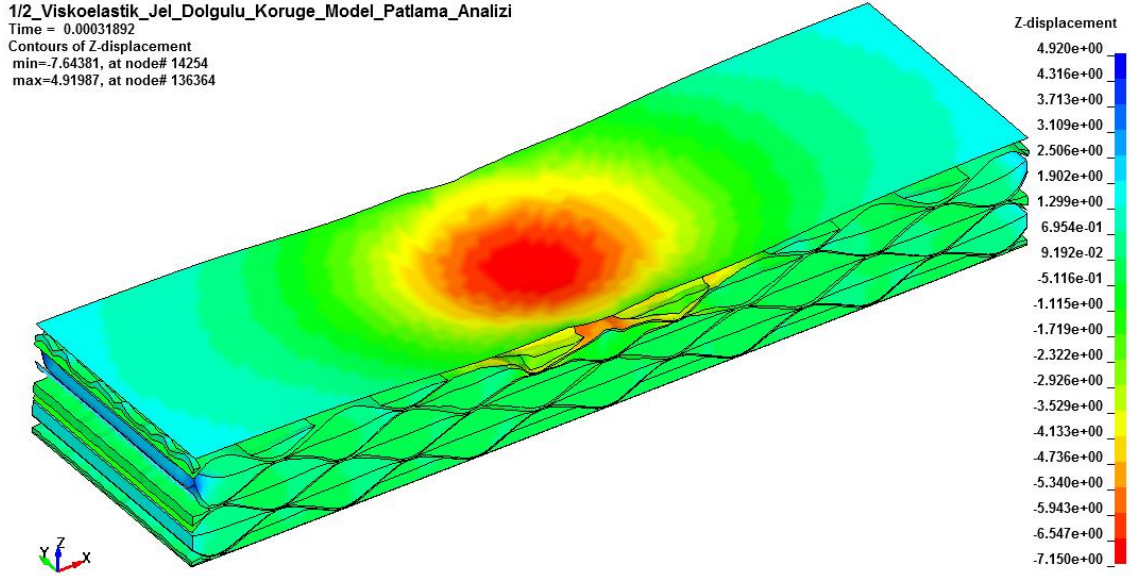
Şekil 4.40. 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model deplasman değerleri

Şekil 4.40'ta da görüleceği gibi patlamanın yarattığı şok dalgasını karşılayan ön plakadaki deplasmanlar arka plakaya göre daha yüksek çıkmaktadır. Ön ve arka plakada oluşan maksimum deplasman değerleri Çizelge 4.14'te görülmektedir.

Çizelge 4.14. 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model maksimum deplasman değerleri

Ölçüm Noktası	Maksimum Deplasman Değeri (mm)
Ön Plaka Orta Düğüm Noktası	7,15
Arka Plaka Orta Düğüm Noktası	0,194

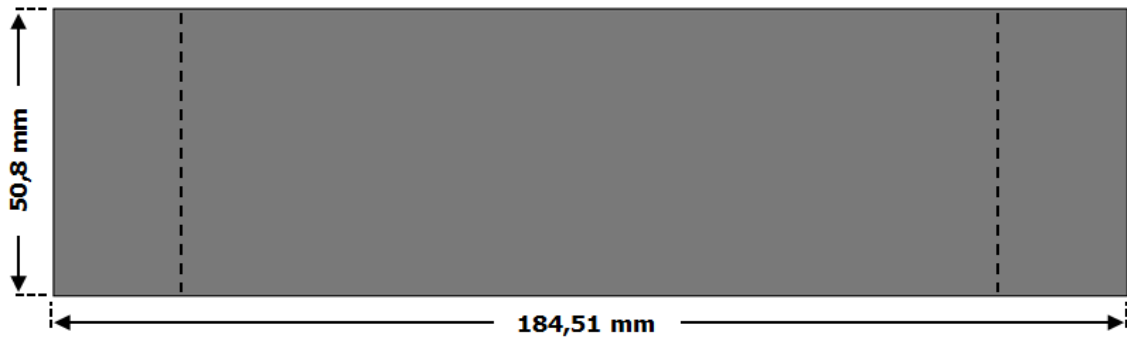
Ön yapıda maksimum deplasmanın olduğu an yapının aldığı görünüm Şekil 4.41’de gösterilmiştir.



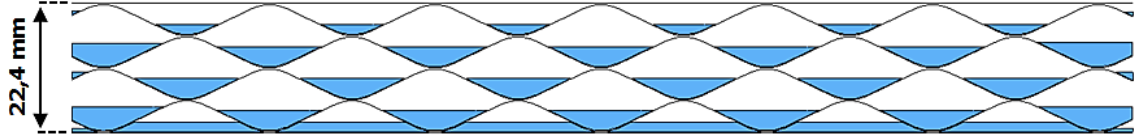
Şekil 4.41. Patlama analizi ön yapı maksimum deplasman anı

4.3.5. 1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge model analizi

1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge modelde, plakalar arası bütün bölgeler boşluğun 1/3’ü kadar viskoelastik jel ile dolduruldu. Koruge yapı yüzey olarak, plakalar arasındaki viskoelastik jel ise katı olarak modellendi. Sonlu elemanlar ağ örgüsü 18 856 kabuk eleman ve 13 984 katı eleman ile oluşturuldu. Kabuk elemanın kalınlığı ön ve arka yüzeylerde 3,175 milimetre, kıvrımlı yüzeylerde ise 0,43688 milimetre olarak tanımlandı. 1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge model Şekil 4.42 ve Şekil 4.43’te gösterilmiştir.

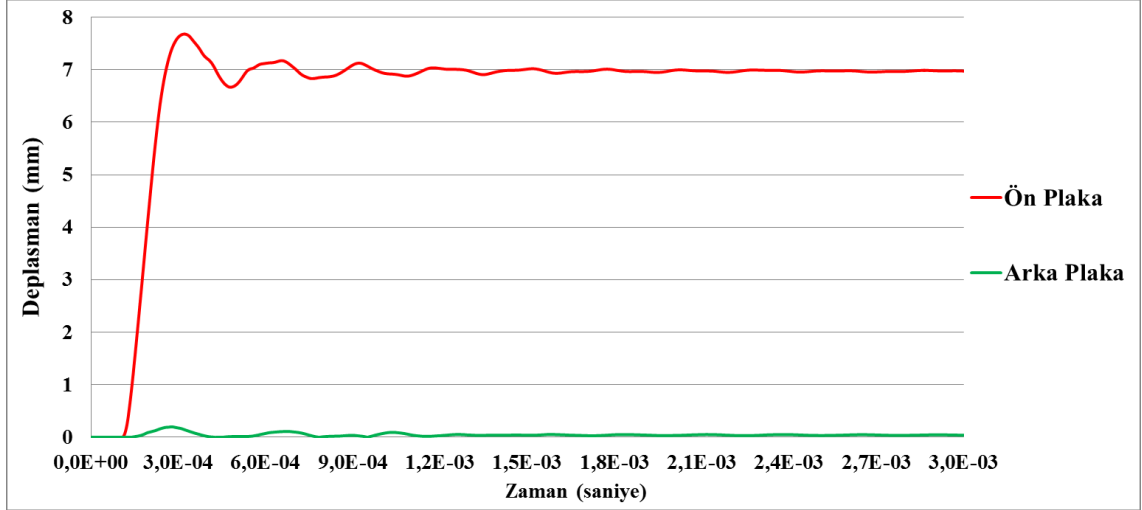


Şekil 4.42. 1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge model önden görünüş



Şekil 4.43. 1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge model yandan görünüş

Gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen deplasman değerleri Şekil 4.44'te gösterilmiştir. Deplasmanlar ön ve arka plakanın orta düğüm noktalarından alındı.



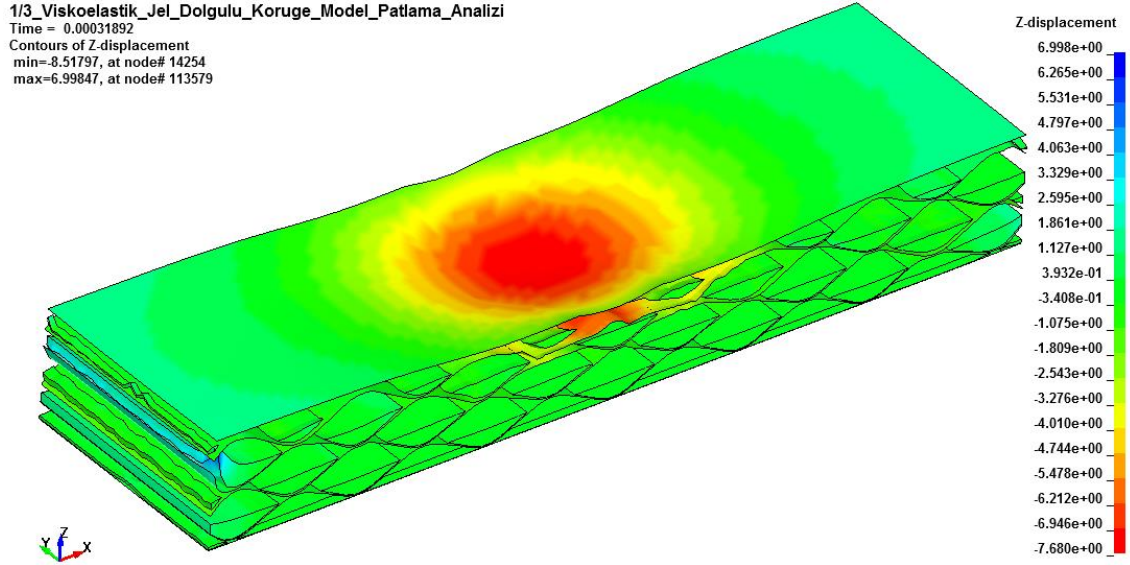
Şekil 4.44. 1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge model deplasman değerleri

Şekil 4.44'te de görüleceği gibi patlamanın yarattığı şok dalgasını karşılayan ön plakadaki deplasmanlar arka plakaya göre daha yüksek çıkmaktadır. Ön ve arka plakada oluşan maksimum deplasman değerleri Çizelge 4.15'te görülmektedir.

Çizelge 4.15. 1/3 viskoelastik jel dolgulu koruge model maksimum deplasman değerleri

Ölçüm Noktası	Maksimum Deplasman Değeri (mm)
Ön Plaka Orta Düğüm Noktası	7,68
Arka Plaka Orta Düğüm Noktası	0,199

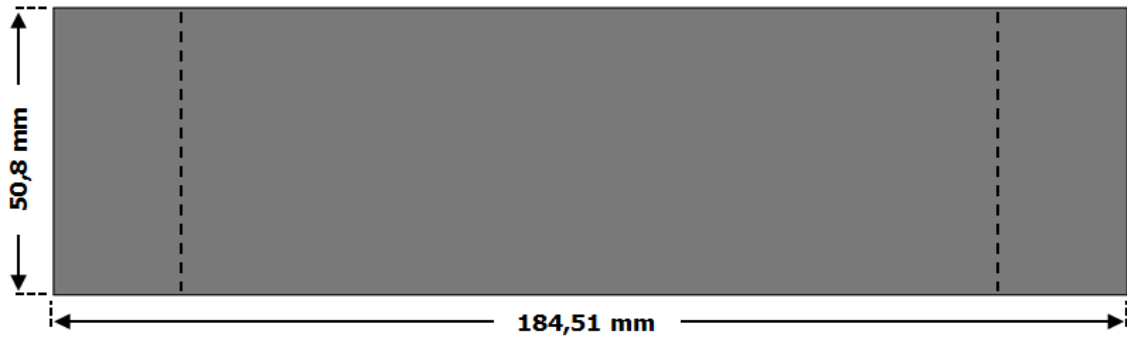
Ön yapıda maksimum deplasmanın olduğu an yapının aldığı görünüm Şekil 4.45'te gösterilmiştir.



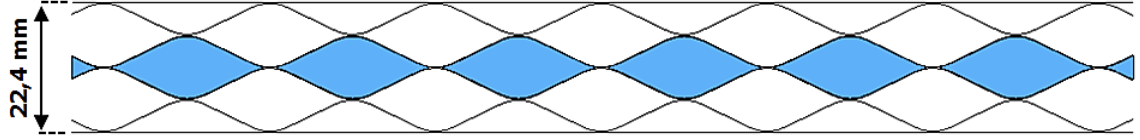
Şekil 4.45. Patlama analizi ön yapı maksimum deplasman anı

4.3.6. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge model analizi

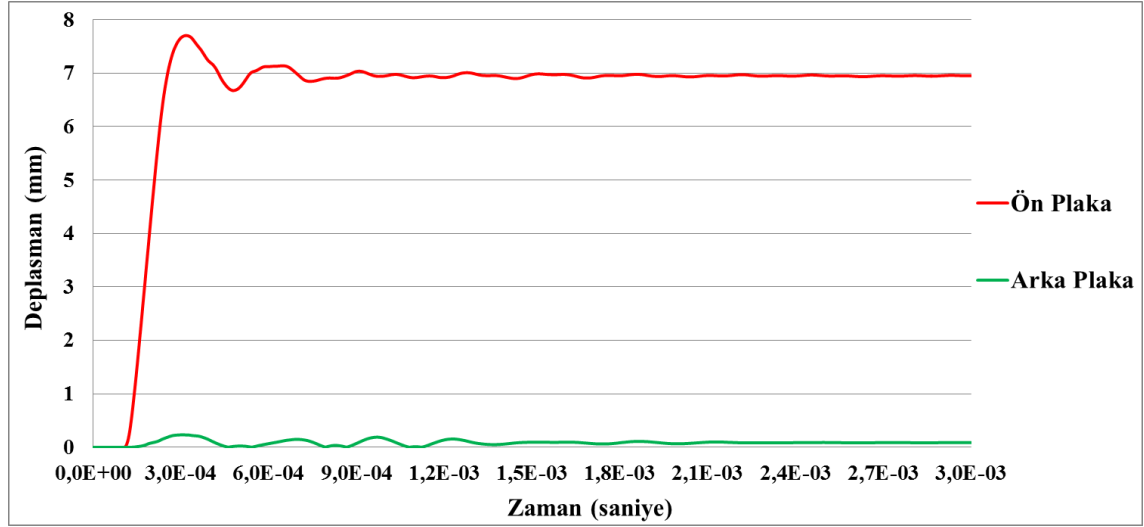
Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge modelde, sadece orta bölgedeki plakalar arası viskoelastik jel ile dolduruldu. Koruge yapı yüzey olarak, plakalar arasındaki viskoelastik jel ise katı olarak modellendi. Sonlu elemanlar ağ örgüsü 18 856 kabuk eleman ve 11 759 katı eleman ile oluşturuldu. Kabuk elemanın kalınlığı ön ve arka yüzeylerde 3,175 milimetre, kıvrımlı yüzeylerde ise 0,43688 milimetre olarak tanımlandı. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge model Şekil 4.46 ve Şekil 4.47'de gösterilmiştir.



Şekil 4.46. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge model önden görünüş



Şekil 4.47. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge model yandan görünüş
Gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen deplasman değerleri Şekil 4.48’de gösterilmiştir. Deplasmanlar ön ve arka plakanın orta düğüm noktalarından alındı.

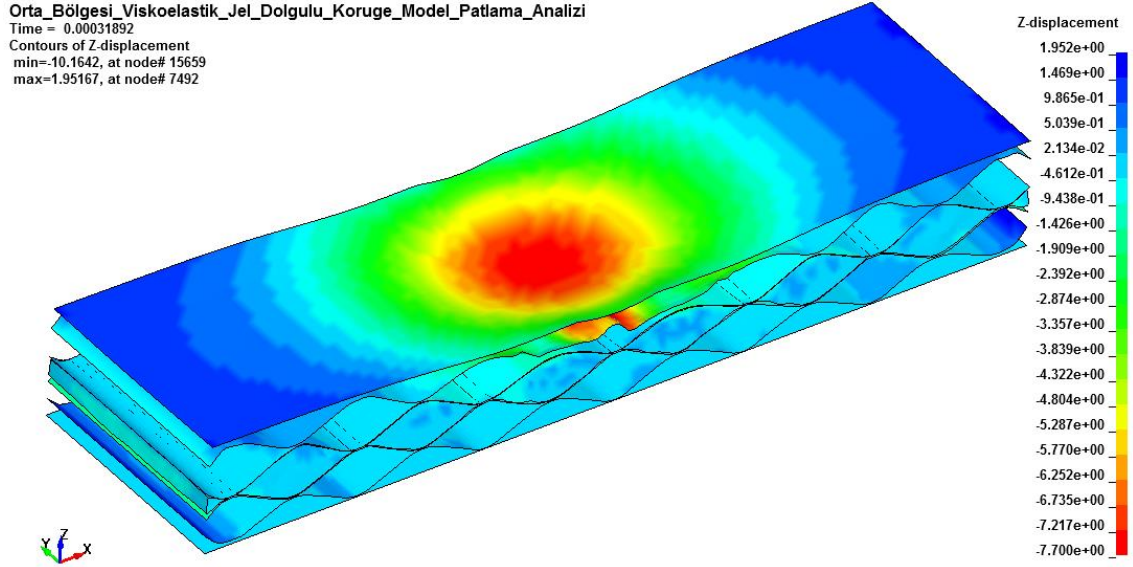


Şekil 4.48. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge model deplasman değerleri
Şekil 4.48’de de görüleceği gibi patlamanın yarattığı şok dalgasını karşılayan ön plakadaki deplasmanlar arka plakaya göre daha yüksek çıkmaktadır. Ön ve arka plakada oluşan maksimum deplasman değerleri Çizelge 4.16’da görülmektedir.

Çizelge 4.16. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu koruge model maksimum deplasman değerleri

Ölçüm Noktası	Maksimum Deplasman Değeri (mm)
Ön Plaka Orta Düğüm Noktası	7,7
Arka Plaka Orta Düğüm Noktası	0,234

Ön yapıda maksimum deplasmanın olduğu an yapının aldığı görünüm Şekil 4.49’da gösterilmiştir.

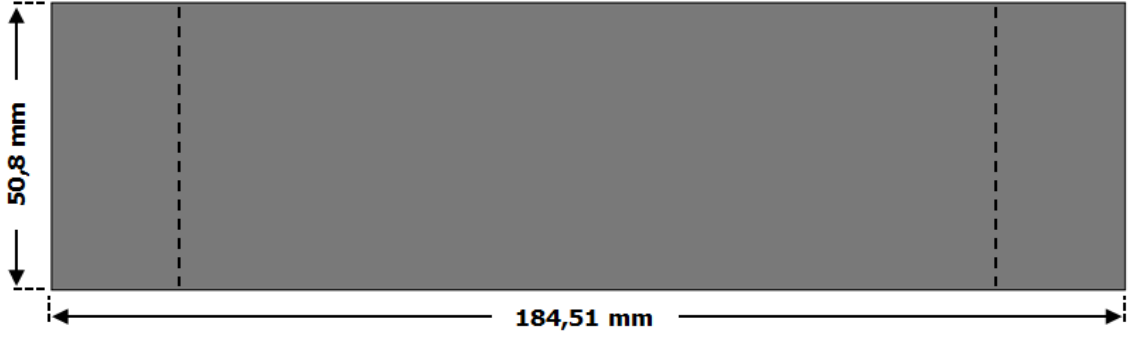


Şekil 4.49. Patlama analizi ön yapı maksimum deplasman anı

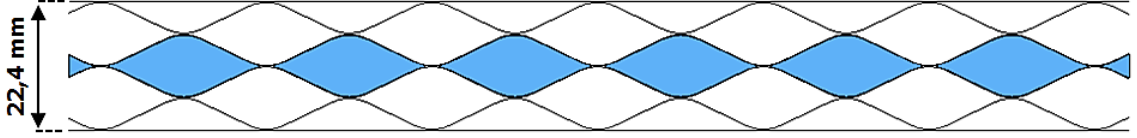
4.3.7. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge model analizi

Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge modelde, sadece orta bölgedeki plakalar arası viskoelastik jel ile dolduruldu. Viskoelastik jelleri saran koruge plakalarda kenarlara ve birbirlerine eşit mesafede eşit büyüklükte delikler açıldı. Patlamanın etkisine bağlı olarak bu deliklerden jelin hareket etmesinin deplasmana nasıl etki edeceği görülmek istendi.

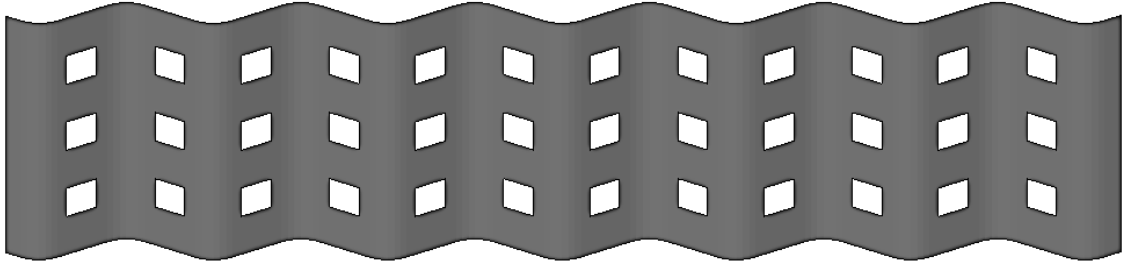
Koruge yapı yüzey olarak, plakalar arasındaki viskoelastik jel ise katı olarak modellendi. Sonlu elemanlar ağ örgüsü 18 208 kabuk eleman ve 11 759 katı eleman ile oluşturuldu. Kabuk elemanın kalınlığı ön ve arka yüzeylerde 3,175 milimetre, kıvrımlı yüzeylerde ise 0,43688 milimetre olarak tanımlandı. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge model Şekil 4.50, Şekil 4.51 ve Şekil 4.52’de gösterilmiştir.



Şekil 4.50. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge model önden görünüşü

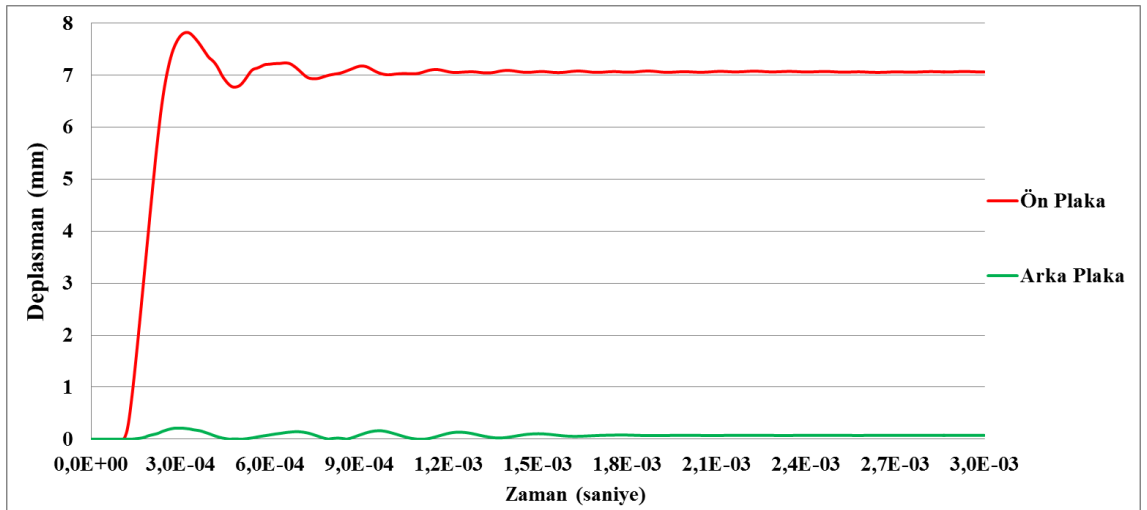


Şekil 4.51. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge model yandan görünüşü



Şekil 4.52. Delikli koruge yapı

Gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen deplasman değerleri Şekil 4.53'te gösterilmiştir. Deplasmanlar ön ve arka plakanın orta düğüm noktalarından alındı.



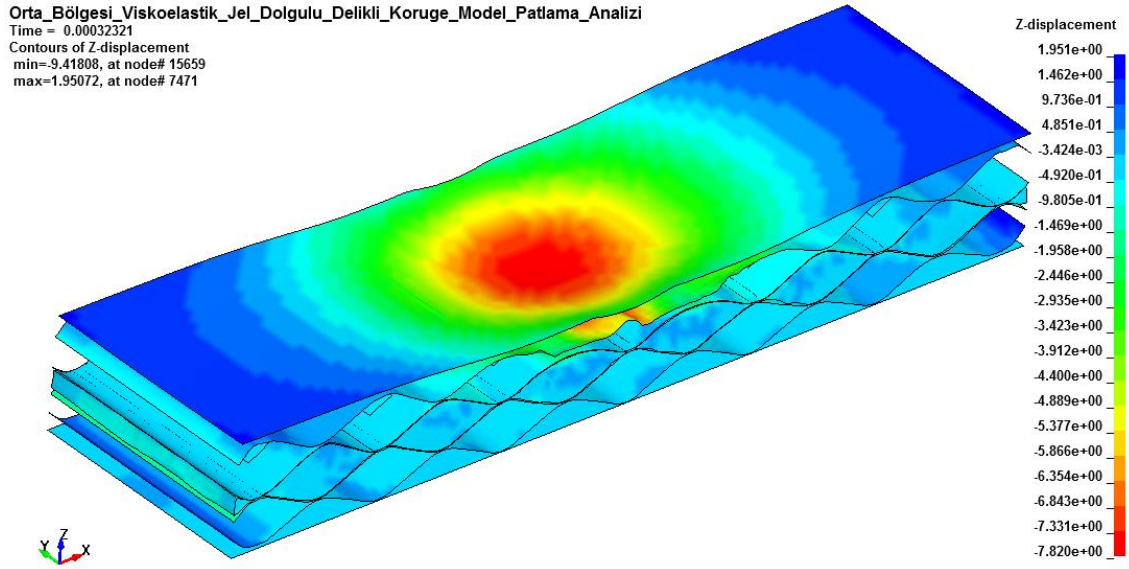
Şekil 4.53. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge model deplasman değerleri

Şekil 4.53'te de görüleceği gibi patlamanın yarattığı şok dalgasını karşılayan ön plakadaki deplasmanlar arka plakaya göre daha yüksek çıkmaktadır. Ön ve arka plakada oluşan maksimum deplasman değerleri Çizelge 4.17'de görülmektedir.

Çizelge 4.17. Orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge model maksimum deplasman değerleri

Ölçüm Noktası	Maksimum Deplasman Değeri (mm)
Ön Plaka Orta Düğüm Noktası	7,82
Arka Plaka Orta Düğüm Noktası	0,212

Ön yapıda maksimum deplasmanın oluştuğu an yapının aldığı görünüm Şekil 4.54'de gösterilmiştir.



Şekil 4.54. Patlama analizi ön yapı maksimum deplasman anı

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Mayın patlamasına bağlı olarak, zırhlı araç içerisindeki mürettebat bölümü zemininin deformasyona uğraması mürettebatın yaralanmasına ve ölümüne sebebiyet verebilir. Bu sebeple mayın patlamasına karşı dayanıklı zırh üretimi gerçekleştirilmelidir. Patlama analizleri mayın patlamasına karşı daha dayanıklı zırh üretme açısından önem teşkil etmektedir.

Viskoelastik jel dolgulu koruge modeller ile yapılan analiz çalışmalarında yapıların hem n hem de arka bölgelerinden deplasman değerleri alındı. Bir yapının enerji sönümleme kabiliyeti n yapıda meydana gelen deplasman ile arka yapıda meydana gelen deplasman arasındaki fark ile açıklanabilir. Bu farkın en fazla olduğu yapının orta bölgesi viskoelastik jel dolgulu delikli koruge modelde olduğu görülmektedir. Bu sebeple bu modelin enerji sönümleme kabiliyetinin en iyi olduğu söylenebilir. Fakat yapılan çalışmaların amacı enerji sönümleme açısından en iyi modeli bulmak değildir. Asıl amaç mayın patlaması sırasında araç içindeki mürettebatın en az zararlı olayı atlattırmasıdır. Mürettebatın olayı en az zararlı atlatabilmesi için buldukları bölümün zemininin deformasyonu minimum seviye olmalıdır. Yapılan çalışmalarda oluşturulan modellerin arka plaka bölgesi, araç zeminini temsil etmektedir. Bu sebeple en az deformasyonu tespit etmek amacıyla modeller arasında arka bölge deplasmanları karşılaştırıldı. Yapılan alışmalar sonucunda arka bölge deplasmanı en az olan yapı 0,194 milimetre ile 1/2 viskoelastik jel dolgulu koruge model oldu.

Yüksek lisans tezi kapsamında viskoelastik jel ile yapılan çalışmalar analiz aşamasında tamamlandı. Analizlerin doğruluğu, yapılan korelasyon çalışmaları göz önüne alınarak verildi. Zırh sistemlerinin üretime geçebilmesi için analiz çalışmaları sonrasında testlerinin de gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bir sonraki çalışma olarak viskoelastik jel üretimi yapılıp testlerinin gerçekleştirilmesi n görüldü.

KAYNAKLAR

A.C.B., 1886a. Da Vinci's Tank: A War Machine for the Duke of Milan. Davincilife.com

A.C.B., 1886b. Armoured Car. <https://www.da-vinci-inventions.com>

Adams, T., 2013. Reviewing the Development of Metallic Foams with John Banhart. <https://www.advancedsciencenews.com/reviewing-the-development-of-metallic-foams-with-john-banhart/>

Anonim, 2005. WarWheels.Net- "Spook" Mine Protected Combat Vehicle (MPCV) Index. <http://www.warwheels.net/MPCVspookINDEX.html>

Anonim, 2014. LS - DYNA ® Analysis for Structural Mechanics. 113s.

Anonim, 2016. Leopard 2 A6M | German Armed Forces (Main Battle tank) | Combat-Camera-Europe | Flickr. <https://www.flickr.com/photos/pzbrig15/27484755845/in/photostream/>

Anonim, 2018a. Günümüzde Kullanılan Zırhlar, Çeşitleri ve Malzemeleri | Savunma Sanayi. <https://www.savunmasanayi.org/gunumuzde-kullanilan-zirhlar-ve-cesitleri/>

Anonim, 2018b. Köpük Metal Nedir? - ÇEYREK MÜHENDİS Çeyrek Mühendis. <https://www.ceyrekmuhendis.com/kopuk-metal-nedir/>

Anonim, 2020a. Mine Protected Combat Vehicle - Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Mine_Protected_Combat_Vehicle

Anonim, 2020b. Wikipedia: Metal Foam. https://en.wikipedia.org/wiki/Metal_foam

Banhart, J. 2000. Manufacturing routes for metallic foams. JOM, 52(12): 22–27. <https://doi.org/10.1007/s11837-000-0062-8>

Banhart, J. 2001. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46(6): 559–632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)

Benson, D. J. 2009. The History of LS-DYNA® - LS-DYNA and d3VIEW Blog. Livermore Software Technology Corporation. <https://www.yumpu.com/en/document/read/27933094/the-history-of-ls-dynaar-ls-dyna-and-d3view-blog>

Bisyk, S. P., Chepkov, I. B., Vaskivskyi, M. I., Davydovskyi, L. S., Slyvinskyi, O. A., Aristarkhov, O. M. 2019. Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysys. *Озброєння Та Військова Техніка*, 21(1): 22–31. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.1\(21\)](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.1(21)).

Breeze, J., Hunt, N., Gibb, I., James, G., Hepper, A., Clasper, J. 2013. Experimental penetration of fragment simulating projectiles into porcine tissues compared with simulants. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 20(4): 296-299. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2012.12.007>

British Army, 2015. Challenger 2 main battle tank. Army.mod.uk. <https://www.army-technology.com/projects/leopard/>

Datoc, D. 2010. Finite element analysis and modeling of a .38 lead round nose ballistic gelatin test. Master's Thesis and Project Reports, Faculty of California Polytechnic State University, Graduate School of Biomedical Engineering, San Luis Obispo.

Degischer, H. P., Kriszt, B. 2002. Handbook of Cellular Metals - Production, Processing, Applications. 398pp. https://doi.org/10.1002/3527600558.fmatter_indsub

Dusenberry, D. O. 2010. Handbook for Blast Resistant Design of Buildings. 512pp. <https://doi.org/10.1002/9780470549070>

Fackler, M. L., Malinowski, J. A. 1988. Ordnance gelatin for ballistic studies. Detrimental effect of excess heat used in gelatin preparation. *American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 218-219. <https://doi.org/10.1097/00000433-198809000-00008>

Fackler MD., M. L., Association, A. D. P. 1989. Effects of Small Arms on the Human Body. Wound Ballistics Laboratory, Letterman Army Institute of Research, Presidio of San Francisco, California.

Goran, D., 2008. Leonardo da Vinci's Armoured Car Invention. da-vinci-inventions.com. <https://www.da-vinci-inventions.com/armoured-car>

Hallquist, J. 2006. LS-DYNA® theory manual. Livermore Software Technology Corporation. 680pp.

Hilmes, R. 2008. Panzerentwicklung heute und morgen. Der Spannungsbogen zwischen Leichtpanzerversionen und Vollschutzanforderungen.

Janssen, M., (2009). Blast - Resistant Building Design. <https://shaileshzx.wordpress.com/2013/10/30/blast-resistant-building-design/>

Karlos, V., Solomon, G. 2013. Calculation of blast loads for application to structural components. Publications Office of the European Union. Italy <https://doi.org/10.2788/61866>

Kocczaz, Z., Sutcu, F., Torunbalci, N. 2008. Architectural and Structural Design for Blast Resistant Buildings. The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.

Logan, D. L., Veitch, E., Carson, C., Burrell, K. R., Gould, V., Wagner, E. 2007. A First Course in the Finite Element Method Fourth Edition. 836pp.

LSTC, 2003. Special Feature Contacts Practical Guidelines. https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/support/FAQ_docs/contact.pdf

LSTC. 2015a. LS-DYNA R8.0 Keyword User's Manual - Volume I. 2482pp.

LSTC. 2015b. LS-DYNA R8.0 Keyword User's Manual - Volume II - Material Models. 1366pp.

Marchand, K. A., Alfawakhiri, F. 2004. Blast and Progressive Collapse. Facts for Steel Buildings, 67s.

UFC. 2014. UFC 3-340-01. Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects. Department of Defense (DoD).

UNODA, 2015. Ammunition Technical Guideline: International Formulae for Ammunition Management. www.un.org/disarmament/un-safeguard.

US Department of Defense. 2008. UFC 3-340-02. Structures to resist the effects of the accidental explosions. Unified Facilities Criteria. 1943pp.

Yazıcı, M., Wright, J., Bertin, D., Shukla, A. 2014. Experimental and numerical study of foam filled corrugated core steel sandwich structures subjected to blast loading. *Composite Structures*, 110: 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.11.016>

EKLER

- EK 1** **Ls-Dyna Kontrol Kartları**
- EK 2** **Ls-Dyna Malzeme ve Kesit Kartları**

EK 1 Ls-Dyna Kontrol Kartları

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

*CONTROL_ACCURACY

```
$#  osu   inn  pidosu  iacc
      1    2     0     0
```

*CONTROL_BULK_VISCOSITY

```
$#  q1   q2  type  btype
      1,2 0,06  -1    0
```

*CONTROL_ENERGY

```
$#  hgen  rwen  slnten  rylen
      2    2    2     2
```

*CONTROL_HOURLASS

```
$#  ihq   qh
      8   0,1
```

*CONTROL_TERMINATION

```
$#  endtim  endcyc  dtmin  endeng  endmas  nosol
      0,008    0   0,0    0,0  1,00E8    0
```

*CONTROL_TIMESTEP

```
$#  dtinit  tssfacs  isdo  tslimit  dt2ms  lctm  erode  ms1st
      0,0   0,67    0   0,0    0,0    0    0    0
```

```
$#  dt2msf  dt2mslc  imsc1  rmsc1
      0,0    0    0    0,0
```

EK 2 Ls-Dyna Malzeme ve Kesit Kartları

*MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK

Metalik Plakalar Malzeme Kartı

```
$# mid ro e pr vp
    1 7,80e-9 205000,0 0,29 0,0
```

```
$# a b n c psfail sigmax sigsat eps0
    220,0 499,87 0,228 0,017 1,00e+17 1,00e+28 1,00e+28 1,0
```

*MAT_CRUSHABLE_FOAM_TITLE

Poliüretan Köpük Malzeme Kartı

```
$# mid ro e pr lcid tsc damp
    2 4,46e-11 0,0 0,13 2 10,0 0,05
```

*MAT_VISCOELASTIC_TITLE

Viskoelastik Jel Malzeme Kartı

```
$# mid ro bulk g0 gi beta
    3 1,20e-9 29,0 0,2 0,195 0,1
```

*SECTION_SHELL_TITLE

Ön ve Arka Plaka Kesit Kartı

```
$# secid elform shrf nip propt qr/irid icomp setyp
    1 2 1,0 5 1,0 0 0 1
```

```
$# t1 t2 t3 t4 nloc marea idof edgset
    3,175 3,175 3,175 3,175 1,0 0,0 0,0 0
```

*SECTION_SHELL_TITLE

Kıvrımlı Yüzey Kesit Kartı

```
$# secid elform shrf nip propt qr/irid icomp setyp
    2 2 1,0 5 1,0 0 0 1
```

```
$# t1 t2 t3 t4 nloc marea idof edgset
    0,43688 0,43688 0,43688 0,43688 0,0 0,0 0,0 0
```

*SECTION_SOLID_TITLE

Poliüretan Köpük ve Viskoelastik Jel Kesit Kartı

```
$# secid elform aet
    3 1 0
```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sercan DEVRİM
Doğum Yeri ve Tarihi : 12.01.1990 / İskenderun
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : İskenderun Demir Çelik Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi
Lisans : Çukurova Üniversitesi/Otomotiv Mühendisliği
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi/Otomotiv Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Rollmech Automotive/Test ve Validasyon Mühendisi
(07.2017-04.2019)
Bias Mühendislik/Yapısal Analiz Mühendisi
(04.2019-)

İletişim (e-posta) : sercandevrim@hotmail.com
sercandevrim1990@gmail.com

Yayınları : -----