SANDVİÇ PLAKLARIN ŞOK YÜKÜ PERFORMANSLARI

Oğuzhan TAŞ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SANDVİÇ PLAKLARIN ŞOK YÜKÜ PERFORMANSLARI

Oğuzhan TAŞ
0000-0002-5726-3368

Prof. Dr. Murat YAZICI
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SANDVİÇ PLAKLARIN ŞOK YÜKÜ PERFORMANSLARI

Oğuzhan TAŞ

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Hafif sandviç yapılar, özellikle otomotiv, denizcilik ve havacılık gibi geniş bir kullanım alanında hızlı bir şekilde yayılarak kullanılmaktadır. Geniş kullanım alanının tercih edilmesinin başlıca nedenleri, bu yapıların yüksek özgül bükülme sertliğine ve enerji emme kapasitesine sahip olmasıdır. Sandviç yapılar temelde çekirdek ve yüz tabakalarından meydana gelmektedir. Bu temel bileşenler arasında yapıya seçicilik ve değişkenlik kazandıran en önemli eleman çekirdek yapılardır. Birçok farklı amaç ve uygulama için çok sayıda analitik ve deneysel çalışma sonucunda geliştirilen çekirdek yapıların temeli, gözenekli malzemeler ve yapılardan meydana gelir. Birbirlerine göre farklı avantajları bulunan bu yapıların kullanım alanları istenilen özelliklere göre seçilebilir. Sandviç yapıların yapısal davranışlarını incelemek için birçok test yöntemi kullanılmaktadır. Bu test yöntemlerinden bir tanesi de şok testidir. Şok testlerini gerçekleştirmek için günümüzde şok tüpü deney cihazları geliştirilmiştir. Şok tüpleri gerçek patlamalar ve bunların etkilerini, genellikle daha küçük ölçekte simüle etmek için kontrol edilebilir test ekipmanı veya bir modeldeki patlama dalgalarını çoğaltmak ve yönlendirmek için kullanılan bir araçtır. Bu tez çalışması kapsamında şok tüp deney düzeneği üretilmiştir ve şok dalgasına maruz bırakılan farklı malzeme ve çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların yapısal davranışları, hasar ve sönümleme mekanizmaları deneysel olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar analizi, Katı-sıvı etkileşimi, Sandviç plak, Şok tüpü, Şok dalgası, Hasar, Deformasyon, Sönümleme

2021, xiv + 97 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

SHOCK LOADİNG PERFORMANCE OF SANDWİCH PLATES

Oğuzhan TAŞ

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automative Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

Lightweight sandwich structures are widely used in a wide range of usage areas such as automotive, maritime, and aviation. The main reasons for the wide usage area are that these structures have high specific bending stiffness and energy absorption capacity. Sandwich structures basically consist of core and face layers. The core structures are the most crucial element that gives the structure selectivity and variability among these essential components. The basis of core structures developed due to numerous analytical and experimental studies for many different purposes and applications consists of porous materials and structures. The usage areas of these structures, which have different advantages than each other, can be selected according to the desired features. Many test methods are used to examine the structural behavior of sandwich structures. One of these test methods is the shock test. Shock tube test machines are invented today to perform shock tests. Shock tubes are test set-up used to simulate real explosions and their effects, often on a smaller scale, or a tool for amplifying and directing blast waves in a model. Within the scope of this thesis, a shock tube experimental setup was designed, developed, and produced, and used to measure the structural behavior, damage, and damping mechanisms of sandwich structures with different material and core geometries exposed to shock waves were experimentally investigated.

Key words: Finite Element Analysis, Fluid-Structure Interaction, Sandwich Plate, Shock Tube, Shock wave, Damage, Deformation, Dynamic Absorbtion

2021, xiv + 97 pages.

TEŞEKKÜR

Bugünlere gelmemde çok büyük emeğe sahip olan, çalışmalarım süresince desteğini esirgemeyen ve bana her zaman güvenen aileme teşekkür eder, saygı ve sevgilerimi sunarım. Tez çalışmam kapsamında yaptığım çalışmalarda bana her zaman yardımcı olan Uygulamalı Mekanik ve İleri Malzemeler Araştırma Grubu üyesi arkadaşlarım ve hocalarıma, çalışma sürecinde benden yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Aslıhan Hayırkuş ve kıymetli hocalarım Harun Güçlü, Serhat Osmanoğlu, İbrahim Kürşad Türkoğlu, Hakkı Özer ve Emre Bulut' a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamın planlanması, araştırılması, yürütülmesi ve oluşumu aşamalarında ilgi ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden her fırsatta yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendirmemi sağlayan danışman hocam Prof. Dr. Murat YAZICI' ya teşekkürlerimi sunarım.

TÜBİTAK-ARDEB 1001 programı destekli 218M468 numaralı ve "Kendi Kendine Makro Seviyede İyileşebilir Özellikli Yeni Hibrit Sandviç Panel Geliştirilmesi ve Statik, Anlık Dinamik ve Şok Yükleri Altında İyileşme Performansının İncelenmesi" başlıklı proje kapsamında tez konumu oluşturan şok tüpü test düzeneğinin üretilmesi ve sandviç yapıların şok tüpü testleri için sağlanan desteklerden dolayı TÜBİTAK-ARDEB'e teşekkürlerimi sunarım.

Oğuzhan TAŞ

09/08/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET v
ABSTRACT vi
ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR vii
İÇİNDEKİLER viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Kompozit Malzeme 3
2.1.1. Kompozit malzeme bileşenleri 4
2.1.2. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarının şekil veya yerleştirilme biçimine göre sınıflandırılması 5
2.1.3. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri 5
2.2. Sandviç Yapılar 6
2.2.1. Yüz tabakaları 9
2.2.2. Yapıştırıcılar 9
2.2.3. Çekirdek yapıları 9
2.2.4. Sandviç yapılara uygulanan test yöntemleri ve standartları 18
2.2.5. Düzlemsel sandviçler ve sandviç yapılarda oluşan hasar tipleri 23
2.2.6. Düzlemsel sandviç mekaniği 25
2.3. Şok Testi Fiziği 34
2.3.1. Sıkıştırılabilir akışlar 35
2.3.2. Ses dalgaları ve ses hızı 35
2.3.3. Mach sayısı 36
2.3.4. Şok tüpü 41
2.3.5. Şok tüp performansını değiştirmek için kullanılan teknikler 45
2.3.6. Test gazının akış kontrolü 50
2.3.7. Gerçek şok tüp davranışı 51
3. MATERYAL ve YÖNTEM 56
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği 56
3.2. ANSYS Fluent 58
3.3. Modelleme (CAD) ve CFD analizleri 61
3.4. Yapısal Analizler 74
3.5. 3D CAD Tasarımı Ve Şok Tüpü Makinesinin Üretimi 78
3.6. Sandviç Malzeme Üretimi 81
3.7. Sandviç Yapıların Şok Testi 83
4. BULGULAR 87
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 92
KAYNAKLAR 94
ÖZGEÇMİŞ 97

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Kesit Alan
d	Çap
D	Eğilme Rijitliği
E	Elastisite Modülü
F	Kuvvet
G	Kayma Modülü
I	Atalet Momenti
K	Elyaf Verim Parametresi
M	Mach sayısı
P	Basınç
ϕ	Nispi Yoğunluk
t	Kalınlık
V	Hacim
v	Hız
γ	Kayma Açısı
δ	Şekil Değiştirme
ε	Birim Şekil Değiştirme
κ	Eğrilik Yarıçapı
ρ	Yoğunluk
σ	Normal Gerilme
τ	Kayma Gerilmesi
υ	Poisson Oranı

Kısaltmalar	**Açıklama**
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)
EPP	Expanded Polypropylene Material (Genleştirilmiş Polipropilen Malzeme)
XPS	Extruded Polystyrene Material (Ekstrude Polistren Malzeme)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CFD	Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1. Kompozit malzemelerin otomobillerdeki kullanım alanları 4
Şekil 2. 2. Sandviç yapıyı oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi 6
Şekil 2. 3. Bina çatı izolasyonunda kullanılan sandviç bir yalıtım plakası 7
Şekil 2. 4. Temel prensip olarak sandviç yapı ve I kiriş 8
Şekil 2. 5. Sandviç yapılarda çekirdek kalınlığının artmasıyla elde edilen mekanik avantajlar 8
Şekil 2. 6. Balpeteği yapı geometrisi 11
Şekil 2. 7. Balpeteği çekirdek yapının şerit yönleri 11
Şekil 2. 8. Farklı malzemelerden üretilmiş balpeteği çekirdek yapıları 12
Şekil 2. 9. Farklı geometrilerde oluklu çekirdek yapıya sahip sandviçler 13
Şekil 2. 10. Farklı malzemelerden üretilmiş köpük yapılar 14
Şekil 2. 11. Farklı geometrilerde kafes kiriş çekirdek yapılar 17
Şekil 2. 12. Tek hücreli kafes kiriş yapıların geometrileri 17
Şekil 2. 13. Sandviç yapı eğilme testi 18
Şekil 2. 14. Düz bası testi 19
Şekil 2. 15. Enlemesine bası testi 20
Şekil 2. 16. Çekme testi 21
Şekil 2. 17. Yapışma testi (soyma uygulaması) 22
Şekil 2. 18. Sandviç kirişlerin en yaygın hasar modları 23
Şekil 2. 19. Eğilme momentine maruz bir kiriş 25
Şekil 2. 20. Sandviç kiriş için işaretlerin belirlenmesi 26
Şekil 2. 21. Bir alt alan için denge tanımlayan kiriş dx kesiti 29
Şekil 2. 22. Farklı yaklaşım seviyeleri için normal ve kayma gerilmeleri 32
Şekil 2. 23. Homojen ve sandviç kesitlerin karşılaştırılması 32
Şekil 2. 24. Sandviç yapı ve I-kirişin eşdeğer ağ genişliği 33
Şekil 2. 25. Şok dalgası oluşumu 37
Şekil 2. 26. Genişleme Dalgaları 39
Şekil 2. 27. Friedlander ya da ideal patlama dalgaları 40
Şekil 2. 28. Örnek bir şok tüp tasarımı 41
Şekil 2. 29. Teorik olarak şok tüpünün geometrisi 42
Şekil 2. 30. Şok tüpünün çalışması 43
Şekil 2. 31. Şok dalgasının ve dalga dalgasının karşılaştırılması 44
Şekil 2. 32. Çeşitli Basınç Oranlarından Elde Edilen Mach Sayısı 48
Şekil 2. 33. Patlamadan önce ve sonra diyafram örneği 52

Şekil 3. 1. CFD analizlerini doğrulamak için kullanılan deneysel verilerin ait olduğu şok tüpünün CAD görüntüsü 61
Şekil 3. 2. Ansys çalışma ekranı 62
Şekil 3. 3. 2D model mesh yapısı 62
Şekil 3. 4. Mesh özellikleri 63
Şekil 3. 5. 2D modelin bölgelendirilmesi 63
Şekil 3. 6. Analiz tipinin seçilmesi 64
Şekil 3. 7. Analiz enerji modülünün aktif edilmesi 64
Şekil 3. 8. Analizin akış tipinin seçilmesi 65
Şekil 3. 9. Analizin gaz karışımı tipinin seçilmesi 65
Şekil 3. 10. Analizde kullanılacak materyallerin seçilmesi 66

Şekil 3. 11. Analizde kullanılan materyallerin değerlerinin seçilmesi 1 66
Şekil 3. 12. Analizde kullanılan materyallerin değerlerinin seçilmesi 2 67
Şekil 3. 13. Analiz sınır şartlarının belirlenmesi 67
Şekil 3. 14. Analizin method tipinin seçilmesi 68
Şekil 3. 15. Analiz sonucu olarak istenilen grafiklerin seçilmesi 68
Şekil 3. 16. Analizin çözüm tipinin seçilmesi 69
Şekil 3. 17. Analizin başlangıç şartlarının girilmesi 1 69
Şekil 3. 18. Analizin başlangıç şartlarının girilmesi 2 70
Şekil 3. 19. Analizin başlangıç şartlarının girilmesi 3 70
Şekil 3. 20. Analizin başlangıç şartlarının girilmesi 4 71
Şekil 3. 21. Analiz sonuçlarının görüntülenmesi 71
Şekil 3. 22. Analiz başlangıcında bölgelerdeki basınç durumu 72
Şekil 3. 23. Analiz sonucunda elde edilen basınç grafiği 72
Şekil 3. 24. Analiz sonucunda elde edilen hız grafiği 73
Şekil 3. 25. Analiz sonucunda elde edilen mach sayısı görseli ve değeri 73
Şekil 3. 26. Parça 1'in analiz başlangıç şartlarının gösterimi 74
Şekil 3. 27. Parça 1'in analiz sonuçları 74
Şekil 3. 28. Parça 2'nin analiz başlangıç şartlarının gösterimi 75
Şekil 3. 29. Parça 2'nin analiz sonuçları 75
Şekil 3. 30. Parça 3'ün analiz başlangıç şartlarının gösterimi 76
Şekil 3. 31. Parça 3'ün analiz sonuçları 76
Şekil 3. 32. Parça 4'ün analiz başlangıç şartlarının gösterimi 77
Şekil 3. 33. Parça 4'ün analiz sonuçları 77
Şekil 3. 34. Şok tüpü kapak tasarımı 78
Şekil 3. 35. Şok tüpü ön basınç bölgesi tasarımı 78
Şekil 3. 36. Şok tüpü akış bölgesi tasarımı 79
Şekil 3. 37. Şok tüpü akış bölgesi konik kısım tasarımı 79
Şekil 3. 38. Şok tüpü akış bölgesi çıkış kısmı tasarımı 79
Şekil 3. 39. Şok tüpü son tasarımı 80
Şekil 3. 40. Şok tüpü üretim sonrası görseli 80
Şekil 3. 41. Sandviç üretiminde kullanılan silikon yapıştırıcı 81
Şekil 3. 42. Yapıştırıcı sürülen yüzey plakaları 82
Şekil 3. 43. Hazırlanan XPS ve EPP köpük çekirdekli numuneler 82
Şekil 3. 44. Deplasman sensörü aparatı bağlanarak teste hazır hale getirilen numuneler 83
Şekil 3. 45. EPP köpük malzeme çekirdek yapısına sahip sandviç yapı test düzeneğine bağlanması 84
Şekil 3. 46. XPS köpük malzeme çekirdek yapısına sahip sandviç yapı test düzeneğine bağlanması 84
Şekil 3. 47. Deplasman sensörünün konumlandırılması 85
Şekil 3. 48. Deneyde kullanılan diyaframın başlangıç görüntüsü 85
Şekil 3. 49. Deney düzeneğinde basınç ve deplasman sensörlerinin konumları 86
Şekil 3. 50. Şok testi deney düzeneği 86

Şekil 4. 1. Şok testlerinde patlama sonucu oluşan basınç- zaman grafiği 87
Şekil 4. 2. Şok testleri sonucunda oluşan diyafram görüntüsü 88
Şekil 4. 3. EPP köpük çekirdek yapılı sandviçin şok tüpü testindeki zamana bağlı değişim görüntüsü 88

Şekil 4. 4. Şok testi sırasında malzemede oluşan deplasman (EPP köpük) 89
Şekil 4. 5. EPP köpük çekirdek yapısına sahip sandviç yapının şok testi sonucunda oluşan deplasman-zaman grafiği 89
Şekil 4. 6. XPS köpük çekirdek yapılı sandviçin şok tüpü testindeki zamana bağlı değişim görüntüsü 90
Şekil 4. 7. Şok testi sırasında malzemede oluşan deplasman (XPS köpük) 90
Şekil 4. 8. XPS köpük çekirdek yapısına sahip sandviç yapının şok testi sonucunda oluşan deplasman-zaman grafiği 91
Şekil 4. 9. XPS ve EPP köpük çekirdek yapısına sahip sandviç yapıların şok testi sonucunda oluşan deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 91

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2. 1. Kompozit üretim yöntemleri 5
Çizelge 2. 2. Tablo ses dalgası ile şok dalgası arasındaki farklar 35
Çizelge 2. 3. Akış tipleri 36
Çizelge 2. 4. Havadaki birincil ve yansıyan şok dalgaları için ideal koşullar..... 48

1. GİRİŞ

Son zamanlarda, hafif sandviç yapılar, özellikle otomotiv, denizcilik ve havacılık endüstrilerinde, çok çeşitli uygulama alanlarında yoğun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu hızlı yayılma, bu yapıların yüksek özgül bükülme sertliğine, yüksek enerji emme kapasitesine ve üstün ısı yalıtım özelliklerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, bu yapıların yaygın kullanımında, bu yapıların farklı amaçlar için kontrol edilebilir ve değiştirilebilir özelliklere sahip olması büyük bir avantajdır.

Sandviç yapılar temel olarak iki ana elemandan meydana gelirler. Bunlardan birincisi: yapının üst ve alt kısımlarında iki ince sert yüz tabakasıdır. Bu sert tabakaların sandviç yapıdaki görevi, düzlem içi gerilim ve eğilme yükleri taşımaktır. Yapının ikinci ana elamanı ise, iki sert yüz tabakası arasına yerleştirilen ve yapıya yüksek burkulma direnci, enerji sönümleme kabiliyeti ve kesme sertliğinin yanı sıra yüksek eğilme dayanımı özellikleri sağlayan çekirdektir. Çekirdeğin bir diğer görevi ise sandviçte meydana gelen enine kayma/kesme yüklerini taşımaktır. Çekirdek yapıları birçok farklı formda olabilir. Bu yapıların en yaygın bilinen örnekleri köpük malzemeler ve gözenekli yapılar sayılabilirler.

Günümüzde, sandviç yapıların, yapısal davranışlarını ve mekanik özelliklerini daha iyi yorumlayabilmemiz için birçok test yöntemi mevcuttur. Bunlardan en çok bilinenleri bası testi, çekme testi, eğilme testi ve şok testi sayılabilir.

Günümüzde malzemelerin şok testleri sonucunda yapısal davranışlarını incelemek için şok tüpü deney makineleri yaygınlaşmıştır. Şok tüpleri, gerçek patlamaları ve daha küçük çapta meydana gelebilecek patlama hasarlarını simüle etmek amacıyla hem bir sensörde hem de bir numune üzerinde patlama dalgaları oluşturmak ve yönlendirmek için kullanılırlar. Şok tüpleri kontrollü koşullar altında şok dalgaları meydan getirmek için kullanılan bir laboratuvar makinesidir. Bu sayede malzemelerin şok yükü altındaki yapısal davranışları incelenmektedir. Savunma sanayi, havacılık ve denizcilik endüstrisi gibi birçok alanda şok tüpleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda malzemelerin şok yükü performanslarının incelenmesine ait çalışmalar da bir hayli artmıştır.

Yapılan bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında, şok tüp deney düzeneği oluşturularak şok dalgasına maruz bırakılan farklı malzeme ve çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların yapısal davranışları, hasar ve sönümleme mekanizmaları deneysel olarak incelenmiştir.

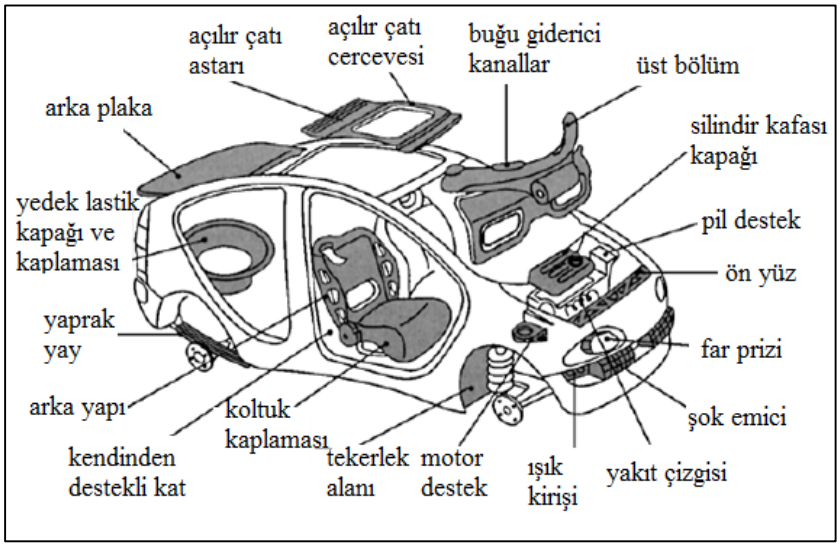
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozit Malzeme

Kompozit malzeme; en az iki ya da daha fazla sayıda malzemelerin birbiri içerisinde çözünmeden, gözle görülebilecek düzeylerde bir araya getirilerek, bileşenlerindeki malzemelerin üstün özelliklerini bir malzemede toplanması sonucunda istenilen özelliklerde oluşturulan yeni bir malzeme türüdür. Kompozit malzemelerin alışılmış diğer malzemelere göre pek çok üstün özellikleri bulunmaktadır. Bunlar: yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, yüksek rijitlik/yoğunluk oranı, yüksek korozyon dayanımı, yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek kimyasal direnç, hava koşulları ve UV Işınlara karşı dayanım, iyi termal ve ısı iletkenliği, çok iyi elektrik ve termik yalıtım özelliği, hafiflik, işlenebilirlik, kalıcı renklendirme, titreşim sönümleme vb. özellikler kompozit malzemelerin üstün özelliklerinden sayılabilirler.

Ancak tüm bu avantajlarının yanında üretiminin zor olması, işlenme güçlüğü, geri dönüşümünün olmaması ve maliyetinin yüksek olması gibi birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Ayrıca kompozit malzemelerin üretilirken kullanılan üretim metotlarının kalitesiyle alakalı olarak her zaman ideal özellikler elde edilemez. Bunun sonucu olarak aynı kompozit malzeme için bile farklı mukavemet özellikleri gözlenebilir.

Kompozit malzemelerin bahsedilen avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurulduğunda üstün özelliklerinin daha fazla olması dolayısıyla sanayide çok geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir. Kompozitlerin uygulama alanları arasında inşaat ve yapı sektörü, savunma sanayi, otomotiv sektörü, havacılık ve uzay sanayi, denizcilik sektörü, enerji sektörü, spor malzemeleri imalatı, gıda ve tarım sektörü gibi daha birçok alan sayılabilir. Şekil 2.1'de kompozit malzemelerin otomobillerdeki kullanım alanları gösterilmiştir (Asi 2018).



Şekil 2. 1. Kompozit malzemelerin otomobillerdeki kullanım alanları (Asi 2018)

2.1.1. Kompozit malzeme bileşenleri

Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanı adı verilen iki malzemeden oluşur. Matris, malzemeye rijitlik ve şekil verir. Matris aynı zamanda elyaf yüzeyinin mekanik ve kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Ayrıca elyafı birbirinden ayırarak süneklik ve plastiklik özelliği kazanmasını sağlayıp kompozit malzemedeki oluşabilecek çatlakların ilerleyerek malzemenin aniden kırılmasını engeller. Matris malzeme cinsine göre; metal matrisli kompozitler (MMK), seramik matrisli kompozitler (CMK) ve polimer matrisli kompozitler (PMK) olarak üçe ayrılır (Asi 2018).

Kompozit malzemelerde takviye elemanının ise çok önemli bir görevi vardır. Takviye elemanı malzemenin üzerine gelen yükü yaklaşık %90 oranında taşır, matris malzemesine rijitlik kazandırır, malzemenin mukavemetini arttırır, elektrik iletkenliği ya da yalıtkanlığı, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek elastik modül, yüksek sertlik gibi özellikler kazandırır. Tabiki takviye elemanının kompozit malzemeye gelen yükün büyük kısmını taşıyabilmesi için takviye elemanı ve matrisin ara yüzey bağ kuvvetinin çok iyi olması gerekir. Bunun haricinde de kompozit malzemeye gelebilecek kuvvete göre elyaf yönlenmesinin ayarlanması, uygun takviye elemanının seçilmesi, takviye elemanının boyutları ve matrisin elyafı iyi bir şekilde ıslatması gibi kriterlere de dikkat etmek gereklidir. Kompozit malzemelerde takviye elemanları farklı formlarda bulunabilirler. Bu

formlar parçacık, sürekli ve süreksiz elyaf şeklinde olabilir. Kullanılacak bu formların her biri malzemeye olumlu birçok katkıda bulunur. Takviye malzemesi olarak kullanılan elyaflar arasından en çok kullanılanları cam, karbon, bor ve aramid elyaflardır (Asi 2018).

2.1.2. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarının şekil veya yerleştirilme biçimine göre sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin takviye elemanlarının şekil veya yerleştirilme biçimine göre sınıflandırılması kendi arasında dörde ayrılır:

a. Elyaf takviyeli kompozitler

b. Parçacık takviyeli kompozitler

c. Tabakalı kompozitler

d. Hibrit kompozitler (Asi 2018).

2.1.3. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

Kompozitlerin üretiminde farklı ihtiyaçları karşılamak adına birçok üretim yöntemi mevcuttur. Bu nedenle kompozit üretiminde istenilen malzeme özeliklerine göre bir üretim yöntemi seçmek gerekir. Bu üretim yöntemleri kompozit malzemenin matris türüne göre metal ve polimer matrisli kompozitler için ikiye ayrılır (Asi 2018);

Çizelge 2. 1. Kompozit üretim yöntemleri

Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	**Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri**
1. Sıcak presleme	1. El yatırma yöntemi
2. Toz metalürjisi	2. Püskürtme yöntemi
3. Sıvı metal emdirme	3. Reçine transfer kalıplama yöntemi
4. Elektroliz yöntemi	4. Helisel sarma yöntemi
5. Buhar çökeltme	5. Vakum torbalama yöntemi
6. Haddeleme	6. Pultrüzyon yöntemi

2.2. Sandviç Yapılar

Sandviç yapılar, havacılık, denizcilik, nakliye ve savunma endüstrilerinde, sertlik ve mukavemet, hafiflik, yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve farklı kullanım yerlerine uygun amaçlarla üretilebilir olması gibi birçok avantajının sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Türkoğlu 2020).

Terimsel olarak sandviç yapılara, yüksek mukavemetli iki ince tabakadan ve düşük ila orta derece mukavemet ve yoğunluğa sahip bir orta tabakadan oluşan üç katmanlı bir malzeme yapısı da denir. Genel bir sandviç geometrisi aşağıda Şekil 2.2'de gösterilmektedir.

İki ince tabakaya yüz tabakaları denir ve genellikle ince, sert ve güçlü malzemelerden oluşur. Orta tabaka ise sandviçin çekirdeğidir ve kalın, hafif ve daha zayıf bir yapıdadır. Yüzeyler ve çekirdek malzemesi, bileşenler arasındaki yük aktarım mekanizmasını kolaylaştırmak için bir yapıştırıcı ile birleştirilir, bu nedenle kullanılan tüm malzemeleri etkili bir şekilde kullanır (Türkoğlu 2020).

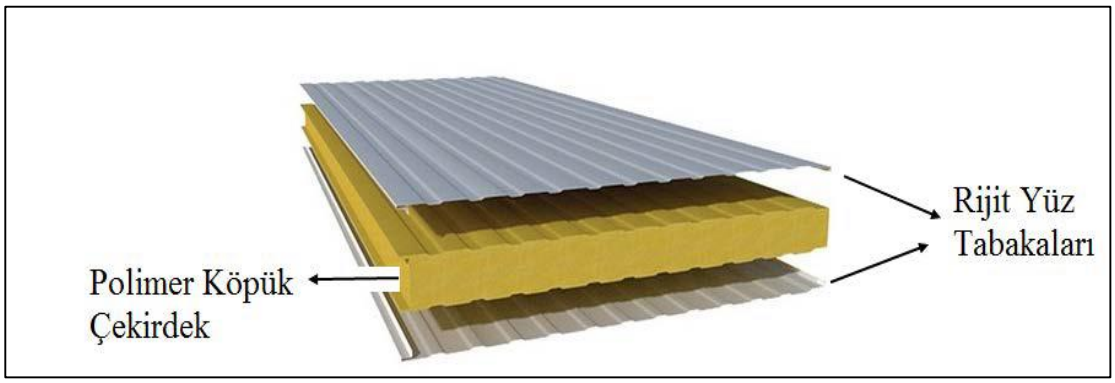
Yüzey tabakaları elyaf takviyeli plastik, çelik, alüminyum veya tahtadan yapılabilir ve çekirdek polimer veya metal köpükler başta olmak üzere farklı geometrilerde petek, oluklu veya kafes kiriş yapılardan oluşabilir. Sandviçin farklı kısımlarında kullanılan malzemeler uygulamaya bağlı olarak değişebilir. Örneğin denizcilik uygulamalarında birincil olarak korozyon direncine dayanıklılığı yüksek olan vinilester gibi malzemeler kullanılırken; havacılık endüstrisinde daha çok yüksek ısı direncine sahip olan epoksi gibi malzemeler kullanılır (Reis 2005).



Şekil 2. 2. Sandviç yapıyı oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi

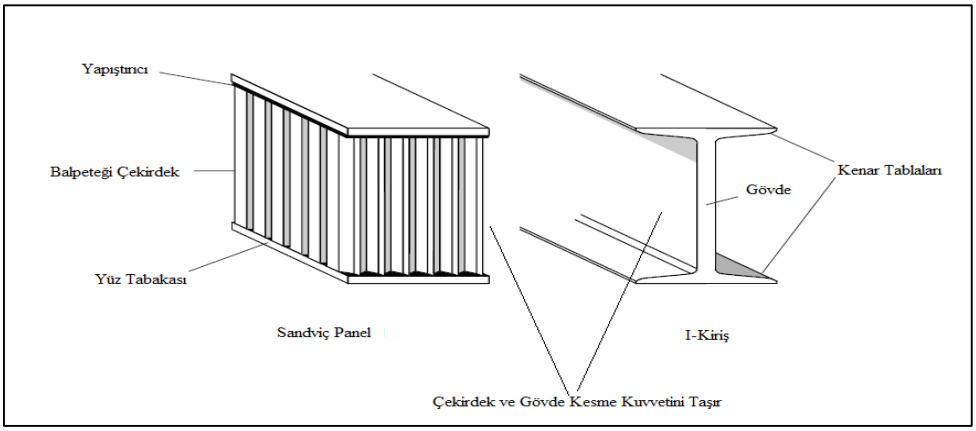
Sandviç yapı, ince cidarlı yapılar ve diğer mimarilere kıyasla son derece yüksek eğilme sertliği/ağırlık oranı avantajının sayesinde yapılarda giderek daha önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Bunun sonucunda sandviç yapı diğer yapılara göre daha düşük yanal deformasyonlar, daha yüksek burkulma direnci ve daha yüksek doğal frekanslara sahip olması nedeniyle büyük bir kullanım alanına sahiptir. Belirli bir mekanik ve çevresel yük şartları için, sandviç konstrüksiyon genellikle diğer konfigürasyonlara göre daha düşük bir yapısal ağırlığa sahip olmakla çok daha üstün özellikler sergileyebilmektedir (Vinson 2018).

Farklı özelliklerdeki levhalarla çekirdek yapıların birleştirilmesiyle istenilen uygulamalara özel, optimum tasarımda ve ideal parametrelerde sandviç yapılar üretilmesinin mümkün olması bu yapıların tercih edilmesinin en önemli sebebidir. Sandviç yapılar oluşturulurken yapıda kullanılan elemanların tek tek üstün özellikleri birleştirilip çok daha üstün bir yapı oluşturulabilir; ya da bir eleman ile diğer yapı bileşeninin sahip olduğu negatif özelliği giderilerek daha ideal yapılar haline getirilebilir. Örneğin ısı yalıtımı gereken yerlerde ısı yalıtımı özelliği üstün olan polimer bir köpük ile yapıyı dışarıdan gelecek hasarlara karşı koruyan bir başka rijit polimer levha çifti beraber kullanılarak hem istenilen yalıtım özelliği sağlanır hem de bu özellik sağlanırken yapıya gelecek dış etmenlerden yapı muhafaza edilmiş olur. Örnek olarak verilen durumlarda kullanılan bir bina yalıtım sistemi aşağıda Şekil 2.3'de gösterilmektedir (Türkoğlu 2020).



Şekil 2. 3. Bina çatı izolasyonunda kullanılan sandviç bir yalıtım plakası (Türkoğlu 2020)

Sandviç malzemelerin, özellikle de sandviç panellerin sahip oldukları en büyük avantaj düşük ağırlıklarla yüksek eğilme rijitliği göstermeleridir. Yani özetleyecek olursak sahip oldukları eşsiz özgül eğilme rijitliği davranışlarıdır. Sert ve güçlü yüz panelleri eğilme yüklerini taşırken daha hafif ve kalın çekirdek yapı kesme yüklerine karşı koyarak yapıya üstün bir mekanik özellik kazandırmaktadır. Bu yapıların temel ilkesi aslında en basit haliyle I kirişi ile benzerlik göstermektedir. Yüz tabakaları I profildeki üst ve alt flanşlarla aynı görevi görürken çekirdek yapı da profil gövdesini temsil etmektedir. Bu durum aşağıda Şekil 2.4'te şematik olarak verilirken; Şekil 2.5'te kirişlerin daha kalın hale getirilerek bükülme sertliğindeki artışı ve sandviç malzemelerde bu artışın ağırlığa oranla çok daha yüksek olduğu gösterilmektedir (Türkoğlu 2020).



Şekil 2. 4. Temel prensip olarak sandviç yapı ve I kiriş (Türkoğlu 2020)

	Katı Yapı	t Kalınlığında Çekirdekli S.Y.	3t Kalınlığında Çekirdekli S.Y.
	t	2t	4t
Rijitlik	1.0	7.0	37.0
Eğilme Dayanımı	1.0	3.5	9.2
Ağırlık	1.0	1.03	1.06

Şekil 2. 5. Sandviç yapılarda çekirdek kalınlığının artmasıyla elde edilen mekanik avantajlar (Türkoğlu 2020)

Sandviç yapıyı oluşturan 3 ana eleman olan yüz tabakaları, yapıştırıcılar ve çekirdek yapılar hakkında kısaca bilgiler verilecektir.

2.2.1. Yüz tabakaları

Yapısal sandviçlerde, yüz tabakaları çoğunlukla malzeme ve kalınlık bakımından benzerdir ve esas olarak düzlem-içi ve eğilme yüklerine maruz kalmaktadır. Bu tür malzemesi ve kalınlığı aynı iki yüz tabakası kullanılarak yapılan sandviç yapılara simetrik sandviç yapılar denir. Bazı özel durumlarda farklı yükleme koşulları altında ve çalışma ortamı nedeniyle kalınlık veya malzeme olarak yüz tabakaları farklılık gösterebilir. Bu konfigürasyon asimetrik sandviç yapılar olarak adlandırılır (Türkoğlu 2020).

Bir sandviç yapıda, yüz tabakaları birçok farklı malzemeden meydana gelebilir. İzotropik monokok malzeme, anizotropik monokok malzeme veya kompozit malzeme yüz tabakası olarak kullanılabilir. Alüminyum, fiberglas, grafit ve aramid en yaygın kullanılan yüz tabakası malzemesi olarak sayılabilir. Bununla birlikte, genel olarak yapının ağırlığını en aza indirmek için kompozit yüzey tabakaları kullanılmaktadır (Türkoğlu 2020).

2.2.2. Yapıştırıcılar

Yapıştırıcının sandviç yapılardaki temel görevi yapı elemanlarını bir arada tutmak ve yapı elemanlarına etkiyen yükleri uygun bir biçimde diğer elemana iletmek ve bunu yaparken de bu yüke karşı koymaktır (Türkoğlu 2020).

2.2.3. Çekirdek yapıları

Kompozit sandviç yapıların bir diğer ana bileşeni çekirdek yapısıdır. Bir sandviç yapının çekirdeği, istenen bükülme sertliğine erişilecek şekilde yüz tabakalarını ayırmaya, desteklemeye ve stabilize etmeye yardımcı olur. Hemen hemen bütün durumlarda, çekirdek bir sandviç kabuğunda veya panel yapısında asıl düzlem-dışı veya enine kesme yüklerine maruz kalır ve bu yükleri taşır. Isı ve ses yalıtımı gibi diğer işlevler de büyük ölçüde çekirdek malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu fonksiyonları minimum ağırlıkta

gerçekleştirmek için çekirdek malzeme genellikle yüz tabakaları ve yapışkan bileşenlere kıyasla nispeten düşük yoğunlukta seçilmektedir. Birçok durumda, çekirdek malzeme, bağımsız durumdaki nispi kırılganlık veya kararsızlık nedeniyle boyutsal kararlılığı korumak için özel işlem veya ara işlem gereklidir.

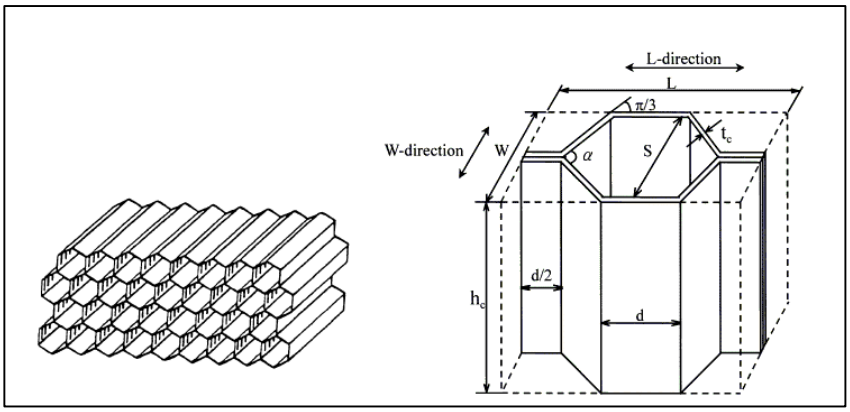
Tüm sandviç yapılarda düzlem-içi ve eğilme yükleri (birincil yükleme) yüz tabakaları tarafından taşınırken ve çekirdek enine kesme yüklerini taşır. Genellikle, yüz tabakaları malzeme ve kalınlık bakımından aynı olmasından dolayı sandviç yapı tiplerinin çeşitliliği temel olarak çekirdeğin konfigürasyonuna bağlıdır. Sandviç yapının etkinliğinin sürekli olması için, çekirdek yapı, panele etkiyen sıkıştırma veya ezme yüküne dayanacak kadar güçlü olmalı ve yapıya etki eden kesme kuvvetlerine de direnç göstermelidir. Çekirdek yapı hasara uğrarsa, sandviç yapının sahip olduğu mekanik özellikler ve rijitlik avantajını kaybetmiş olur.

Çekirdek malzemeler genellikle dört ana gruba ayrılır. Bunlar balpeteği çekirdek yapılar, oluklu çekirdek yapılar, köpük çekirdek yapılar ve kafes çekirdek yapılardır (Türkoğlu 2020).

a. Balpeteği Yapılar

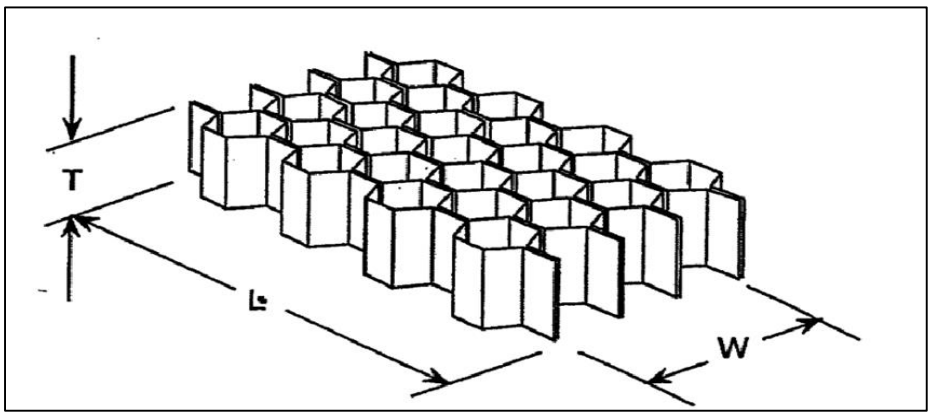
Balpeteği çekirdek, adını aldığı arıların bal üretmek için yaptıkları peteklere çok benzemektedir. Petek çekirdeğine hücresel çekirdek veya açık hücreli çekirdek olarak isimlendirilmektedir. Petek benzeri konfigürasyonlar için oluşturulmuş ince tabaka malzemelerden veya şeritlerden çok çeşitli çekirdek malzemeler oluşturulabilir. Sac malzeme, tabaka kalınlığı, hücre boyutu ve hücre şekli değiştirilerek, yoğunluk ve özellik bakımından geniş bir aralıktaki çekirdek yapılar üretilebilir. Çoğu petek çekirdeği, orta miktarlarda tekli oluklu yapılardan oluşturulabilir. Özel hücre konfigürasyonlarına sahip çekirdekler de farklı üretim yöntemleri ile üretilmektedirler.

En yaygın olarak bilineni aşağıda Şekil 2.6'da da gösterilen altıgen balpeteği yapılardır. Yapının sahip olduğu bu altıgen geometri bu tür yapılara düşük yoğunlukla beraber yüksek düzlem-dışı bası dayanımına ve yüksek düzlem-dışı kayma dayanımlarına katkı sağlar (Türkoğlu 2020).



Şekil 2. 6. Balpeteği yapı geometrisi (Türkoğlu 2020)

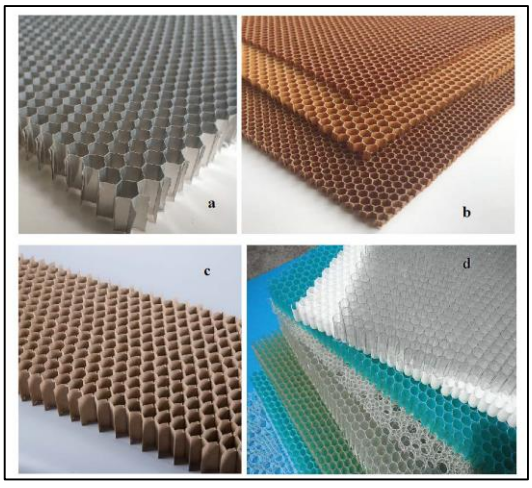
Şekil 2.7 tipik altıgen petek çekirdeği için şerit boyunu (L), enini (W) ve kalınlığı (T) göstermektedir. Belirli bir tabaka malzemesinden elde edilebilen hücre yapılandırmaları, tabaka kalınlığı ve sertliği ile sınırlıdır. Bağlantı yerlerinde kullanım gibi özel uygulamalarda, petek yapı hücrelerinin bölgesel olarak genişletilmesi/daraltılması yapılabilir veya hücrelerin boylarının yine bölgesel olarak değiştirilmesi sağlanarak yapının yoğunlaştırılması sayesinde yoğunluk artışıyla doğru orantılı olarak arttırılmış mekanik özelliklerinde artışı sağlanabilir (Türkoğlu 2020).



Şekil 2. 7. Balpeteği çekirdek yapının şerit yönleri (Türkoğlu 2020)

Petek malzemeler, düz veya hafif kavisli yüzeylere ihtiyaç duyulduğu ve yüksek özgül mukavemetlerinin değerli olduğu havacılık endüstrisinde yaygın olarak karşımıza çıkmaktadır. Kâğıt bazlı petek karton şeklindeki ambalaj malzemelerinden kayak ve snowboard gibi spor malzemelerine kadar birçok alanda da kullanılmaktadırlar. Genleşme (expansion), kalıplama ve oluklu tabakalardan üretimi gibi 3 ana üretim tekniği mevcuttur (Türkoğlu 2020).

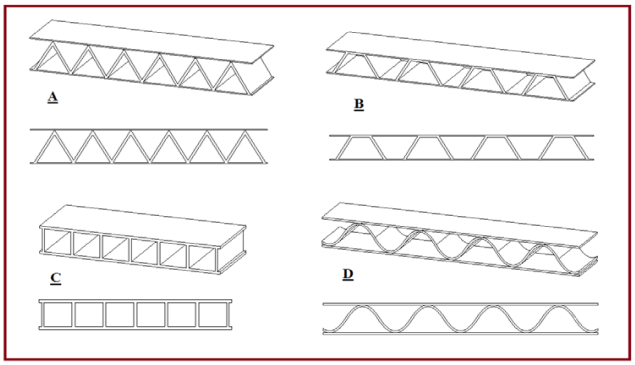
Balpeteği yapılar malzemesi bakımından metalik, metalik olmayan bal petekleri olarak 2 ana gruba ayrılırlar. Sandviç yapımı için günümüzde en yaygın kullanılan balpeteği çekirdek yapılar alüminyum temelli olanlarıdır. Metalik olmayan balpeteği yapılar ise yaygın olarak cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerden, kâğıttan, Nomex olarak da bilinen kevlar malzemeden üretilmektedirler. Son yıllarda geleneksel olarak kullanılan alanlardaki malzemelerin de polimerik malzemelerden üretilmektedir. Metalik olmayan malzemelerden üretilen balpeteği çekirdekler, metalik balpeteği çekirdeklerinden daha iyi ısı yalıtım özelliklerine sahiptir. Ancak her ikisinde de ısı açık hücrelerde radyasyon yoluyla iletilir. Sandviç yapısında termal etkiler göz önüne alındığında, sandviçin yansıtıcı bir ısı yalıtkanı olarak kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Farklı malzemelerden yapılmış balpeteği yapı örnekleri aşağıda Şekil 2.8'de verilmektedir (Türkoğlu 2020).



Şekil 2. 8. Farklı malzemelerden üretilmiş balpeteği çekirdek yapıları
a) Alüminyum b) Nomex (Kevlar) c) Karton d) Plastik (Türkoğlu 2020)

b. Oluklu Yapılar

Yüksek dayanıklı sandviç panel yapımında en çok tercih edilen pratik çekirdek yapılardan biri de oluklu yapıdaki çekirdektir. Bu çekirdekler, yapıların hem normal hem de uzunlamasına yönlerinde üretim avantajlarının yanında yapıda yüksek mukavemet sağlar. Bu tür çekirdekler esasında balpeteği çekirdek yapılarının da yapımında kullanılan ara formdur ve bu sayede özellikle balpeteği çekirdek yapılara oranla çok daha kolay üretilebilir olmaları en önemli avantajlarından birisidir. Bunun yanı sıra, bu tip çekirdek yapıları özellikle patlama ve yüksek hızda darbe yüklemeleri altında, sahip oldukları yüksek enerji sönümleme kabiliyetleri nedeniyle daha çok patlama yüklerine maruz kalan askeri alanlarda, patlama yaşanma riski olan yerlerde zemin ve yanal duvarlarda ve sıvı-gaz nakliye tanklarında tercih edilmektedir. Bu yapıların şematik gösterimi Şekil 2.9'da gösterilmektedir (Türkoğlu 2020).

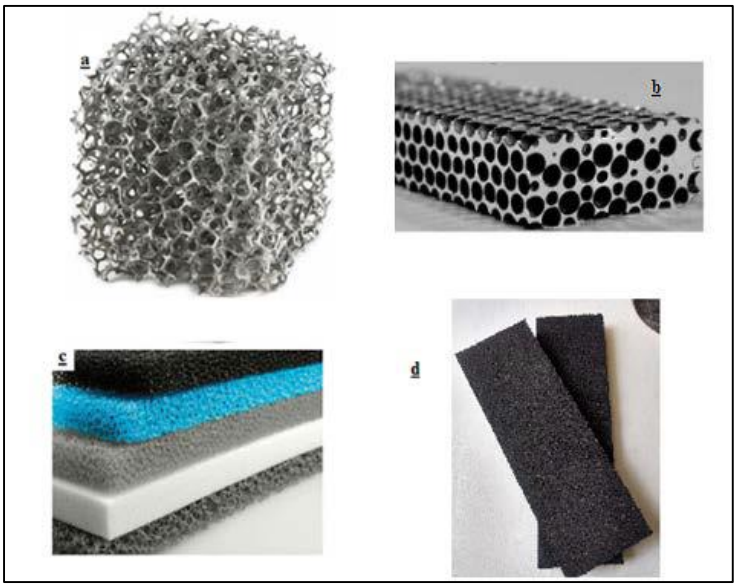


Şekil 2. 9. Farklı geometrilerde oluklu çekirdek yapıya sahip sandviçler
A) Üçgen B) Trapezoidal C) Dörtgen D) Sinüzoidal (Türkoğlu 2020)

Balpeteği yapılardaki yapıya rijitlik ve yüksek dayanım sağlamak adına gözenekleri yüz tabakaları tarafından kapatılacak şekilde yerleştirilmesinin aksine oluklu çekirdek yapılarda bu durum tam tersi olarak uygulanır. Bu uygulama farkı da oluklu çekirdeklere temelde şu iki avantajı sağlar; bunlardan ilki yapının plastik deformasyon özelliği kazanmasıyla elde ettiği enerji sönümleme yeteneği diğeri ise yapı boyunca oluşan oluk kanalları sayesinde yapının kazandığı havalandırma mekanizmasına sahip olmasıdır ki bu sayede yapı nem tutmayan bir karakteristiğe bürünmüş olur. Oluklu yapıların en yaygın kullanılanları çelik ve alüminyum levhalardır (Türkoğlu 2020).

c. Köpük Yapılar

Köpük çekirdekler, doğal çekirdek malzemelerin başlıca dezavantajlarının, özellikle yoğunluk ve nem emiliminde istenmeyen değişiklikler için geliştirilmiştir. Plastik çekirdekler, plastiğin görünen yoğunluğunu çekirdek malzeme için pratik bir aralığa düşürmek için köpüklenir ve genişletilir veya başka yollarla üretilebilir. İstenen çekirdek özellikleri, bu çekirdekler için genleşme prosesi kontrol edilerek elde edilebilir. Metalik köpüklü çekirdekler, erimiş alüminyum-magnezyum alaşımlarının uygun köpürtücü ajanlarla karıştırılması ve gözenekli bir katı oluşturmak üzere karışımın soğutulmasıyla meydana gelir. Bu malzemelerin yanı sıra cam köpükler de üretilebilir. Bu tip çekirdek malzemesinin avantajları çekirdek eklem eliminasyonu; yüz tabakaları ve çekirdek arasında ince ve düzgün birleştirme tabakası; montajdan önce kolayca kontrol edilebilen, önceden kalıplanmış, boşluksuz yüz tabakalarının kullanımı; iyi elektriksel özellikler ve imalatta esneklik olarak sayılabilir. Farklı malzemelerden yapılmış köpük çekirdek yapılar aşağıda Şekil 2.10'da gösterilmektedir (Türkoğlu 2020).



Şekil 2. 10. Farklı malzemelerden üretilmiş köpük yapılar

a) Açık hücreli metal köpük (Borovinšek ve ark. 2008) b) Kapalı hücreli metal (Fiedler ve ark. 2006) c) Açık hücreli polimerik köpük (Türkoğlu 2020) d) Kapalı hücreli polimerik köpük (Türkoğlu ve ark. 2018)

Köpükler, peteklere göre daha düşük mekanik özellikler göstermesi dezavantajı olabilir, ancak akustik sönümleme veya yalıtım gibi bazı avantajları da mevcuttur. Bunun yanı sıra, termoplastik köpükler iyi bir termoformabilite özellik gösterirler. Ekstrüzyon, sıkıştırma kalıplama, enjeksiyon kalıplama ve benzeri gibi birçok imalat yöntemleri, köpük malzeme üretmek için kullanılabilir. Köpük çekirdekleri ise, imalat sırasında genişleyen ve gözenekli, hücresel yapıyı gerçekleştiren bir köpürtücü veya üfleme maddesi yardımıyla meydana getirilir (Türkoğlu 2020).

Köpük çekirdekler, özellikle balpeteği ve oluklu çekirdek malzemelerinin kolayca kullanılamadığı karmaşık yapılarda kullanılan bir çekirdek yapısıdır. Tek başına kullanımının yanı sıra diğer çekirdek türleriyle birleştirilerek de kullanılmaktadır. Balpeteği çekirdeklerine oranla genellikle daha düşük maliyetleri nedeniyle, köpük çekirdekler genel havacılık ve denizcilik uygulamaları gibi maliyete duyarlı uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Köpüklerin hücresel yapısı açık ve birbirine bağlı hücrelere veya kapalı ve ayrık hücreler olmak üzere gruplandırılabilirler. Açık hücre yapısına sahip köpükler genellikle düşük mekanik performansa sahiptirler. Birçok polimer, uygun bir şişirme maddesi eklenerek köpük üretmek için kullanılabilir (Grünewald ve ark. 2015).

Köpük yoğunluğu genellikle kg/m3 birimi ile verilir. Amaca uygun kullanımı ise şu şekilde sağlanmaktadır; köpüğün yoğunluğunun (ρ_f) polimerin köpürtülmeden önceki yoğunluğuna (ρ_p) bölünmesiyle nispi yoğunluk (ϕ) elde edilir (Türkoğlu 2020).

$$\phi = \rho_f / \rho_p \tag{2.1}$$

Hücre boyutu ise köpük kesitinin doğrudan incelenmesi ile ölçülebilen hücre boyutu bir diğer karakterizasyon yöntemidir. Hücre boyutunu belirlemek için hali hazırda kullanılan ASTM D3576-15 (2015) standartına göre belirli bir uzunlukta bulunan hücreler sayılır. Ortalama kiriş uzunluğu t belirlenir ve ortalama hücre çapı d, d = t / 0.616 formülüyle bulunabilir (Türkoğlu 2020).

Çoğu köpük üreticisi, köpükleri için ya ortalama bir hücre boyutu ya da bir dizi hücre boyutu kullanmaktadır. Farklı boyutlardaki hücrelerin üretimine, kısmen uzay ve zamanda rastgele dağılmış hücreler ve kısmen küçük hücrelerden gaz difüzyonu ile büyüyen hücreler sebep olurlar. Düzgün hücre boyutu sabit bir yapı değildir. Gazın küçükten büyük hücrelere difüzyonu, sıvı ile çevrili bir baloncuğun içindeki basıncı veren klasik denklemlerden hesaplanabilir (Türkoğlu 2020):

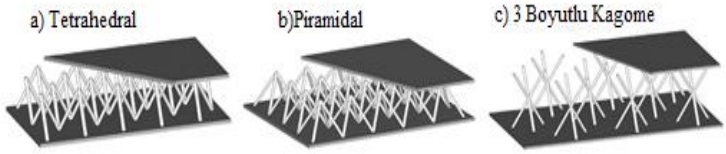
$$P= 2\gamma/r \tag{2.2}$$

Burada P gaz ve çevresindeki sıvı arasındaki basınç farkıdır, γ arayüzey yüzey gerilimi ve r kabarcık yarıçapıdır. Küçük kabarcıklar büyük olanlardan daha yüksek basınçta gaz bulundurur; dolayısıyla difüzyon daima küçükten büyüğe doğru meydana gelir (Türkoğlu 2020).

Köpük yoğunluğu ve hücre boyutu gibi karakteristik özelliklerin yanında, Açık/Kapalı Hücre Oranı, Anzitropi ve Hücre Şekli de belirleyici karakteristik özellikler olarak incelenebilir.

d. Kafes Kiriş Yapılar

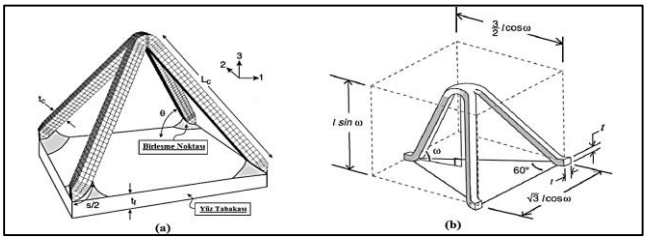
Son zamanlarda, gelişen yeni ihtiyaçlar doğrultusunda açık hücre mimarileri ile kafes çekirdek yapılar adı verilen yeni tür çekirdek malzemeler meydana getirilmiştir. Bu çekirdek yapısı genel olarak yapısal performans ve potansiyel çok işlevselliğin kombinasyonunu ortaya çıkarmıştır. Kafes çekirdek yapılar çok çeşitli geometrilerde olabilmektedir. En bilinen ve yaygın kullanılanları ise aşağıda Şekil 2.11'de verilen dörtyüzlü (tetrahedral), piramidal ve 3 Boyutlu kagome yapılardır. Kafes yapıların kiriş elemanları, sandviç paneller eğilme gerilmesiyle yüklendiğinde ağırlıklı olarak eksenel gerilime (çekme ve basma) karşı koymak için tasarlanmıştır. Böylece sandviç panel sadece eksenel deformasyonlara maruz kalacaktır. Birçok avantajının sayesinde çok işlevli uygulamalar için potansiyelleri nedeniyle özellikle günümüzde ilgi görmektedir (Türkoğlu 2020).



Şekil 2. 11. Farklı geometrilerde kafes kiriş çekirdek yapılar
a) Tetrahedral b) Piramidal c) 3 Boyutlu kagome (Kooistra ve Wedley 2007).

Nispi yoğunlukları ile doğrusal olarak ölçeklenen sertlik ve mukavemete sahiptirler. Bu nedenle, düşük göreceli yoğunluklarda, kafes yapıları, aynı ana malzemelerden yapılan köpük yapılara göre çok daha rijit ve dayanıklıdırlar. Yaygın olarak metal malzemelerden üretilen kafes kiriş yapıları üretilse de son yıllarda 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin gelişmesi gibi teknoloji gelişmeler sayesinde polimerik malzemelerden üretilmiş yapılarla da karşılaşılmaktadır (Türkoğlu 2020).

Kafes kiriş yapılar, çeşitli çok işlevli yapısal uygulamalar için potansiyel fırsatlar sağlayan mekanik, termal ve akustik özellik kombinasyonlarına sahip oldukları için günümüzde çok yaygınlaşmaktadır. Kafes malzemeler yüksek özgül mukavemet ve yüksek özgül şekil değiştirme, yüksek pozitif ve negatif Poisson oranı, mükemmel darbe sönümleme, akustik yalıtım, eşanjör olarak kullanıma uygunluk ile ultra hafif yapılar meydana getirirler. Ayrıca bu çekirdek yapılar sayesinde, balpeteği çekirdeğin, sandviç yapı içerisindeki nem ile korozyona yatkınlıkları ve delaminasyon potansiyeli gibi diğer eksikliklerini de azaltılabilir. Kafes kiriş yapıların temelini oluşturan iki ana geometrisi olan piramidal ve tetrahedral tek hücreli geometrileri aşağıda Şekil 2.12'de detaylı olarak gösterilmektedir (Türkoğlu 2020).

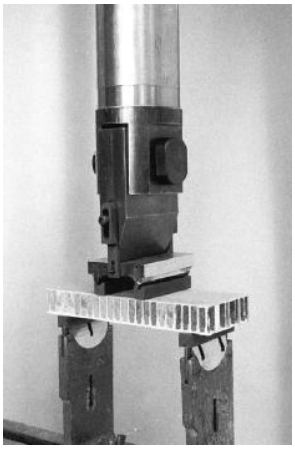


Şekil 2. 12. Tek hücreli kafes kiriş yapıların geometrileri
a) Piramidal kafes kiriş yapı (Zok ve ark. 2004) b) Tetrahedral kafes kiriş yapı (Kooistra ve ark. 2004)

2.2.4. Sandviç yapılara uygulanan test yöntemleri ve standartları

Eğilme Testi

Bükülmeye maruz kalan düz sandviç yapıların çekirdek kesme özelliklerinin belirlenmesini sağlayan test yöntemidir. ASTM C393 standardı bu test yöntemi için geliştirilmiştir. Şekil 2.13'de eğilme testine maruz kalan bir sandviç malzeme gösterilmektedir.



Şekil 2. 13. Sandviç yapı eğilme testi (ASTM C393)

Test sonrası sandviç malzemeye uygulanan maksimum kuvvet değeri alınarak nihai çekirdek kayma gerilmesi Denklem (2.3)'deki gibi hesaplanır:

$$F_s^{ult} = \frac{P_{max}}{(d+c)b} \tag{2.3}$$

F_s^{ult}: nihai çekirdek kayma gerilmesi, MPa [psi]

P_{max}: hasar öncesi max kuvvet, N [lb]

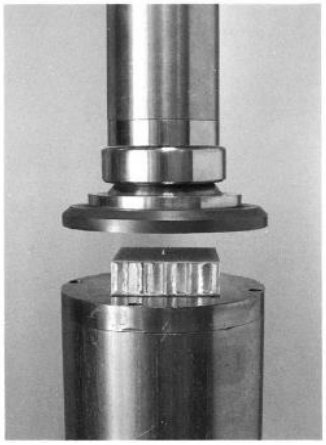
d: sandviç malzeme kalınlığı

c: çekirdek kalınlığı

b: sandviç malzeme genişliği

Bası (Düz Sıkıştırma) Testi

Bu test yöntemi, sandviç malzemelerin basınç dayanımının ve modülünün belirlenmesini sağlamaktadır. ASTM C365 standardı bu test yöntemi için geliştirilmiştir. Bası testi uygulamasına ait bir görsel Şekil 2.14' de verilmiştir.



Şekil 2. 14. Düz bası testi (ASTM C365)

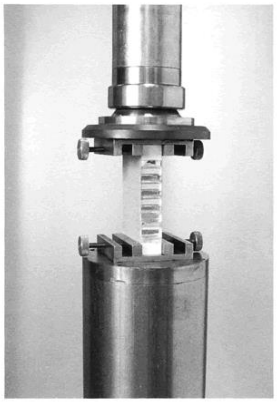
Düz bası testi sonucunda nihai basınç dayanımı hesaplanması Denklem (2.4)' deki gibidir:

$$F_z^{fcu} = \frac{P_{max}}{A} \tag{2.4}$$

F_z^{fcu}: Nihai düz basınç dayanımı, MPa [psi]
P_{max}: Hasar öncesi nihai kuvvet, N [lbf]
A: Kesit alanı, mm^2 $[in.^2]$

Enlemesine Sıkıştırma Testi

Bu test yöntemi, sandviç kaplama düzlemine paralel bir doğrultuda yapısal sandviç konstrüksiyonun sıkıştırma özelliklerini kapsamaktadır. ASTM C364 standardı ile test sonrasında sandviç malzemenin enlemesine basınç dayanımı bulunmaktadır. Şekil 2.15'de enlemesine bası testine ait bir görsel verilmiştir.



Şekil 2. 15. Enlemesine bası testi (ASTM C364)

Nihai enlemesine basınç dayanımı Denklem (2.5)' deki gibi hesaplanır:

$$\sigma = \frac{P_{max}}{w(2t_s)} \tag{2.5}$$

σ: Nihai enlemesin basınç dayanımı, MPa [psi]

P_{max}: Hasar öncesi nihai kuvvet, N [lbf]

w: Numune genişliği, mm [in.]

t_s: Tek bir facesheat kalınlığı, mm [in.]

Çekme Testi

Bu test yöntemiyle, çekirdeğin, çekirdek ile yüzey arasındaki bağın veya monte edilmiş bir sandviç panelin yüzeyinin düz gerilme mukavemeti sonucuna ulaşılmaktadır. ASTM C297 standardı bu test yöntemi için geliştirilmiştir. Düz çekme testine Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2. 16. Çekme testi (ASTM C297)

Nihai düz çekme mukavemeti hesaplanması Denklem (2.21)'de verilmiştir:

$$F_z^{ftu} = \frac{P_{max}}{A} \tag{2.6}$$

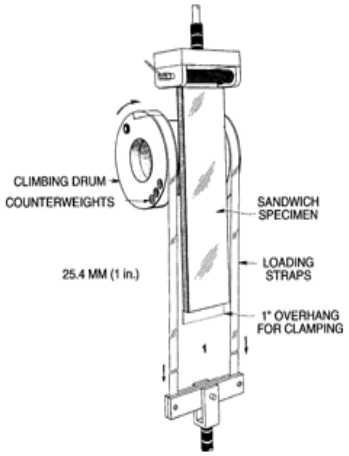
F_z^{ftu}: Nihai düz çekme dayanımı, MPa [psi]

P_{max}: Hasar öncesi nihai kuvvet, N [lbf]

A: Kesit alanı, mm^2 $[in.^2]$

Yapışma Testi

Bu test yöntemi, sandviç malzemedeki yapışkan bağların sıyrılma direncinin belirlenmesini kapsamaktadır. Test için ASTM D1781 standardı kullanılmaktadır. Şekil 2.17'de sandviç malzeme yapışma testi uygulamsı gösterilmektedir.



Şekil 2. 17. Yapışma testi (soyma uygulaması) (ASTM D1781)

Ortalama soyma torku hesaplanması Denklem (2.7)' deki gibidir:

$$\bar{F} = \frac{(r_0 - r_t)(F_p - F_0)}{W} \tag{2.7}$$

$\bar{F}$: Ortalama soyma torku, mm*kg/mm [in.*lb/in.]

r_0: Flanş yarıçapı (yükleme kayışlarının kalınlığının yarısı dahil), mm [in.]

r_t: Tambur yarıçapı + soyulmuş yapıştırıcının kalınlığının yarısı, mm [in.]

F_p: Yapıştırmayı bükmek ve soymak için gereken ortalama yük + direnç torkunun üstesinden gelmek için gerekli yük, kg [lb]

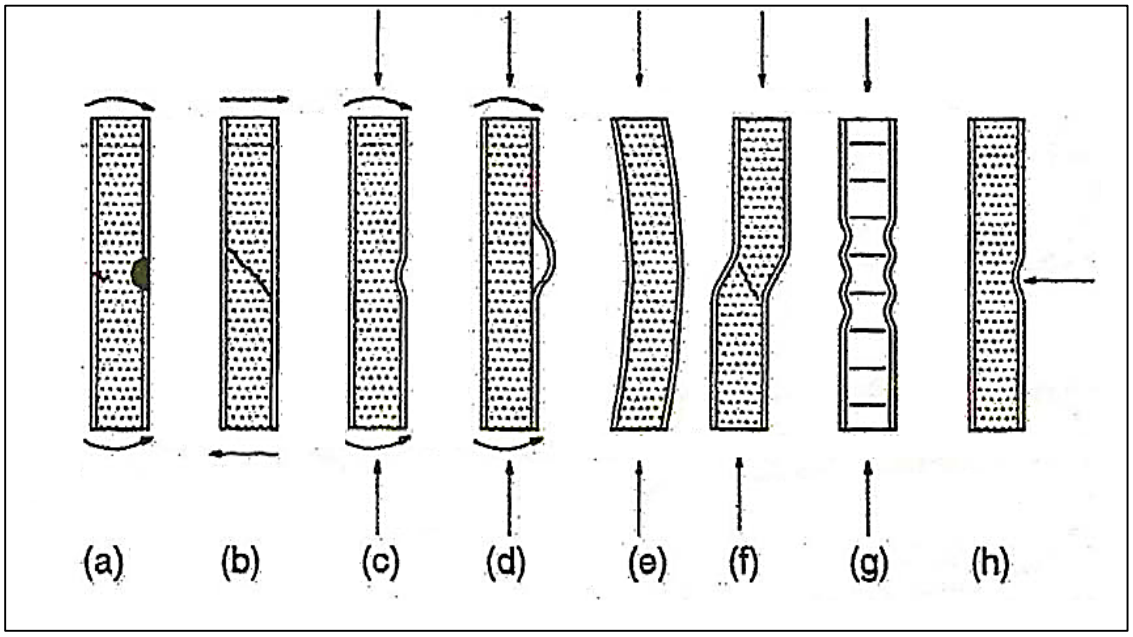
F_0: Direnç torkunun üstesinden gelmek için gereken yük, kg [lb]

W: Numune genişliği, mm [in.]

2.2.5. Düzlemsel sandviçler ve sandviç yapılarda oluşan hasar tipleri

Sandviç yapıların bazı tipik avantajları yüksek sertlik ve özgül mukavemet, titreşim ve yüksek enerji sönümleme kapasitesi, iyi termal ve akustik yalıtım vb. özellikleri sayılabilir. Temel bir dezavantaj ise düşük yoğunluklu polimer köpükler gibi çoğu çekirdek malzemenin nispeten düşük enine esnekliğe sahip olmasıdır. Bu nedenle, özellikle lokalize yüklemeler altında, yüz kırışması (wrinkling) ve lokal çekirdek girintisi (indentation) gibi bazı özgün başlangıç hasar modlarını gösterebilirler. Bu durum tasarımcılar tarafından dikkatle edilmelidir.

Sandviç yapının geometrisine, dış yükleme koşuluna ve sınır şartlarına bağlı olarak kritik yükleme sınırına ulaşıldığında yapılarda hasar başlangıcı görülebilir ve bu hasarda yapının işlevselliğini etkilemektedir. Düzlemsel sandviç kirişlerde en yaygın görülen hasar modları aşağıda Şekil 2.18'de görsel olarak verilmektedir (Türkoğlu 2020).



Şekil 2. 18. Sandviç kirişlerin en yaygın hasar modları
a) Yüz tabakası akması/kırılması b) Çekirdek kayma hasarı c-d) Yüz kırışması e) Genel burkulma f) Kayma kıvrılması g) Yüz tabakası çukurlanması h) Yerel çekirdek girintisi (batma) (Zenkert 1995)

Son yıllarda bazı araştırmacılar, genellikle bazı referans yükleme koşullarını ve yapılarını seçerek, bu tür çökme mekanizmalarının aktivasyonuna yol açan koşulları sistematik olarak incelemişlerdir.

Sandviç paneller, yapısal mekaniklerin geleneksel test yöntemleri kullanılarak analiz edilebilen basit yapılardır. Az sayıda mekanik özelliğin bilinmesi şartıyla, gerilmeleri ve sapmaları tahmin edilebilir ve yapısal bir analiz temelinde kullanılabilirler. Bununla birlikte, nispeten esnek çekirdek malzemenin etkisi nedeniyle, sandviç paneller geleneksel kiriş ve plaka teorisine göre tasarlanamaz. Çoğu sandviç panel bir yönde uzanmasından dolayı çekirdeğin kesme esnekliğini hesaba katan artırılmış bir kiriş teorisi gerektirir (Türkoğlu 2020).

Ayrıca, yaygın olarak kullanılan çekirdek malzemelerin çoğu, uzun süreli gerilmelere maruz kalırlar. Bir başka önemli husus, çekirdek malzemelerin genellikle termal yalıtım özellikleri nedeniyle seçilmeleri ve sonuç olarak panelin yüzleri arasında büyük sıcaklık farklarının mevcut olabilmesidir. Bu, sandviç panellerin sıcaklık etkilerine özellikle duyarlı olma eğiliminde olduğuna işaret etmektedir. Bu nedenle yapısal davranış dikkate alındığında dikkate alınması gereken ana faktörler aşağıdaki gibidir (Türkoğlu 2020):

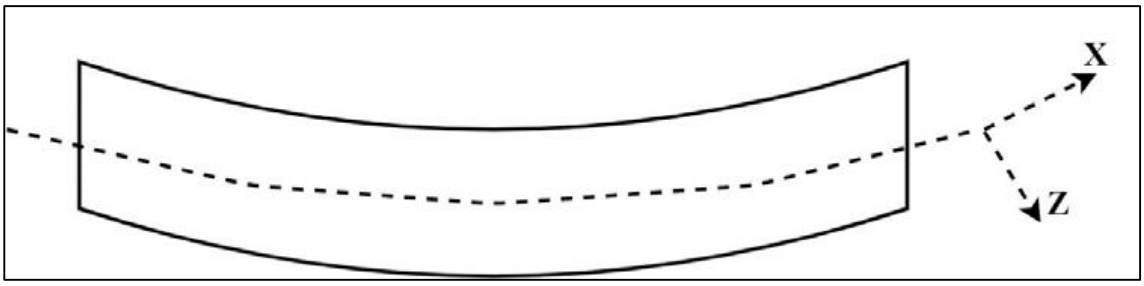
- Çekirdeğin kesme esnekliğinin genel davranış üzerindeki etkisi.
- Çekirdeğin, yüz tabakalarının lokal burkulmasını (kırışmasını) engellemedeki etkisi.
- Sıcaklığa bağlı stres ve sapmaların etkisi.
- Sert köpük çekirdek malzemelerinin zamanla sürünmesi.

2.2.6. Düzlemsel sandviç mekaniği

Bu bölümde sandviç kiriş teorisinin temelleri hakkında bilgi verilecektir. Mühendislik kiriş teorisi ile hemen hemen aynı olan, Timoshenko Kiriş Teorisi olarak anılan bu teoride farklı olarak enine kesme deformasyonlarını hesaba katılması gerekecektir. Mühendislik kiriş teorisinden başka bir yenilik ise, farklı yüklerin yapının farklı bölümleri tarafından taşınmasıdır. Basitlik için, tüm kirişlerin birim genişliğine, sahip olduğu varsayılarak değerler birim genişlik başına gösterilecektir. Yüz plakaları için "f" indeksi kullanılırken çekirdek için "c" indeksi kullanılacaktır (Türkoğlu 2020).

Eğilme Rijitliği

Kirişe bir eğrilik (K_x) (eğrilik yarıçapının (R) tersi) veren sabit bir eğilme momentine maruz kalan düz bir kirişin temel problemini Şekil 2.19 'da verilmektedir.



Şekil 2. 19. Eğilme momentine maruz bir kiriş

Nötr eksenden z kadar uzaklıkta bulunan bir lifteki gerinim değeri Denklem 2.8'deki gibi ifade edilebilir;

$$\varepsilon_x = K_X . z \tag{2.8}$$

Yani gerinim z ile doğrusal olarak değişir. K_x eğriliğine neden olmak için uygulanması gereken eğilme momenti ifadesi ise Denklem 2.9'da gösterildiği gibi olur;

$$M_x = \int \sigma_x . z dz = \int \frac{E.z^2}{R_x} . dz = K_x \int E . z^2 . dz = \frac{E.I}{R_x} \tag{2.9}$$

Buradan da eğilme rijitliği ifadesi çekilirse;

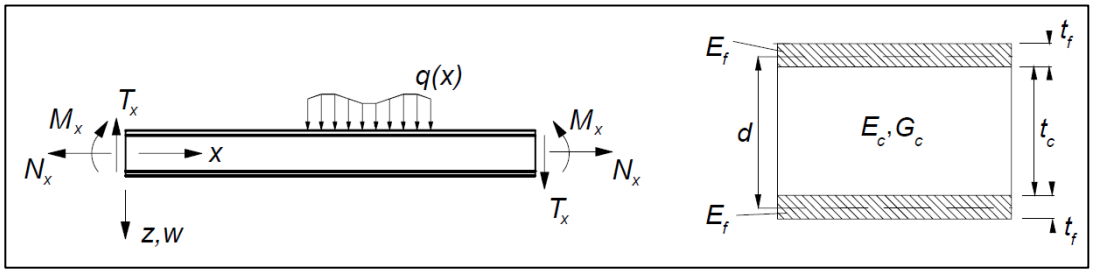
$$E.I = \int E.z^2 . dz = D \tag{2.10}$$

olarak elde edilir. E.I, normalde elastik modül E'nin ve atalet momentinin ürünü olan eğilme rijitliğidir. Young's modülü E, z-koordinatı boyunca değiştiği için Denklem 2.10'daki integrali çözülemez ve E.I artık D olarak adlandırılacaktır. Bu nedenle, genel bir kesit için, Denklem 2.10 verildiği gibi kullanılmalıdır ve eğilme rijitliği (D) iyi tanımlanmış tek özellik olacaktır. Böylece gerinim için geçerli son ifade Denklem 2.11' gibi olacaktır;

$$\varepsilon_x = \frac{M^x.z}{D} \tag{2.11}$$

Bu sayede şekil değiştirme hala kesit üzerinde z ile doğrusal olarak değişir.

Temel denklemler oluşturulduğuna göre, bir sandviç kiriş içindeki enine kesit özelliklerini ve gerilmeleri hesaplanabilir. İlk olarak, koordinat sistemini ve yükler için pozitif yönleri Şekil 2.20'deki gösterilmiştir.



Şekil 2. 20. Sandviç kiriş için işaretlerin belirlenmesi (Zenkert 1995)

Bu aşamadaki analizi karmaşıklaştırmamak için, sandviçin simetrik bir düzende olduğu kabul edilir, yani yüzler aynı kalınlığa t_f sahip ve aynı malzemeden yapıldığından elastik modül E_f aynı olacaktır. Çekirdeğin kalınlığı t_c ve elastik modül E_c olarak alınır. Eğilme Rijitliği (D) daha sonra Şekil 2.20'deki gibi bir kesit için şu ifadeyi alır;

$$D = \int E.z^2.dz = \frac{E_f.t_f^3}{6} + \frac{E_f.t_f.d^2}{2} + \frac{E_c.t_c^3}{12} = 2.D_f + D_0 + D_c \quad (2.12)$$

Burada $d = t_f + t_c$, yüzlerin merkezleri arasındaki mesafedir. İlk terim, tek tek nötr eksenleri etrafında eğilen yüzlerin eğilme rijitliğidir, ikincisi, tüm sandviçin merkez ekseni etrafında eğilme ile ilişkili yüzlerin rijitliğini gösterir ve üçüncü terim çekirdeğin eğilme rijitliğidir.

Yüzler, çekirdek ile karşılaştırıldığında genellikle incedir, yani $t_f \ll t_c$'dir ve Denklem 2.12'nin ilk terimi bu nedenle oldukça küçüktür ve eğer ikincisinin yüzde 1'inden azsa Denklem 2.13'teki ifade kullanılır;

$$3.\left(\frac{d}{t_f}\right)^2 > 100 \quad \text{veya} \quad \frac{d}{t_f} > 5.77 \quad (2.13)$$

Malzeme seçiminin sonucunda, çekirdek genellikle yüzünkinden çok daha düşük bir modüle sahip olur, yani $E_c \ll E_f$ Dolayısıyla, Denklem 2.12 'de üçüncü terim;

$$\frac{6.E_f.t_f.d^2}{E_c.t_c^3} > 100 \quad (2.14)$$

Böylece, ince yüzleri olan bir sandviç, $t_f \ll t_c$ ve zayıf bir çekirdek, $E_c \ll E_f$ için, eğilme rijitliği yaklaşık olarak Denklem 2.15'teki gibi yazılabilir;

$$D = \frac{E_f.t_f.d^2}{2} \quad (2.15)$$

Sandviç yapımında kullanılan sıradan mühendislik malzemeleri için, çekirdek / yüz kalınlığı oranı yaygın olarak 10 ila 50 rejiminde ve yüz / çekirdek modülü oranı 50 ile 1000 arasında olmaktadır. Eğilme rijitliği için ifadedeki baskın terim, tüm sandviçin nötr ekseni etrafında eğilen yüzlerin terimidir. Bu kısım, yüzlerin doğrudan gerilme-sıkıştırmasından kaynaklanan kısımdır. Bir sandviçin eğilme rijitliğini esas olarak bileşenlerin etkileşiminden kaynaklanan kısımdan oluşması, genellikle sandviç etkisi olarak adlandırılır (Türkoğlu 2020).

Sandviç Kirişlerde Gerilmeler

Denklem 2.11 'deki gerinim tanımını kullanarak, sandviçin eğilmeye bağlı gerilmeleri kolayca bulunabilir. Yüz ve çekirdek gerilmeleri;

$$\sigma_f = \frac{M_x.z.E_f}{D} \ , \ \frac{t_c}{2} < |z| < \frac{t_c}{2} + t_f \quad \text{ise} \tag{2.16}$$

$$\sigma_c = \frac{M_x.z.E_c}{D} \approx 0 \ , |z| < \frac{t_c}{2} \quad \text{ise} \tag{2.17}$$

Gerilmeler her bir malzeme bileşeni içinde doğrusal olarak değişiklik gösterir, ancak yüz / çekirdek ara yüzündeki gerilmede bir sıçrama vardır. Düzlem içi yüke bağlı olduğundan gerilim ve gerinim;

$$\varepsilon_{x0} = \frac{N_x}{E_1.t_1 + E_2.t_2 + E_c.t_c} = \frac{N_x}{A_x} \tag{2.18}$$

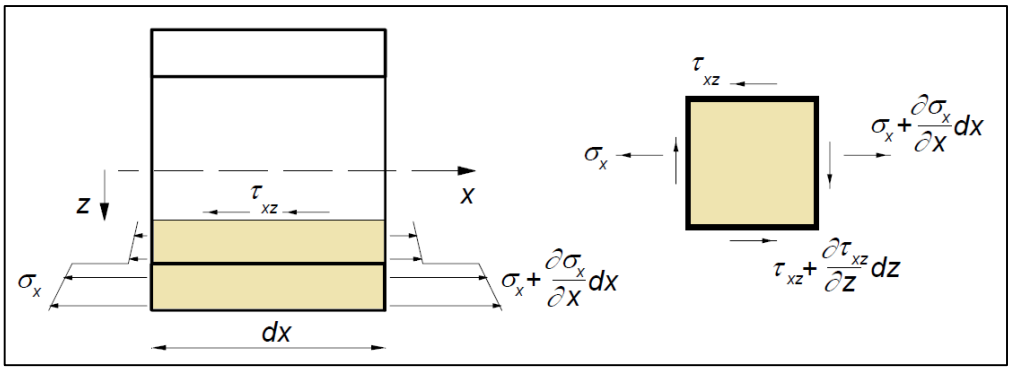
ve böylece de;

$$\sigma_f = \varepsilon_{x0}.E_f \qquad \text{ve} \qquad \sigma_c = \varepsilon_{x0}.E_c \tag{2.19}$$

Burada ε_{x0} nötr eksendeki gerinimdir. Daha sonra bükülme ve düzlem içi yüklere bağlı gerilme ve gerinmeler bir araya getirilebilir (Türkoğlu 2020).

Kayma Gerilmesi

Şekil 2.20' de gösterildiği gibi bir kirişin bir elemanının (örneğin Şekil 2.19'deki kiriş) kesme kuvveti, doğrudan gerilme alanındaki değişimi dengelemelidir.



Şekil 2. 21. Bir alt alan için denge tanımlayan kiriş dx kesiti (Zenkert 1995)

$$\frac{d.\sigma_x}{d_x} + \frac{d.\tau_{xz}}{d_z} = 0 \rightarrow \tau_{xz}(z) = \int_z^{(d+t_f)/2} \frac{d.\sigma_x}{d_x}.d_z \qquad (2.20)$$

$(d + t_f)/2$ değerinde τ_{xz} 'nin 0'a eşit olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda, Denklem 2.16 ve 2.17'den $d.M_x/d_x = T_x$ değeri kullanılırsa Denklem 2.21 elde edilir;

$$\tau = \frac{T_x}{D}.\int_z^{(d+t_f)/2} E.z.d_z = \frac{T_x.B(z)}{D} \qquad (2.21)$$

Burada B(z) alanın ilk momentini göstermektedir. Formül homojen bir enine kesit için daha iyi bilinen $T_x.J(z) / I$ formülüne indirgenir, burada J, en alışılmış tanımı ile alanın ilk momentini göstermektedir. Bunun yerine, integral şu şekli alır;

$$B(z) = \int_z^{(d+t_f)/2} E.z.d_z \qquad (2.22)$$

Bu denklem alanın ilk momenti için yeni ve daha genel bir tanım olur. Böylece, $|z| \leq t_c/2$ olan çekirdek malzemeler için alanın ilk momenti Denklem 2.23'teki gibi olur;

$$B(z) = \frac{E_f.t_f.d}{2} + \frac{E_c}{2}.\left(\frac{t_c}{2} - z\right).\left(\frac{t_c}{2} + z\right) \qquad (2.23)$$

Çekirdekteki kayma gerilmesi de Denklem 2.24'teki gibi olur;

$$\tau_c(z) = \frac{T_x}{D}\left[\frac{E_f.t_f.d}{2} + \frac{E_c}{2}\left(\frac{t_c^2}{4} - z^2\right)\right] \quad (2.24)$$

Benzer şekilde, $t_c/2 \leq |z| \leq {}^{t_c}/_2 + t_f$ olan yüz plakalarında;

$$B(z) = \frac{E_f}{2}\left(\frac{t_c}{2} + t_f - z\right)\left(\frac{t_c}{2} + t_f + z\right) \rightarrow \tau_f(z) = \frac{T_x}{D}.\frac{E_f}{2}.\left(\frac{t_c^4}{4} + t_c.t_f + t_f^2 - z^2\right) \quad (2.25)$$

Maksimum kesme gerilmesi nötr eksende, yani z = 0 olduğu noktada oluşur;

$$\tau_{c,max}(z = 0) = \frac{T_x}{D}\left(\frac{E_f.t_f.d}{2} + \frac{E_c.t_c^2}{8}\right) \quad (2.26)$$

ve yüz / çekirdek ara yüzündeki kesme gerilimi Denklem 2.27'deki gibi olur;

$$\tau_{c,min} = \tau_{f,max} = \tau.\frac{\tau_c}{2} = \frac{T_x}{D}\left(\frac{E_f.t_f.d}{2}\right) \quad (2.27)$$

ve Denklem 2.27'den anlaşılacağı üzere yüz plakalarının dış elyafındaki kayma gerilimi sıfırdır ki bu açıkça bir serbest yüzey için geçerli olmalıdır.

Eğer aşağıdaki şart sağlanırsa; Denklem 2.26 ve 2.27'ye göre çekirdekteki maksimum ve minimum kesme gerilimi arasındaki oran %1'den az ve oldukça küçük bir değer olacaktır,

$$\frac{4.E_f.t_f.d}{E_c.t_c^2} > 100 \quad (2.28)$$

Denklem 2.16 ile Denklem 2.28 arasını özetlemek gerekirse,

Çekirdek zayıf olursa, Ec<<Ef, gerilmeler şu şekilde yazılabilir;

$$\sigma_c(z) = 0 \tag{2.29}$$

$$\sigma_f(z) = \frac{M_x.z.E_f}{(D_0+2.D_f)} \tag{2.30}$$

$$\tau_c(z) = \frac{T_x.E_f.t_f.d}{2.(D_0+2.D_f)} \tag{2.31}$$

$$\tau_c(z) = \frac{T_x}{(D_0+2.D_f)}.\frac{.E_f}{2}.\left(\frac{t_c^4}{4} + t_c.t_f + t_f^2 - z^2\right) \tag{2.32}$$

Çekirdek zayıfsa, Ec<<Ef,, ve yüz plakalar inceyse tf << tc, denklem mümkün olan en basit haline indirgenmektedir;

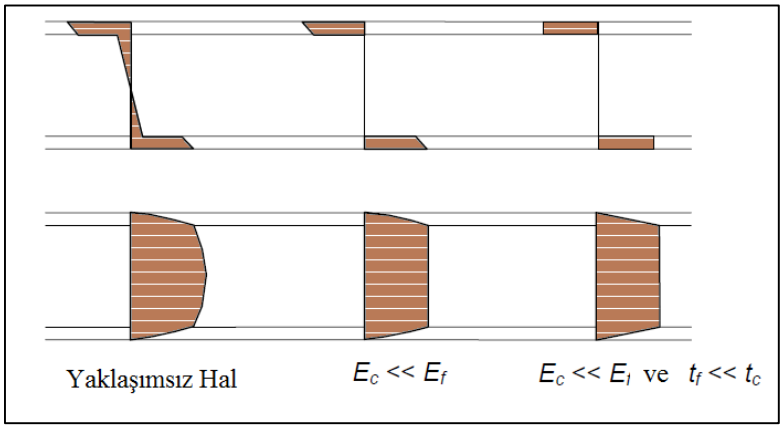
$$\sigma_c(z) = 0 \tag{2.33}$$

$$\sigma_f(z) = \pm\frac{M_x}{t_f.d} \tag{2.34}$$

$$\tau_c(z) = \frac{T_x}{d} \tag{2.35}$$

$$\tau_c(z) = 0 \tag{2.36}$$

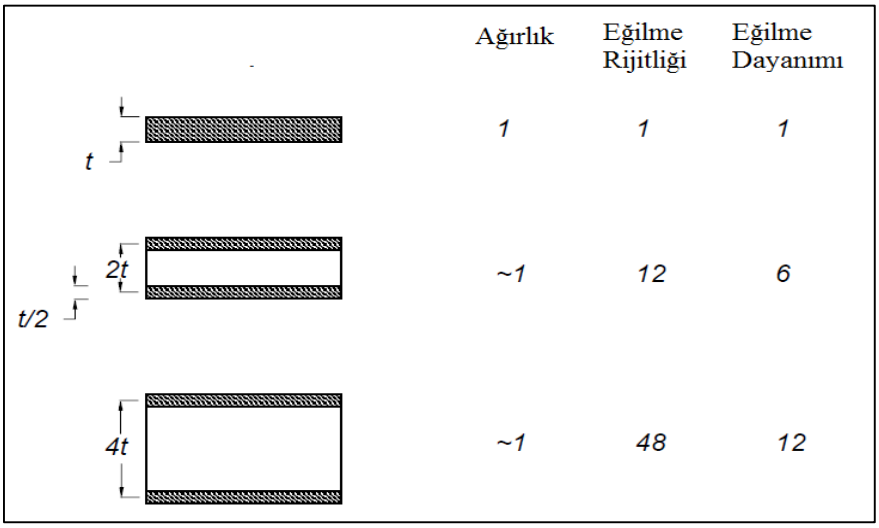
Bu, yapısal bir sandviçin çalışma prensibini veya ana yük taşıma ve gerilme dağılımlarını basitleştirir: yüzler, eğilme momentlerini gerilme ve sıkıştırma gerilmeleri olarak taşır ve çekirdek, kesme gerilmeleri olarak enine kuvvetleri taşır (Türkoğlu 2020).



Şekil 2. 22. Farklı yaklaşım seviyeleri için normal ve kayma gerilmeleri (Zenkert 1995)

Sandviç Etkisi

Yukarıdaki formülasyonlar incelendiğinde, artık sandviç kirişlerin karşılık gelen rijitlik ve mukavemetlerinin hesaplanması mümkün hale gelmektedir ve Şekil 2.23'te verilen bağıl özellikler bulunabilir (Türkoğlu 2020).

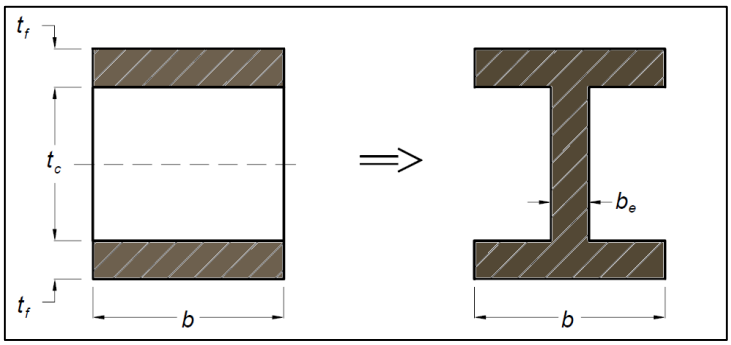


Şekil 2. 23. Homojen ve sandviç kesitlerin karşılaştırılması (Zenkert 1995)

Şekil 2.23 incelendiğinde, sandviç konsepti kullanılarak, eğilme rijitliği ve eğilme dayanımı, fazla ağırlık eklemeden tek bir plaka yapısına kıyasla önemli ölçüde arttırılabilmektedir (Türkoğlu 2020).

Eşdeğer Genişlik

Bir sandviçi analiz etmenin bir başka yolu da, sandviç yapıyı bir I-kirişi olarak görerek ele almaktır. Aşağıda Şekil 2.24'te gösterildiği gibi genişliği b olan bir sandviç yapıyı, yine genişliği b olan bir I-Kirişi gibi düşünüldüğünde,



Şekil 2. 24. Sandviç yapı ve I-kirişin eşdeğer ağ genişliği (Zenkert 1995)

İki kesitin aynı bükülme sertliğine sahip olması için I-kirişinde ağın kalınlığını hesaplanması ya da sandviçin çekirdeğini yüzlerle aynı modüle sahip olana kadar sıkıştırabildiğini düşünüldüğünde,

$$\frac{E_c.b.t_c^3}{12} = \frac{E_f.b_e.t_c^3}{12} \quad \rightarrow \quad b_e = \frac{E_c}{E_f}.b \tag{2.37}$$

Bu şekilde kurgusal bir atalet momenti Denklem 2.38' deki gibi hesaplanabilir:

$$I = 2.\frac{t_f^3}{12} + 2.t_f.\frac{d}{2} + \frac{E_c}{E_f}.\frac{t_c^3}{12} \tag{2.38}$$

Bununla birlikte, bu I değerinin sadece belirli bir E_f için geçerlidir, böylece $E_f.I = D$ eşitliğinin geçerli olmaktadır. Eylemsizlik momenti gibi bir özelliği kullanmadan önce çok dikkatli edilir, çünkü özellikle bir elastisite modülüyle birlikte verilmedikçe iyi tanımlanmamış kabul edilmektedir (Türkoğlu 2020).

2.3. Şok Testi Fiziği

Süpersonik uçuşun ortaya çıkışı, şok dalgalarının daha iyi anlaşılmasına ve şok dalgaları tarafından işlenen gazların özellikleri hakkında daha fazla bilgi sahibi olmayı bilinmesini gerekli kıldı.

Şok tüpü, gerçek patlamalar ve bunların etkilerini, genellikle daha küçük ölçekte simüle etmek için kullanılan bir deney makinesidir. Şok tüplerinin birçok kullanım alanına sahiptir. Bunlardan başlıca olanları, diğer test tesislerinde elde edilmesi zor olan çok çeşitli sıcaklık ve basınç altında aerodinamik akışı incelemek için de kullanılması, sıkıştırılabilir akış olaylarını ve gaz fazı yanma reaksiyonlarını araştırmak için kullanılması, biyomedikal araştırmalarda biyopsi örneklerinin patlama dalgalarından nasıl etkilendiğini incelemek için kullanılmasıdır.

Kimyasal kinetik oranlarının ölçümlerine ek olarak, aerodinamik testlerde kullanılmış olan ayrışma enerjilerini ve moleküler gevşeme oranlarını ölçmek içinde şok tüplerinden yararlanılır. Şok tüpü yüksek basınç bölgesindeki akışkan ile bir rüzgâr tüneli olarak da kullanılabilir, bu da jet motorlarının türbin bölümlerinde yüksek basınç ve sıcaklık bölgelerinde test yapılmasına olanak sağlar. Ancak test süreleri, temas yüzeyinin veya yansıyan şok dalgasının gelmesiyle birkaç milisaniye sürmektedir. Ortaya çıkan yüksek sıcaklıklı hipersonik akış, yine sınırlı test süreleriyle, uzay araçlarının veya hipersonik araçların atmosfere yeniden girişini simüle etmek için kullanılabilir.

Şok tüpleri, gerçek patlamaları ve daha küçük çapta meydana gelebilecek patlama hasarlarını simüle etmek amacıyla hem bir sensörde hem de bir numune üzerinde patlama dalgaları oluşturmak ve yönlendirmek için kullanılan bir deney aracıdır.

Şok tüp deneylerinden elde edilen sonuçlardan, bir materyalin veya numunenin, patlaması dalgasına tepki modelinin geliştirilmesinde ve doğrulanmasında faydalanılabilir. Şok tüpleri, hangi malzeme ve tasarımların patlama dalgalarının zayıflatılması işi için en uygun olacağını deneysel olarak tespit etmek için kullanılabilir.

2.3.1. Sıkıştırılabilir akışlar

Teorik olarak tüm akışkanlar sıkıştırılabilirdir ama sıkıştırılabilirlik derecesine göre sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz olmak üzere ikiye ayrılmışlardır. Yüksek basınç altında sıkıştırıldığında yoğunluğu açık bir biçimde artan akışkanlara sıkıştırılabilir akışkanlar denir. Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışkanlar arasındaki ana fark bir kuvvetin akışkanlar içindeki iletim hızıdır (Saad 1993).

2.3.2. Ses dalgaları ve ses hızı

Doğası gereği tüm akışkanlar elastiktir. Bir basınç dengesizliği birbirini izleyen yoğun ve seyrek bölgeler olarak iletilir. Durağan gazın termodinamik durumundaki düzensizlik basınç ve yoğunlukta, basınç ve yoğunluğun yerel değerleriyle aynı mertebede değişikliklere yol açmasından dolayı buna sonlu düzensizlik adı verilir. Ama bu düzensizliğin çok küçük olduğu durumlarda ($\Delta P/P \ll 1$), küçük düzensizlik Denklem 2.39'daki gibi ses hızında ilerler.

$$c^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right) \tag{2.39}$$

burada P ve ρ sırası ile basınç ve yoğunluktur. Bununla birlikte, bir dengesizliğin gücü yeterince büyük olduğunda, yani P ile hemen hemen aynı düzeye geldiğinde, dalganın hızı bir ses dalgasının hızını geçer ve üretilen yüksek genlikli dalgaya bir şok dalgası denir.

Çizelge 2. 2. Tablo ses dalgası ile şok dalgası arasındaki farklar

Ses dalgaları	**Şok dalgaları**
Ses hızının altında hareketlerdir	Ses hızında ve üstüne hareketlerdir
Ses dalgasının geçişi sırasında gazın termodinamik durumunda değişiklik olmaz	Gazın termodinamik durumu, ardışık sıkıştırma ve seyrelme nedeniyle değişmiştir.
Ses dalgasının meydana gelmesi izentropiktir.	Şok dalgasının oluşumu geri dönüşümsüzdür

2.3.3. Mach sayısı

Mach sayısı, Denklem 2.40'da gösterildiği gibi akışkan bir parça parçacığın hızının ses hızına oranıdır.

$$M = \frac{V}{c} = \frac{V}{\sqrt{\frac{\partial P}{\sqrt{\partial \rho}}}} \tag{2.40}$$

Burada V akışkan parçacığın ortamdaki hızı ve c de sesin aynı ortamdaki hızıdır. Akışkanın hızının ses hızına oranı Çizelge 2.3' deki gibi sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2. 3. Akış tipleri

M<1	Subsonik
M=1	Sonik
0.8< M < 1.2	Transonik
M > 1	Süpersonik

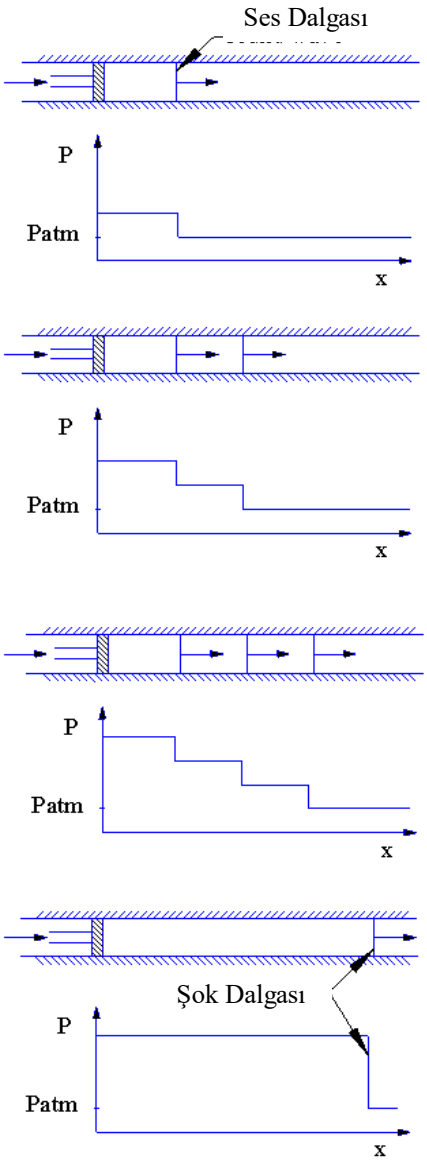
Şok dalgaları ve genişleme dalgaları

Bu bölümde, şok dalgasının ve onun tamamlayıcı parçası olan genleşme dalgalarının açıklaması hakkında bilgiler verilecektir.

Yüksek basınçlı gazın aniden düşük basınçlı gazla temas ettiğinde, düşük basınçlı bölgeye yüksek basınçlı gazın genleşmesi, düşük basınçlı gazın içine yayılan zayıf bir sıkıştırma dalgasını meydana getirir. Yüksek basınçlı gaz aniden düşük basınçlı gazla temas ettiğinde, düşük basınçlı bölgeye yüksek basınçlı gazın genleşmesinin gerçekleşmesiyle düşük basınçlı gazın içine yayılan zayıf bir sıkıştırma dalgası oluşur. Gazlar arasındaki (genellikle 2.5'ten büyük) yeterince yüksek bir basınç farkı için, bir dizi sıkıştırma dalgası bir şok dalgası oluşturmak üzere bir araya gelirler. Sıcaklık anında artar ve şok boyunca entropi artışı olur, bu da akışı geri döndürülemez hale getirir. Hız, basınç, sıcaklık ve yoğunluk gibi akışkan özelliklerinde değişim meydana gelir. Bir sıkıştırma şok dalgası bir yönde ilerlediğinde, ters yönde genişleme dalgası ilerlemesi de bulunur (Saad 1993).

Sıkıştırma dalgası

Şekil 2.25, bir kanalda bir sıkıştırma dalgasının oluşumunu göstermektedir. Yüksek basınçlı gaz aniden düşük basınçlı bir gaza maruz kaldığında düşük kütle pistonu olarak adlandırılabilir. Pistonun hızı, daha sonra, sabit bir V büyüklüğüne ulaşana kadar, zaman içinde küçük bir artış dV ile artar. Pistonun sağa doğru ilk artışından sonra, düşük basınçlı gaz boyunca yayılan zayıf bir sıkıştırma dalgasını meydana getirir (Saad 1993).

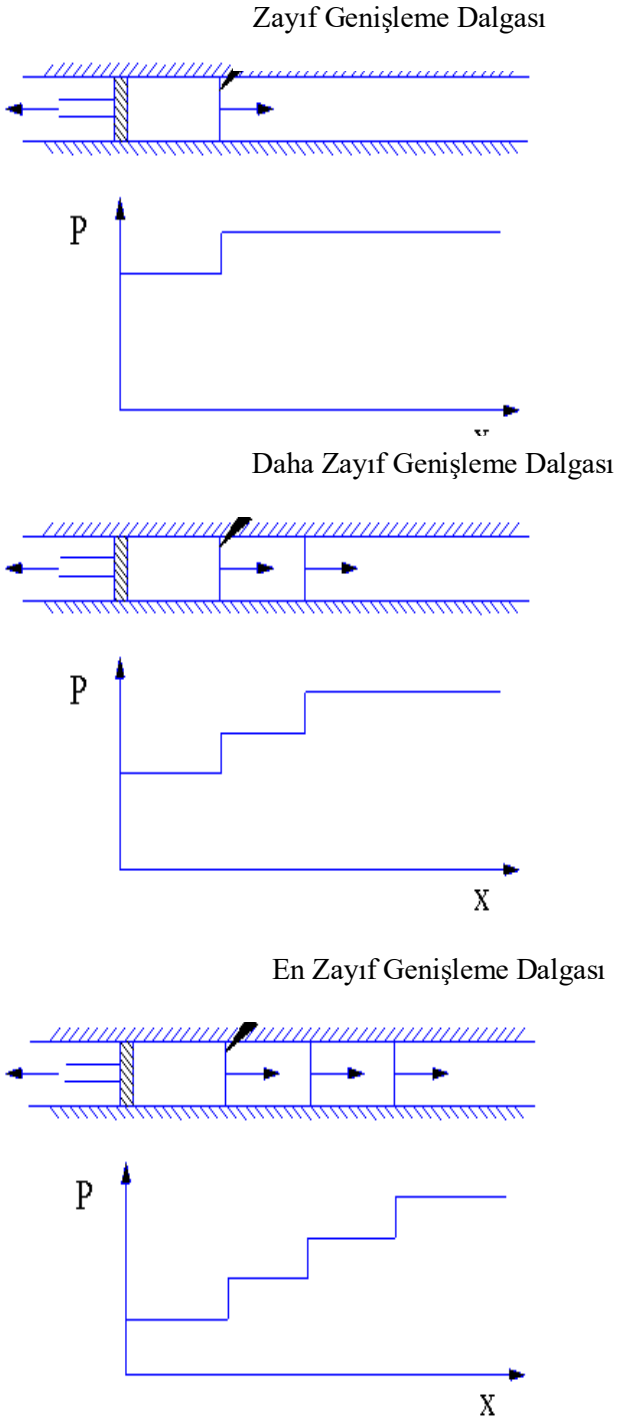


Şekil 2. 25. Şok dalgası meydana gelişi (Saad 1993)

Dalganın geçişi nedeniyle, dalganın arkasındaki gazın basıncı ve sıcaklığı artar ve gaz dV hızı ile sağa doğru gider. Piston dV tarafından ikinci kez hızlandığında, birinci dalgadan daha yüksek bir sonik hızda gaza giden başka bir dalga üretilir, çünkü içinden geçtiği gaz, birinci dalganın geçişi nedeniyle zaten daha yüksek bir sıcaklık ve basınçtadır. Sesin hızı, içinden geçtiği gazın özelliklerine bağlıdır ve böylece ikinci dalga, ilk dalgaya göre daha yüksek mutlak hıza sahiptir ve sonunda bu hızıyla ilk dalgayı yakalar. Aynı şekilde, üçüncü dalga ilk ikisini de geride bırakır. Bu dalgalar sonlu kalınlıkta tek bir sıkıştırma şok dalgası meydana getirmek için birbirlerini güçlendirir (Saad 1993).

Genişleme dalgaları

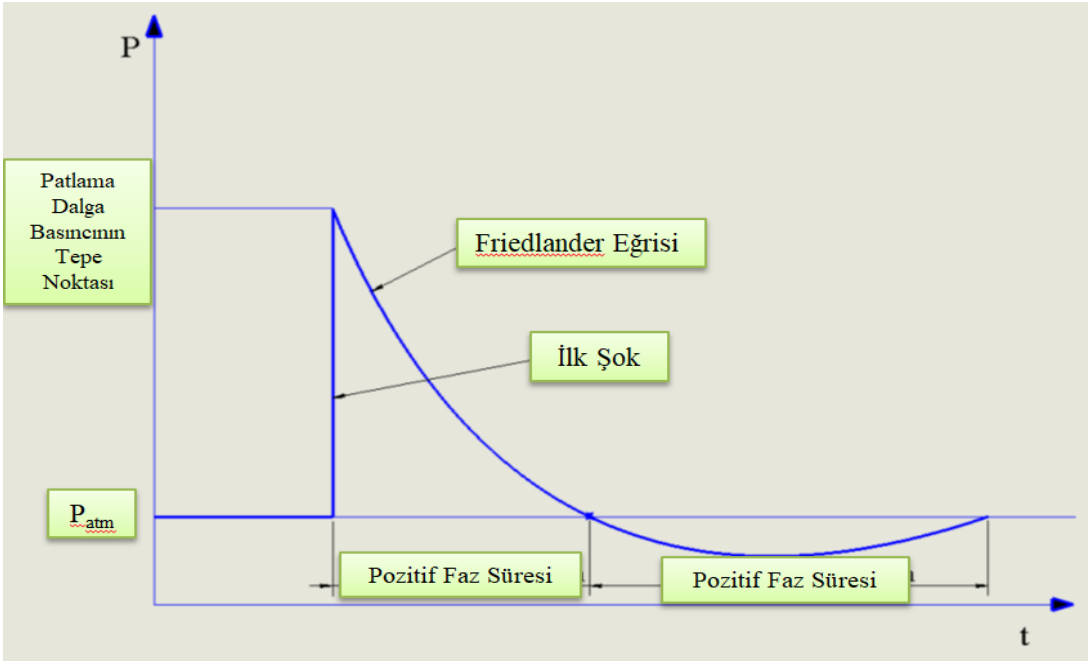
Genişleme dalgasının gelişimi benzer şekilde açıklanabilir. Aynı piston benzemesi uygulandığında, piston küçük bir dV hızıyla sola doğru hareket ettirilirse, zayıf bir genleşme dalgası bir gazın içinden sağa doğru hareket eder. Pistonun arkasındaki gaz, piston hareketinden dolayı dV hızında sola doğru hareket eder. Genleşme dalgasının geçişinden dolayı, arkasındaki gazın basıncı ve sıcaklığında azalma meydana gelir. Piston ikinci kez hızlandığında, bir başka genişleme dalgası geçer ve bu genişleme dalgası ilkinden daha düşük bir hıza sahiptir, çünkü içinden geçtiği gazdan daha düşük bir basınç ve sıcaklıktadır. Sıkıştırma dalgalarından farklı olarak, genişleme dalgalarında gaz ters yönde hareket eder. Her bir ardışık genleşme dalgası öncekinden daha düşük bir hıza sahip olduğu için, ardışık genişleme dalgaları, tek bir genişleme dalgası oluşturmak için birbirlerinin işini zorlaştırmazlar. Şekil 2.26 'da genişleme dalgası gösterilmiştir (Saad 1993).



Şekil 2. 26. Genişleme Dalgaları (Saad 1993)

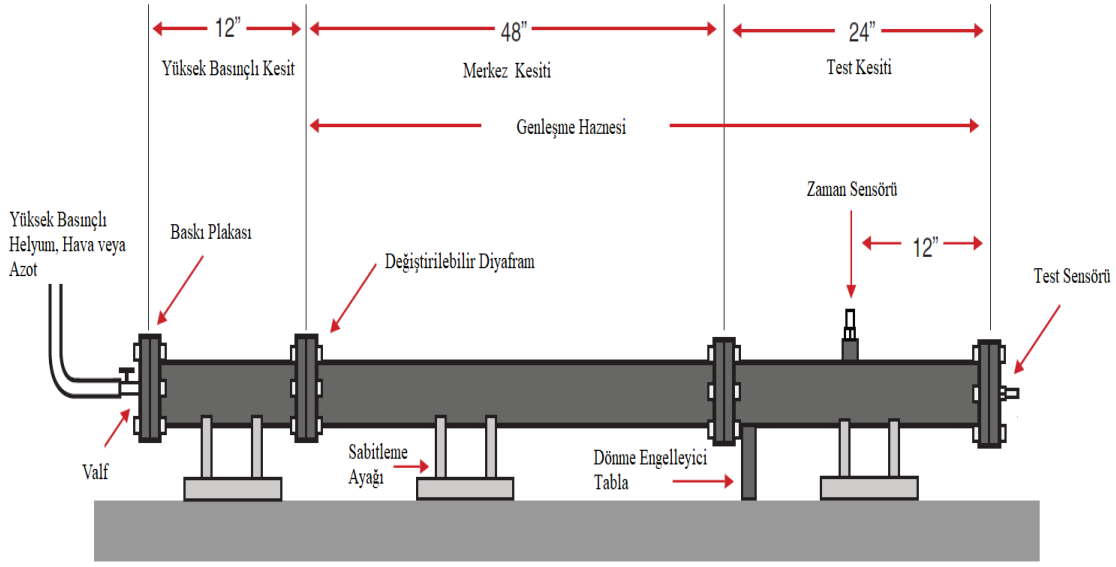
Patlama Dalgası

Bir patlamada hem şok hem de genişleme dalgalarının bir dalga sistemi oluşturulur. Şok dalgası ileri yöndeki alana doğru yayılırken, ters yönde yayılan genişleme dalgaları patlamanın kaynağından geriye doğru gider. Bu yansıyan dalgalar bir süre sonra şok dalgasını geçip yavaşlatır. Bu çarpık şok dalgası, bu olaydaki özelliklerinin şoktan çok farklı olmamasına rağmen, bir "patlama dalgası" olarak isimlendirilir. Patlamanın kaynağının çevresinde, yansıyan genişleme dalgaları, şok molekülünün çok yakınında sıvı molekülleri vasıtasıyla hissedildiği ve akışın yavaşladığı bir negatif basınç bölgesi oluşturur. Bu eylem şok dalgasını patlama dalgasına indirger. Patlamadan elde edilen karmaşık dalga şekli, Şekil 2.27'de gösterilen Friedlander dalgası ile ilişkilendirilebilir. Bir patlama dalgasının ana özellikleri tepe basıncı, pozitif ve negatif faz süreleridir. Pozitif faz süresi, basıncın çevre basıncından daha büyük olduğu zamandır, negatif faz süresi ise basıncın ortam basıncından daha düşük olduğu zamandır (Saad 1993).



Şekil 2. 27. Friedlander ya da ideal patlama dalgaları (Saad 1993)

2.3.4. Şok tüpü

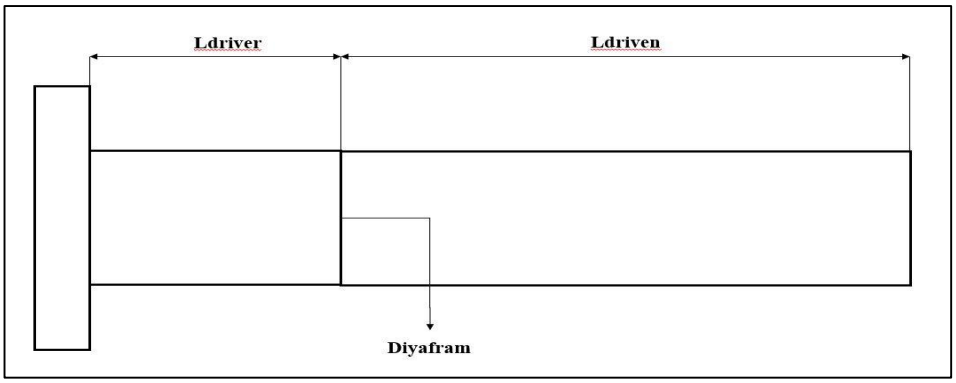


Şekil 2. 28. Örnek bir şok tüp tasarımı

Şok tüpleri genellikle laboratuvarda şok ve patlama dalgaları meydana getirmek için kullanılır. Bu bölümde tipik şok tüplerinin çalışması ve bunları kullanarak patlama dalgaları üretmek için kullanılan yaklaşım açıklanmaktadır. Sıkıştırılmış gazla çalışan şok tüpleri, laboratuvarda şok dalgaları üretmek için kullanılan bir deney makinesidir. Kesit, uygulamaya bağlı olarak dairesel veya dikdörtgen seçilebilir. Bir uç kapatılırken, diğer uç uygulamaya bağlı olarak açık veya kapalı tutulabilir. Aralarına bir diyafram yerleştirerek yüksek ve alçak basınç bölgeleri ayrılır. Yüksek basınç bölgesine yüksek basınç bölümü (driver section) ve düşük basınç bölgesi ise düşük basınçlı bölümü (driven section) olarak isimlendirilir. Bu iki bölgedeki gaz özellikleri aynı veya farklı olarak seçilebilir. Düşük basınç bölümünün (L_{dn}) uzunluğu genellikle yüksek basınç bölümünün (L_{dr}) uzunluğundan daha büyüktür. Şok tüpünün en önemli parametrelerinden biri olan, ikisinin arasındaki oran Uzunluk Oranı (L) Denklem 2.41'deki gibi bulunur. Şekil 2.28'de örnek bir şok tüpü tasarımı gösterilmiştir.

$$L = \frac{L_{dn}}{L_{dr}} \tag{2.41}$$

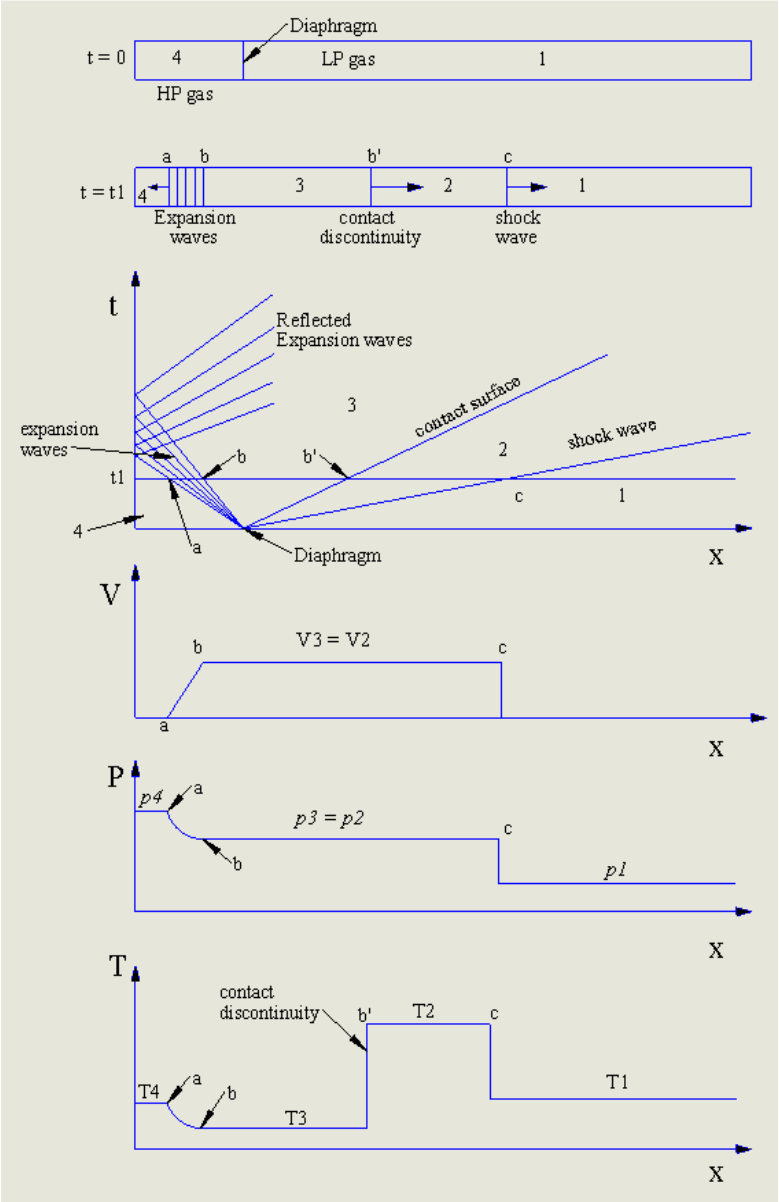
Bu tip bir tüp ile bir şok dalgası üretmek için, başlangıç kısmı basınçlıdır. Bu basınç altında, diyafram, diyaframdan biraz küçük bir mesafede bulunan bir bıçakla delinene kadar deformasyona uğrar. Diyafram patladığında, yüksek basınçlı gaz aniden düşük basınç gazı ile temas eder ve şok dalgası ve genleşme dalgası meydana gelir.



Şekil 2. 29. Teorik olarak şok tüpünün geometrisi

Şok tüpünün çalışması

Şekil 2.30'da gösterilen, bir diyafram vasıtasıyla farklı basınçlardaki iki bölüme ayrılmış bir şok tüpüdür. Bölge 4, yüksek basınçlı gazla doldurulmuş kısımdır. Bölge 1 ise, atmosfere açık tahrikli kısımdır. Bu bölgelerdeki basınçlar, sırasıyla t = 0 olan P_4 ve P_1'dir. t= 0'da diyafram delinir ve yüksek basınçlı gaz, düşük basınçlı gazla temas etmesi sonucunda şok ve genişleme dalgalarının oluşumu başlamış olur. Ardışık sıkıştırma dalgaları hızlıca birleşerek yüksek hızda hareket eden tek bir sabit şekilli şok dalgası oluşturarak gazın arkasında V_2 hızında sağa hareket eder. Şok dalgasının özelliklerine göre, $P_2 > P_1$, $T_2 > T_1$ ve $\rho_2 > \rho_1$ olabilmektedir. Diyaframın diğer tarafında (yüksek basınç bölümü), bir dizi genişleme dalgası, şokun karşısındaki yöne doğru hareket etmeye başlar ve şok tüpünün sonundaki duvardan yansır. Öndeki genişleme dalgasının "a " konumunda seyrettiği, arkadaki genişleme dalgasının "b " konumunda hareket ettiği görülmektedir.



Şekil 2. 30. Şok tüpünün çalışması (Russo, A.L. and Hertzberg, A. 1958)

İkinci genleşme dalgasının arkasındaki gaz $V_3=V_2$ hızında sağa hareket eder. Şok ve genişleme dalgaları zıt yönlerde hareket etse de, etkileşim şekilleri ortak basınç $P_3=P_2$ ve ortak hız $V_3=V_2$ 'ü oluşturur. Bununla birlikte, gazların yoğunluğu ve sıcaklığı, bu bölgelerde farklılık gösterir, bu da V_2 hızında sağa hareket eden bir süreksizlik yüzeyini meydana getirir. Yukarıda tarif edilen fiziksel özellikler Şekil 2.30'da t_1 zamanında belirtilmişitr. Görülebileceği gibi, hız ve basınç 2 ve 3 bölgelerinde sabittir, ancak sıcaklık bu iki bölgeye göre değişiklik gösterir. T_2 sıcaklığı, 2.bölgedeki şok dalgasının geçişinden dolayı T_3 sıcaklığından daha yüksektir.

Şok dalgasının gücü

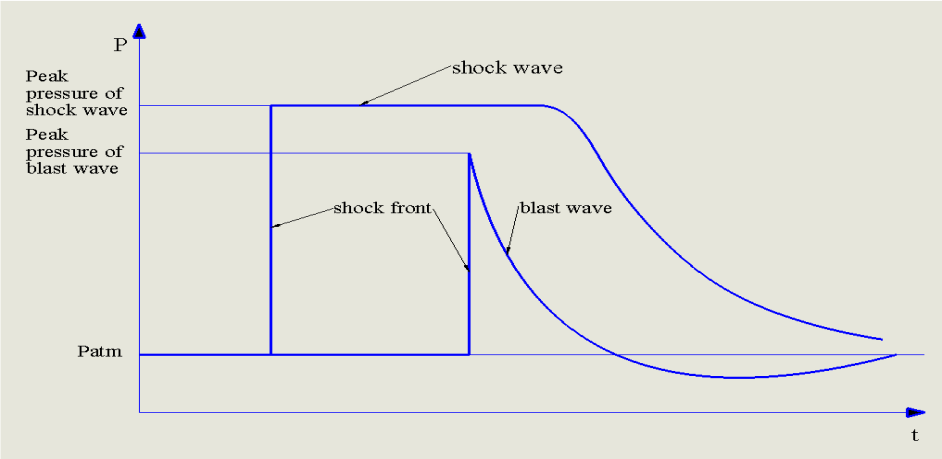
Şok dalgasının gücü, Denklem 2.42 tarafından verilir. Burada γ_1, 1.bölgedeki spesifik ısı oranıdır ve M_s ani şokun Mach sayısıdır.

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma_1}{\gamma_1+1}\left(M_s{}^2 - 1\right) \qquad (2.42)$$

Denklem 2.42'nin gösterdiği gibi, şokun gücü yüksek ve düşük basınç bölümlerin uzunluklarından bağımsızdır. Aynı zamanda şok tüpünün içinde bir anda "saf " bir şokun gücünü gösterir. Denklem 2.42 genişleme dalgasının etkisini dikkate almaz.

Şok tüpünde patlama dalgası

Yeterince uzun bir tüp verildiğinde, Şekil 2.30'da gösterilen yansıyan genişleme dalgaları, en sonunda şok cephesini geçerek bir patlama dalgasına indirgeyebilir. Bu indirgeme esas olarak, tepe basıncındaki düşüş ve şok cephesinin hızı anlamına gelir. Şekil 2.31, bu konuda tanımlanan şok ve patlama dalgaları arasındaki farkı belirtmektedir. Genleşme dalgalarının geri yansıması ve şok cephesini geçmesi zaman almasından dolayı, patlama dalgası daha sonra gösterilmektedir.



Şekil 2. 31. Şok dalgasının ve dalga dalgasının karşılaştırılması (Russo, A.L. and Hertzberg, A. 1958)

2.3.5. Şok tüp performansını değiştirmek için kullanılan teknikler

Şok dalgasının Mach sayısını arttırma isteği ve şok tüpün özel uçlara gereksinim duyması bu cihazların değişme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Örneğin sürüş tekniklerinin uzatılması ve şok dalgalarının arkasındaki gaz akışına çeşitli genişleme bölümlerinin eklenmesi şokun kuvvetini arttırmak için kullanılan tekniklerden bir tanesidir.

İdeal bir şok tüpün davranışının analizlerinde şunlar kabul edilir:

- Gaz ilk özelliklerini korur.
- Akışlar işlemleri adyabatiktir.
- Diyafram ani bir şekilde son halini alır.
- Genleşme fanından gelen dalgalar temas yüzeyi ile temasa etmez.

Aşağıdaki denklemler şok bölümü boyunca referans eksene göre hareketli şok dalgasının kütlenin korunumunu, momentum ve enerjiyi ifade etmektedir, (Sırasıyla Denklem 2.43, 2.44 ve 2.45 'de gösterilmiştir.)

$$P_1V_1 = P_2V_2 \tag{2.43}$$

$$P_1V_1^2+P_1=P_2V_2^2+P_2 \tag{2.44}$$

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} \tag{2.45}$$

P, ρ, v ve h basınç, yoğunluk, hız ve entalpiyi temsil etmektedir. Bu denklemleri şok tüpün koordinat sistemine dönüştürmek için yaptığımız kabuller Denklem 2.46 ve 2.47 'deki gibi,

$$V_1=u_s \tag{2.46}$$

$$V_2=u_s-u_2 \tag{2.47}$$

Burada u_s şok dalgasının hızını, u_2 şok dalganın arkasındaki zerrelerinin hızını temsil eder ve bu iki hızda şok tüp koordinatlarına göre ölçülür. İdeal durumda şok dalgasının arkasındaki gazın termodinamik özellikleri, ölçümü kolay olduğundan şok dalgası hızının bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Bu denklemlerden ve ideal gaz denkleminden şok dalgası boyunca aşağıdaki ilişkiler elde edilir:

$$\frac{P_1}{P_2} = (\gamma_1 + 1)^{-1}\left[2\gamma {M_s}^2 - \gamma_1 + 1\right] \tag{2.48}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{a_2^2}{a_1^2} = 2[(\gamma_1 + 1)M_2]^{-2}(2\gamma_1 M_s - \gamma_1 + 1)[(\gamma_1 - 1){M_s}^2 + 2] \tag{2.49}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left[(\gamma_1 - 1){M_s}^2 + 2\right]^{-1}(\gamma_1 + 1)M_s^2 \tag{2.50}$$

$$\frac{u_2}{a_1} = 2(M_s^2 - 1)[(\gamma_1 + 1)M_s]^{-1} \tag{2.51}$$

Burada M_s şok dalgasının ses hızına göre mach numarasını, a_1, γ_1 sabit basınçtaki öz ısının sabit hacimdeki öz ısıya oranını ve T de gazın sıcaklığını temsil eder.

Temas yüzeyinde süreklilik söz konusudur.

$$u_3 = u_2 \tag{2.51}$$

$$P_3 = P_2 \tag{2.52}$$

Genleşme fanı boyunca akış izoentropik olduğundan sürücü ve tahrik bölümlerinin sabit olduğu bir tüp içindeki diyafram boyunca basınç oranı için Denklem 2.53'teki ifadeyi elde edebiliriz;

$$\frac{P_4}{P_1} = (2\gamma_1 M_s^2 + 1 - \gamma_1)(\gamma_1 + 1)^{-1}[1 - \frac{a_1}{a_4}(\frac{\gamma_4 - 1}{\gamma_1 + 1})(M_s - \frac{1}{M_s})]^{\frac{2\gamma_4}{\gamma_4 - 1}} \tag{2.53}$$

Denklem 2.53'teki ifade yüksek sıkıştırma oranlarında yüksek mach sayılarının elde edilebileceğini gösterir. Yüksek basınç bölümünün malzemesinin mukavemeti ve diyaframın açılma özellikleri, cihazın kullanılacağı basınç aralığını oluşturur. Düşük basıncın limiti ise vakum teknolojisi ve akışın gerçekleştiği yöndeki bolümün mukavemeti ve bağlanmış test bölümünün durumuna bağlıdır. Şekil 2.32, Denklem 2.53'ün tek atomlu tahrik gazı ve iki atomlu tahrik edilen gaz için sonuçlarını göstermektedir. Şekilde kullanılan parametre bu gazların ses hızlarının oranıdır.

Diyafram boyunca sonsuz basınç oranları için sınırlayıcı Mach numarası, aşağıdaki denklemde verilen kare parantezli bölümün sıfıra götürülesi ve genişletilmesi ile elde edilir:

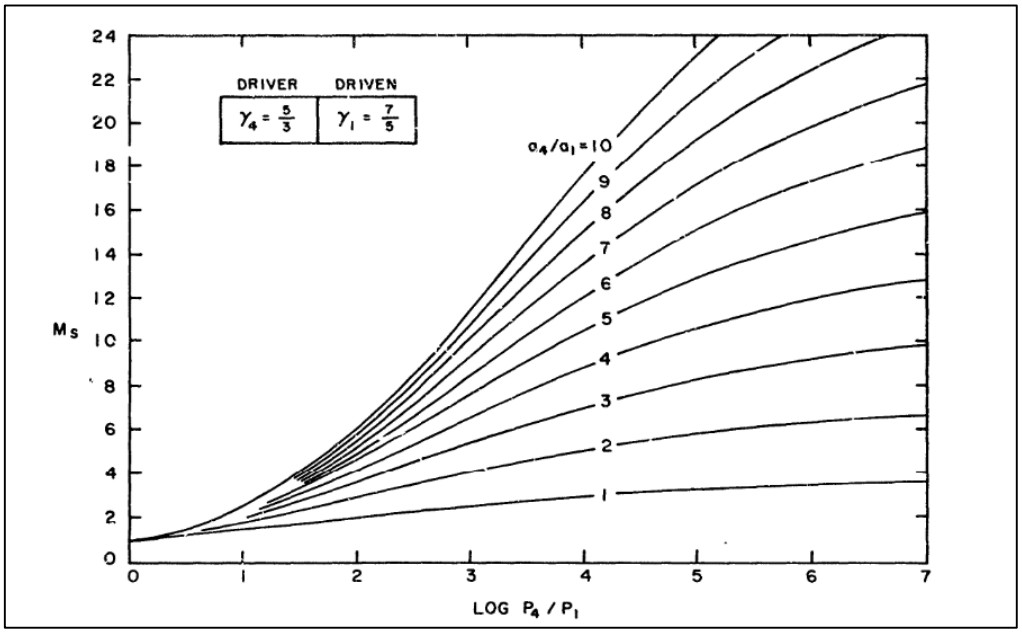
$$M_{s\infty} = \frac{a_4}{a_1}\frac{\gamma_1+1}{\gamma_4-1}\left(-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{1+\left[2\,\frac{a_1}{a_4}\left(\frac{\gamma_4-1}{\gamma_1+1}\right)\right]^2}\right) \tag{2.54}$$

Bu denklem incelendiğinde, a_4'in büyük olduğu zaman a_1'nın sonu $(\gamma_1\text{-}1)$ / (γ_1+1) minimumlaştırıldığında yüksek Mach sayıları elde edildiğini gösterir. Oda sıcaklığındaki, tahrik edilen gaz olarak hava için ve hava, helyum ve hidrojen tahrik gazları olarak, sırasıyla yaklaşık 6, 10 ve 24 maksimum Mach sayıları elde ediyoruz. Yukarda verilen korunum denklemleri yansıyan şok dalgası için yazılırsa, yansımış sok dalgasının arkasındaki durumlarla birlikte ve $v_5 = 0$ ise;

$$\frac{u_{rs}}{a_2} = \frac{2\gamma_1 M_s^2-(\gamma_1-1)}{2+(\gamma_1-1)M_s^2} \tag{2.55}$$

Burada u_{rs} yansıyan şok dalgasının hızı ve a_2 ise olaydaki şok dalgası tarafından ısıtılan gazdaki akustik hızdır. Şokun arkasındaki termodinamik özellikler şok dalgasının Mach sayısında ifade edilebilir:

$$\frac{P_5}{P_1} = [2\gamma_1 M_s^2-(\gamma_1-1)][3(\gamma_1-1)M_s^2-2(\gamma_1-1)][(\gamma_1+1)\{(\gamma_1-1)M_s^2+2\}]^{-1} \tag{2.56}$$



Şekil 2. 32. Çeşitli Basınç Oranlarından Elde Edilen Mach Sayısı(Russo, A.L. and Hertzberg, A. 1958)

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{a_5^2}{a_1^2} = [(\gamma_1 - 1)M_s]^{-2}[2(\gamma_1 - 1)M_s^2 + 3 - \gamma_1][3(\gamma_1 - 1)M_s^2 - 2(\gamma_1 - 1)] \quad (2.57)$$

$$\frac{\rho_5}{\rho_1} = [2(\gamma_1 - 1)M_s^2 - (\gamma_1 - 3)]^{-1}[(\gamma_1 - 1)M_s^2 + 2]^{-1}[(\gamma_1 + 1)M_s^2][2\gamma_1 M_s^2 - (\gamma_1 - 1)] \quad (2.58)$$

Hava için farklı tahrik gazlarında önceden hesaplanmış Mach sayılarına yukardaki denklemde gerekli değişiklikler yapılarak Çizelge 2.4'deki değerlere ulaşılabilir.

Çizelge 2. 4. Havadaki birincil ve yansıyan şok dalgaları için ideal koşullar

Driver gaz	M_s	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{P_5}{P_1}$	$\frac{\rho_2}{\rho_1}$	$\frac{\rho_5}{\rho_1}$	$\frac{T_2}{T_1}$	$\frac{T_5}{T_1}$
Air	6	41.8	291.8	5.27	17.4	7.94	16.8
He	10	116.5	885.4	5.71	19.6	20.4	45.2
H_2	24	671.8	5326.1	5.95	20.7	112.9	256.8

Yansıyan şokun arkasındaki yüksek sıcaklık, bu bölgede akış olmaması koşuluyla birlikte, kimyasal kinetik deneyler gerçekleştirmek için cazip hale getirmesinin yanında, sıcaklıkların daha düşük olduğunu ve gerçek gaz davranışının bir sonucu olarak diğer modifikasyonların meydana geldiğini de göreceğiz. Gaz özelliklerinin ölçümünde kullanışlı olabilmesi için, sıcak gaz kolonun meydana gelen şok dalgası yansıyan genleşme fanından etkilenmemelidir ve yeterli test süresi sağlamak için yeterince uzun olmalıdır. Bu hedeflere ulaşmak için sürücü bölümünün uzunluğunun ve diyaframdan test istasyonuna olan mesafenin optimize edilmesinin gerektiğini göstermektedir. Buna ek olarak, gösterilen türde bir tüp kullanılıyorsa, test istasyonu ile tüpün ucu arasındaki mesafe, yansıyan şok dalgasının meydana gelen şok dalgası tarafından işlenen gazın hemen üzerine geçemeyeceği kadar büyük olması gerekir. Referans 10, bu noktaları bir miktar ayrıntılı olarak ele alırken, Referans 6, belirli bir deney için benzer bir diyagram oluşturmak için gerekli ifadelerin sınırlı olmasını sağlar. Her iki referanstaki eser ideal duruma dayanmaktadır.

Yanma ya da kimyasal ısınma, genellikle sürücü gazının sıcaklığını arttırmak için kullanılır. Helyumun sıcaklığını arttırmak için stokiyometrik hidrojen ve oksijen karışımları bir helyum atmosferi altında yakılır. Aşırı miktarda hidrojen içeren yanma sürücüleri, ısıtılmış hidrojen sürücüleri oluşturulması ve sadece yanma ürünlerinden oluşan sürücüler de kullanılır. Patlamanın güvenlik açısından tehlikeli olduğu ve ayrıca diyaframın parçaları sıklıkla yırtıldığından ve ekipmana zarar verebilecek füzeler haline geldiğinden, yanma karışımının patlamasından korunmak için tedbirler alınır. Yanma ile elde edilen yüksek basınç ve yüksek sıcaklar, sürücü gazının ortalama moleküler ağırlığındaki artış ile birlikte kısmen dengeli konuma gelebilir. Hesaplamalar yapılırken sürücü gazının ses hızı buna göre ayarlanmalıdır.

Sürücü gazını bir ilk darbeye veya kuvvetli basınç dalgasına maruz bırakarak sıcaklığı arttırılabilir. Bu, genellikle tamponlu veya çift diyaframlı şok tüpü olarak adlandırılan alanda yapılır. Bir tüpün tahrikli kısmı, hemen akış yönünde yer alan başka bir bölümün sürücüsüdür. Bu yolla şok hızını yaklaşık yüzde 20 oranında yükseltilebilir. Sürücü gazını ısıtmak için pistonlar da kullanılır ancak bunlar yapısal olarak daha güçlü bir şok tüpü gerektirir (Russo, A.L. and Hertzberg, A. 1958).

2.3.6. Test gazının akış kontrolü

Şok Tünelleri

Şok gazının termal enerjisini, akışın genişleyerek kinetik enerjiye dönüştüren teknikler genellikle çok yüksek Mach sayıları ve rakımlarındaki uçuş koşullarını taklit ederken ve tüpler içinde uçuş araçlarının modelleri kullanırken tercih edilir. Tüpün ucuna eklenen bir ıraksak lüle kısmı, şok tüneli olarak bilinen kısmı içerir. Nozul sıklıkla bir diyafram ile şok tüpünden ayrılır ve mevcut test süresini arttırmak için boşaltılır. Şok tünelindeki test süresinin daha da artması, şok tüpünün ucuna yakınsak-ıraksak bir lülenin takılmasıyla elde edilebilir. Bu, lüle girişindeki şok dalgasını yansıtır ve lüleden geçen akış için bir hazne görevi görür. Şok tüpünün bir başka tasarımı, şok tüneliyle aynı amaçta kullanılan genleşme tüpüdür. Bu cihazda sürekli akış, zamana bağlı akış olarak değişir. Bu cihaz için şok tünellerinden daha yüksek performans özelliklerine sahip oldukları iddiası ortaya çıkmıştır (Seigal, A.E. 1957).

Özel Arayüz Tüpleri

Yansıyan şok dalgaları, sürücü bölümüne doğru yolculuk ederken temas yüzeyiyle karşılaşır. Ortaya çıkan dalga etkileşimi, yansıyan şokla işlenmiş gaza bulaşan bozulmalara neden olur. Sıkışan veya genleşebilen bu dalgalar, kullanılan gazlar, genleşme fanının konumu ve diğer geometrik hususlar tarafından kontrol edilir. Bu tür bir bozulma, temas yüzeyindeki akustik empedansların eşleştirilmesiyle son derece zayıf hale getirilebilir. Bu genel olarak özelleştirilmiş arayüz tekniği olarak adlandırılır (Seigal, A.E.,1957).

Boşaltma Tankı

Bir test istasyonu şok tüpünün ucunun yakınında bulunuyorsa, gelen şok dalgasının arkasındaki gaz özelliklerini incelemek için mevcut olan zaman, yansıyan şok dalgasının varış zamanı ile kısıtlanabilir. Bu durumda, mevcut test süresi, tüpün tahrik edilen bölümünün sonuna büyük hacimli bir depo ekleyerek artırılabilir. Bu boşaltma tankı bir

diyafram ile şok tüpünden ayrılabilir ve boşaltılabilir. Yansıyan şokun arkasındaki basınç, gelen şokun arkasındaki basınçtan daha büyük olduğundan, boşaltma bölmesi deneyden sonra sistemdeki basıncı düşürmekte ve böylece şok tüpüne yerleştirilen pencereleri ve diğer teçhizatı korumaktadır (Seigal, A.E. 1957).

2.3.7. Gerçek şok tüp davranışı

Gaz Etkileri

Sunulan teori, gaz bileşenlerinin akış öyküleri boyunca sabit olduğunu ve parçacık etkileşimlerinin rol oynamadığını varsaymaktadır. Sıcaklık ve yoğunluklar üzerinde çalışan şok tüpü bu varsayımları dışlamaktadır. Şok tüpünün başlıca kullanımlarından biri bu gerçek gaz özelliklerinin incelenmesidir.

Çözünme ve iyonlaşma da dahil olmak üzere kimyasal reaksiyonların varlığı, parçacık etkileşimi ile birlikte, denklem 6 ila 8 ve 16 ila 18 ile tahmin edilen termodinamik özelliklerini kökten değiştirir. Örnek olarak, ideal durumda yoğunluk oranı ρ_2/ρ_1 , diatomik bir gaz için 6,0 değerini geçemez; buna karşılık gerçek bir gazda bu oran oldukça yüksektir.

Şok dalgasının arkasındaki türlerin iç serbestlik derecelerinin, kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için gerekli süre ile birlikte dengeye erişmesi gereken sınırlı zaman şok önünün arkasında bir "gevşeme bölgesi" ile sonuçlanır. Bu dengesiz bölgedeki gazların özellikleri şok tüplerde üzerinde çok çalışılmıştır.

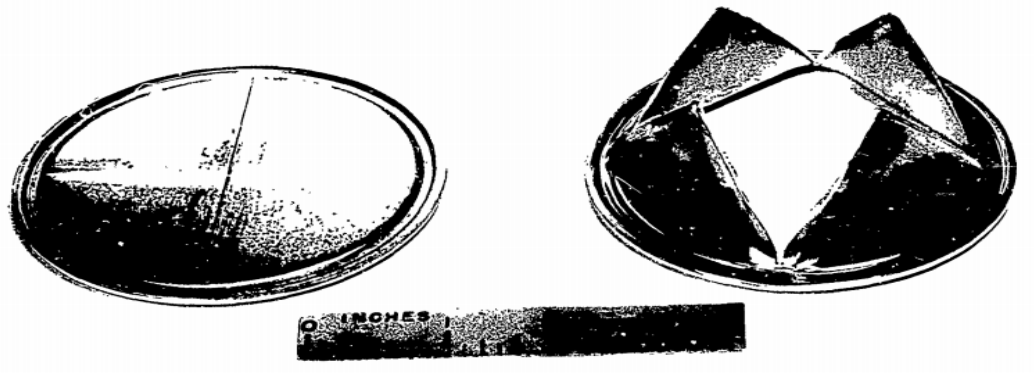
Temel veriler mevcutsa, modern bilgisayar teknikleri, bir şok dalgasının arkasındaki gerçek ve dengesiz termodinamik özelliklerin hesaplanmasını mümkün kılar. Bu bilgiden, hesaplamaya girilen verilerin geçerliliğini kontrol etmek için bir deneyde, belirli bir şok tüpünün performansına göre yararlanılabilir veya gaz özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir.

Şok tüpündeki şok gaz hali, gerçek gaz özellikleri bilinse bile şimdiye kadar sunulan teori ile tam olarak tarif edilmemiştir. Diyafram yırtılması ve sınır tabakası etkileri gibi olaylar, şok tüpü deneyleri meydana geldiğinde dikkate alınması gereken tutarsızlıklara sebep olur. Aşağıda, şok tüpünün gerçek performansının ideal teoriden büyük farklılıklara neden olduğunu belirtilmiştir.

Diyafram Etkileri

Deneylerde şok dalgasının diyaframın patlamasından hemen sonra hızının arttığı gözlemlenmiştir. Bu genelde diyaframın aniden kopmasına neden olduğu için atıfta bulunulur. Çalışmalar çoğu zaman diyaframdaki patlamanın merkezden başladığını ve kenarlara yayıldığını göstermiştir. Dolayısıyla gaz akışı bir jet olarak başlar ve diyafram açıldığında borunun kesit alanı dolana kadar artar ve şok dalgası bu süreçte oluşur. Bazı veriler daha büyük uzunlukların gerekliliğini işaret etmesine rağmen, 5 ila 40 tüp çapına kadar olan mesafeler tam şok dalgası oluşumu için gerekli olarak belirtilmiştir.

Bu şekilde üretilen bir şok dalgasının maksimum hızı bazen denklem 12'de tahmin edilen hızı aşar. White ve Kireyev 'in yaptığı teorik araştırmalar bunu diyaframın açılma karakteristiğine bağlıyor. Diyaframın bir parçası açıldıktan sonra geri tepme yaparsa veya bir parça yırtılır ve tüpün altına itilirse, şok tüp akışı da etkilenir. Bu nedenle, diyafram, şok tüpü işlemlerinde son derece önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 2. 33. Patlamadan önce ve sonra diyafram örneği (Wright 1961).

Diyafram tasarımı üzerinde genel bir yapıda bazı seçimler yapılmıştır, ancak belirli bir durum için seçim hâlâ ampiriktir. Harry Diamond Laboratories 2'de kullanılan bir alüminyum diyafram kesit şok tüpü yukarıdaki şekilde gösterilmektedir. Burada 0.062 inç 5054 alüminyum kullanılmıştır. Ya frezeleme ile ya da pres ile çentiklenebilir. Çentiğin derinliği kritiktir; çok sığ bir yarık parçalanma ihtimalinin yüksek olduğu basınçlara neden olur; çok derin bir oluk ise düşük bir basınçta bir kopma ile sonuçlanır. Gösterilen diyaframın optimum derinliği kalınlığın yaklaşık 1/6'sı kadardır. Patlama basıncı, diyafram malzemesindeki değişiklikler, diyaframın sıkıştırılması veya tutulması yöntemi ve sürücü basıncının uygulanması gibi birtakım faktörlerden önemli ölçüde etkilenir. Bununla birlikte, dikkat edilerek tekrarlanabilir patlama basınçları elde edilebilir (Wright 1961).

Sınır Tabakası Etkileri

Şok dalgası maksimum bir hıza ulaştıktan sonra yavaşlamaya başlar. Tüpün altındaki şok hızında ek değişiklikler var olabilir. Daha düşük bir şoka giren gaz sıkıştırılır ve daha düşük derecede ısıtıldığından, homojen olmayan gaz özellikleri ile sonuçlanır. Bu nedenle, tüp içindeki bir şok dalga hızı öyküsü bilinmelidir. Genellikle neredeyse uniform bir şok hızını içeren deneylerden elde edilen veriler rapor edilmiştir. Zayıflatıcı bir şok dalgasının arkasındaki noktalarda bulunan termodinamik özellikler birçok teknik kullanılarak bulunabilir.

Şok dalgasındaki zayıflamanın en önemli nedeni test gazından sınır tabakasına doğru giderken yaşanan enerji kaybıdır. Düzensiz şok dalgası hızlarına katkıda bulunan diğer faktörler, sürücü bölümünde bulunan düzensiz koşullar, test gazındaki gevşeme etkileri ve radyasyon ile kaybedilen enerjidir.

Şok cephesinin belirgin eğriliği gözlemlendi. Eğrilik, esas olarak şok tüpünün yarıçapının ve başlangıçtaki gaz basıncının bir fonksiyonunu ile bulunur. Şok ön kalınlık ölçümlerinde dikkate alınmalıdır. Şok dalgasının arkasındaki gaz sütunu, ideal teori tarafından öngörüldüğü kadar uzun ya da homojen olmamaktadır. Gerçek gazlardaki daha büyük sıkıştırmalar sütun uzunluğunu azaltır ve gevşeme etkileri şok cephesinin

arkasındaki gazı denge dışı bölgelere ve denge bölgelerine ayırır. Sınır tabakası, duvar boyunca homojen olmayan yapıların eklenmesinin yanı sıra, temas yüzeyi boyunca uzandığı ve test gazını temas bölgesinin içine geçirdiği için sütun uzunluğunu da düşürür. Sınır tabaka tüpü tamamen kapatabilir ve/veya temas yüzeyinde girdaplar üretebilir, böylece temas yüzeyinin daha yaygın bir bölge olmasına neden olur. Sürücü bölümündeki yoğunluk değişimleri ve sonlu diyafram açma süresinin neden olduğu karıştırma, aynı zamanda dağınık temas bölgelerine de katkıda bulunur. Test süresindeki bağlantı kaybı, düşük başlangıç basınçlarında (<1 mm Hg) belirgindir. Bu, şok tüpü işletim rejimi eğrilerindeki süreksizliği, büyük çaplı tüpleri ilgilendiren düşük basınçlara ilişkin verileri açıklar.

Sınır tabakası, yansıyan şok bölgelerinde de önemlilik göstermektedir. Şok dalgası uç duvardan yansıdıktan sonra ani şok dalgasının arkasındaki akıştan kaynaklanan sınır tabakasıyla karşılaşır. Bu karşılaşmadan sonra, yansıyan şokun hızının hesaplanan değerinden farklı olduğu gözlenmiştir. Gerçek yansıyan şok hızı, bir monatomik gaz durumunda hesaplanan değerden % 25 daha az olabilir ve bir poliatomik gaz durumunda daha da büyük olabilir. Poliatomik gazlardaki deneyler, sınır katmanında yansıyan şok dalgasının, genellikle düzgün olmayan hızlarla hareket eden iki veya daha fazla şoka bölündüğünü göstermektedir.

Yansıyan şok dalgasının arkasında ideal olmayan bir duruma katkıda bulunan diğer faktörler arasında, yansıyan şok ve olay şokunun arkasındaki yansımış şok dalgası esnasında ortaya çıkan gazdaki bozulmaların yayılmasıyla olay şokunun arkasındaki gevşeme bölgesi bulunmaktadır. Ayrıca, sıcak gaz ve uç duvar arasında ısı aktarımı gerçekleşir.

Yansıyan şok dalgasının hemen arkasındaki sıcaklık, yoğunluk ve basınç hesaplanan değerlerden farklı gözlemlenmiştir. Yansıyan şokun arkasındaki gaz sütununun uzunluğu arttıkça, birçok durumda gazın termodinamik değişkenlerinin değerlerinde küçük ancak devamlı bir değişiklik meydana gelir (Wright 1961).

Radyasyon Etkileri

Bir şok dalgasının arkasındaki gaz tarafından yayılan radyasyon, dalganın önündeki soğuk test gazı tarafından emilebilir, böylece bu test gazının enerji seviyesinde yükselme meydana gelir. Elektromanyetik şok tüplerinde ölçülen ve hesaplanan gaz özellikleri arasındaki farklılıkların yanı sıra, geleneksel bir şok tüpünde ölçülen düşük xenon aktivasyon enerjilerinin bir açıklaması olarak, test gazının başlangıç koşullarındaki sonuçlarında meydana gelen değişiklik belirtilmiştir. Şok dalgasından önce tespit edilen serbest (başlatıcı) elektronlar, soğuk test gazının fotoiyonizasyonu, şok önü boyunca elektronların difüzyonu ve öncü termal radyasyon ile şok tüp duvarından elektron ayrışması ile ilgilidir (Wright 1961).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Alan modelleri genellikle yüksek kapasiteli bilgisayarlar ve ileri düzey uzmanlara ihtiyaç duymaktadır. Alan modelleri, bölge modellerinin kısıtlamalarının üstesinden gelmektedir. Bölge modellerinde olduğu gibi, alan modelleri de temel korunum denklemlerini çözmektedir. Alan modellerinde, alan birçok hücreye bölünmektedir ve bu hücreler arasındaki ısı ve kütle hareketlerinin çözümü için korunum denklemleri kullanılmaktadır. Sonuç olarak, HAD modeli daha bilimsel kesin bir yaklaşım sunmaktadır. Alan modelleme kullanılırken, öncelikle alandaki domain bölge tanımlanmalıdır. Bu bölge, gerçekleştirilen simülasyon için çok önemlidir ve özellikleri simüle edilen objenin boyutuna göre belirlenmektedir. Ayrıca duvar, herhangi bir engel veya basitçe akışkan alanı meydana getirecek çok fazla sayıdaki kontrol hacimlerine bölünmektedir.

HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) akışkan davraşının etkin olduğu problemlerin sayısal metotlarla bilgisarda çözülerek analiz edilmesini sağlayan akışkanlar mekaniği bilimi dalıdır. Mühendisliğin birçok alanında kullanılan HAD, çözüm yolları farklı olan ve sonuca ulaşılması uzun süren problemlere çözümler sunmaktadır. HAD'ın numerik analiz ve modelleme hesaplama gücü hızlı bir şekilde artmıştır. HAD Navier-Stokes denklemlerine numerik çözümler sunmaktadır. Bunun yanı sıra, akışın moleküler seviyede ele alınmasına olanak tanımaktadır. HAD tekniği endüstriyel ve endüstriyel olmayan birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu uygulama örnekleri aşağıda yer almaktadır:

- Uçakların ve araçların aerodinamiğinde; kaldırma ve sürükleme,
- Enerji santralleri; gaz türbinlerindeki yanma,
- Turbo mekaniği; geçitler, yayıcılar vs. içindeki dönen akışkanlar,
- Elektrik-elektronik mühendisliği; mikro devreler içeren teçhizatın soğutulması,
- Kimyasal işlemler mühendisliği; karıştırma ve parçalama işlemleri, polimer kalıp kaplama

- Binaların iç ve dış çevresi; rüzgar yüklemesi, ısıtma, havalandırma,
- Deniz mühendisliği; kıyıdan uzak yapılar üzerindeki yükler,
- Çevre mühendisliği; dışarıdan akan ve hava ve suyu kirleten kirleticilerin dağılımı,
- Hidroloji ve okyanus coğrafyası; akarsular, haliçler ve okyanuslardaki akışkanlar,
- Biyomedikal mühendislik; atardamar ve toplardamarlardaki kan akışları.

Son zamanlarda kullanımı oldukça artan HAD ile birçok çeşitli akışkan, faz değişimi, çok fazlı, kararlı ya da kararsız akış, şok dalgaları, yüzey kuvvetleri ve kimyasal reaksiyonlar ile ilgili pek çok karmaşık problem çözülebilmektedir. Akış hareketi; kütle, enerji ve momentum korunumunu ifade eden diferansiyel denklem sistemiyle tanımlanmaktadır.

Problemin çözümü için yapılan kabullere bağlı olarak birçok farklı türbülans modeli bulunmaktadır. Böylelikle, sıvı akışı tahmini, ısı ve kütle transferi, kimyasal reaksiyonlar ve benzeri konuların dizayn ve simülasyon çalışmalarında HAD kodundan rahatlıkla yararlanılabilmektedir. Örnekleri aşağıda yer almaktadır:

• Türbülanslı akışlar, ısı transferi, reaksiyon akışları, kimyasal karışımlar, yanma ve çok safhalı akışlar,
• Otomotiv sektöründe tam araç aerodinamiği, ısı kontrolü, güç treni tasarımı,
• Güç endüstrisi sektöründe yanma sistemleri modelleme, ocak tasarımı, hava ve parçacık değerlendirme ve sınıflama

HAD' ın avantajları:

• Yeni tasarımlarda zamandan ve fiyattan tasarruf sağlamaktadır.
• Deneysel olarak çalışmanın zor veya imkansız olduğu büyük sistemlerde çalışma imkanı vermektedir.
• Çalışma şartlarının tehlikeli olduğu durumlarda kullanılabilecek çok güvenli bir sistemdir.

HAD çözümleri, ön işlem, işlem/çözümleyici ve son işlem olmak üzere 3 temel aşamadan meydana gelmektedir. İlk basamak olan ön işlem aşamasında akış alanı ve geometrisi modellenerek ağ yapısı oluşturulmaktadır. İşlem aşamasında çeşitli nümerik metotların kullanılması ile kısmi diferansiyel denklemlerden oluşan genel akış denklemleri bilgisayar ortamında çözülmektedir. Son adımda ise gerekli analizler yapılmakta ve eğer mümkünse analiz ile deney sonuçları karşılaştırılmaktadır (Demir 2013)

3.2. ANSYS Fluent

Bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemin prensibi, diferansiyel denklemlerin iterasyonla çözülmesi esasına dayanmaktadır. Bu nedenle, sonlu hacimler yöntemini baz alarak çözüm yapan ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. ANSYS Fluent, termo-akışkan problemlerin çözümünde kullanılan bir analiz programıdır. 1983'ten bu yana dünya çapında bir çok endüstri dalında kullanılan ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki HAD piyasasında en çok kullanılan yazılım durumuna gelen Fluent, en ileri teknolojiye sahip ticari HAD yazılımı olarak kullanıcılarının en zor problemlerine kolay ve kısa sürede elde edilen çözümler sunmaktadır.

Fluent yazılımı, otomotiv, havacılık, kimya ve gıda endüstrisi gibi farklı dallarda faaliyet gösteren birçok sanayi koluna ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Fluent, sahip olduğu teknik özellikler sayesinde, kullanıcılarına farklı problemleri aynı arayüz aracılığıyla çözme olanağı tanımaktadır. Fluent, ürün performansını ürün henüz tasarım aşamasındayken ölçme, performansı düşüren etkenleri detaylı bir şekilde tespit ederek yine bilgisayar ortamında giderme ve piyasaya iyileştirme işlemleri tamamlanmış son ürünün verilmesi sağlayarak kullanıcısının zorlu rekabet şartlarında emsallerinden bir adım önde olmasına katkıda bulunur. Fluent, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve bünyesinde barındırdığı değişik fiziksel modeller sayesinde laminer, geçişsel ve türbülanslı akışlara, iletim, taşınım ve radyasyon ile ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal tepkimeleri içeren problemlere, yakıt pilleri, akustik, akış kaynaklı gürültü, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı ve güvenilir çözümler üreterek, AR-GE bölümlerinin tasarım esnasındaki en güvenilir aracı olmaya adaydır (Bulut 2011).

Fluent'in teknik özellikleri

Fluent, sıkıştırılamaz (düşük sabsonik), orta sıkıştırılabilir (transonik) ve yüksek sıkıştırılabilir (süpersonik ve hipersonik) akışlar için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözücüsüdür. Yakınsamayı hızlandıran çoklu ağ metoduyla beraber çoklu çözücü seçenekleri ile Fluent geniş hız rejimleri aralıklarında optimum çözüm etkinliği ve hassasiyeti getirmektedir. Fluent'deki fiziksel modellerin zenginliği, laminer, geçiş ve türbülanslı akışların, ısı transferinin, kimyasal tepkimelerin, çokfazlı akışların ve diğer olguların sayısal ağ esnekliği ve çözüm tabanlı ağ uyarlaması ile hassas çözülmesine olanak sağlamaktadır. Fluent programının sahip olduğu genel modelleme ve sayısal ağ faydaları aşağıda gösterilmiştir (Bulut 2011).

Genel Modelleme Yetenekleri

- 2 boyutlu düzlemsel, 2 boyutlu eksenel simetrik, 2 boyutlu döngülü eksenel simetrik (dönel simetrik) ve 3 boyutlu akışlar,
- Sabit rejim veya geçici rejim akışları,
- Bütün hız rejimleri (düşük subsonik, transonik, süpersonik ve hipersonik akışlar),
- Laminer, geçiş veya türbülanslı akışlar,
- Newtonyan ve newtonyan olmayan akışlar,
- Zorlamalı, doğal, karışık konveksiyon, konjuge ısı transferi ve radyasyon,
- Homojen ve heterojen yanma modellerini ve yüzey tepkime modellerini de içeren kimyasal türler karışımı ve tepkimesi modelleri.,
- Gaz-sıvı, gaz-katı ve sıvı-katı akışlar için serbest yüzey ve çok fazlı akış modelleri,
- Sürekli yüzeyle akuple yayık fazlar (partikül/damla/baloncuk) için Lagrangian yörünge hesaplama,
- Erime/katılaşma uygulamaları için faz değişikliği modeli,
- İzotopik olmayan geçirgenlik, ilk direnç, katı ısı iletimi ve gözenekli yüzey basınç zıplaması modelleriyle gözenekli ortam,
- Fanlar, pompalar, radyatörler ve ısı değiştirgeçleri için yığık modeller,
- Durağan ve dönel referans çerçeveleri,

- Çoklu hareketli çerçeveler için çoklu referans çerçevesi ve kayan ağ seçenekleri,
- Kütle, momentum, ısı ve kimyasal türler için hacimsel kaynaklar,
- Malzeme özellikleri veri tabanı,
- Sürekli fiber modeli,
- Magnetohidrodinamik modeli,
- Akış kaynaklı gürültü öngörme modeli,
- GT-Power ile dinamik (iki-yönlü) birleşimlik,
- Kullanıcı tanımlı fonksiyonlarla ilerli seviyede özelleştirme yeteneği,
- Silindir içi akış modelleme yeteneği,
- Hareketli ve deforme olan ağ hareketleri

Sayısal Ağ Yetenekleri

• Dörtgen, üçgen, altıyüzlü, dörtyüzlü, prizma (kama), piramid ve karışık elemanlı sayısal ağ,

• Akışkan/katı arayüzlerini de içeren konuşmayan (asılı düğüm noktalı) sayısal ağ arayüzleri,

• Sayısal ağ sıklaştırma ve seyreltme,

• Üçgen ve dörtyüzlü elemanlar için konuşur sayısal ağ uyarlaması,

• Bütün elemanlar için asılı (konuşmayan) düğüm noktalı sayısal ağ uyarlamalarını içeren dinamik, çözüm tabanlı uyarlama (yoğunlaştırma ve seyrekleştirme),

• Kullanıcı tarafından belirlenen bölgeler için sayısal ağ yoğunlaştırması ve çözüm değişkenleri, elde edilen büyüklükler ve kullanıcı tanımlı alan fonksiyonu değişkenleri kullanılarak adaptif yoğunlaştırma,

• Sayısal ağ yoğunlaştırması sonrası otomatik çözüm enterpolasyonu,

• Sayısal ağ seyrekleştirmesi,

• Sayısal ağ yumuşatma ve geliştirme araçları,

• Sayısal ağ işlemesi (oranlama, taşıma, birleştirme, konuşturma ve ayırma),

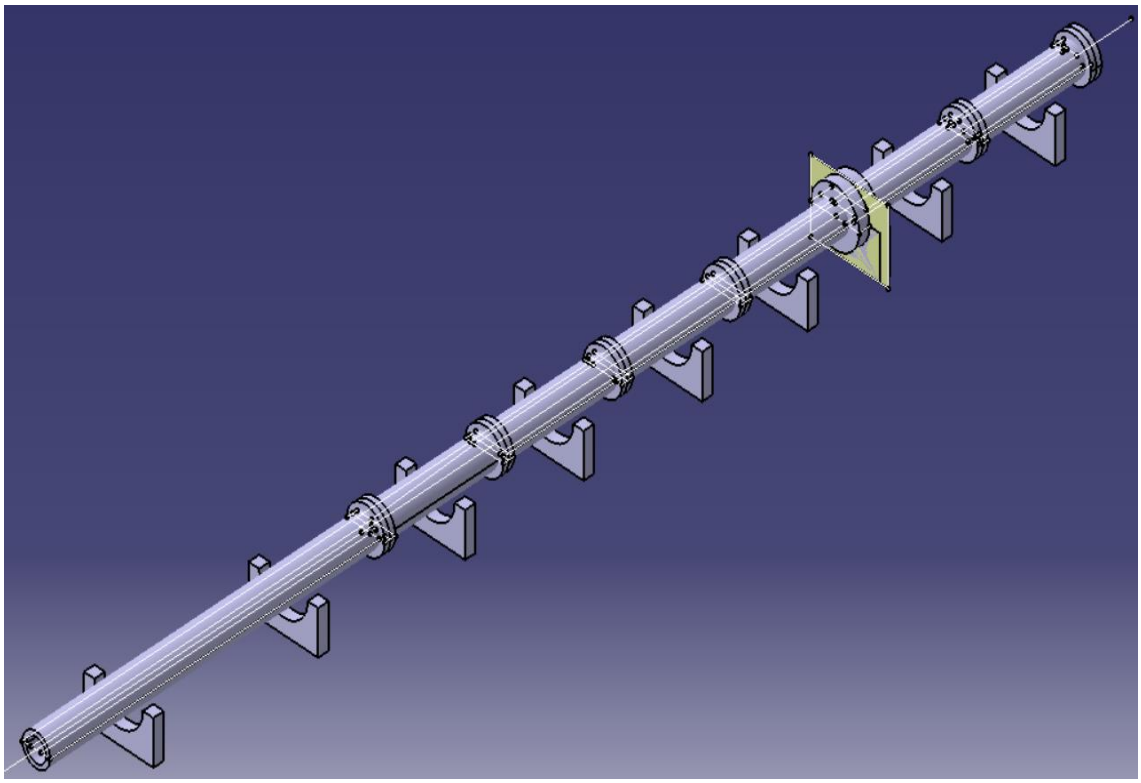
• Hibrid sayısal ağ oluşturma özellikleri,

• Ağdan ağa çözüm enterpolasyon yeteneği,

• Çözüm ilerlerken sayısal ağı sıklaştıran ve seyrelten dinamik ağ uyarlaması (Bulut 2011).

3.3. Modelleme (CAD) ve CFD analizleri

Şok tüpünün modellemesini yaparken literatürde bulunan bir şok tüp tasarımını ve şok tüp verilerini göz önüne alarak kendi tasarımımız oluşturuldu ve CFD analizlerini gerçekleştirdi. Şekil 3.1 literatürde bulunan bir şok tüpü göstermektedir.

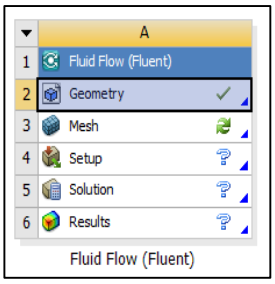


Şekil 3. 1. CFD analizlerini doğrulamak için kullanılan deneysel verilerin ait olduğu şok tüpünün CAD görüntüsü

Yukarıdaki CAD görüntüsünü dikkate alarak bizde ilk önce tasarımımızı 2 boyutlu olarak tasarladık ve literatürdeki şok tüplerinin girişindeki ve çıkışındakini basınç, hız gibi değerleri elde edene kadar tasarımımız geliştirildi.

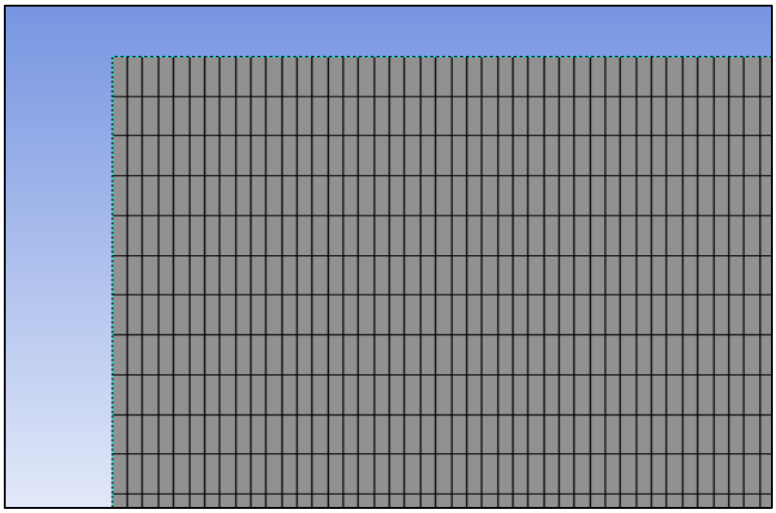
ANSYS analizinin yapılışı ve sonuçlar

- Solidworks programında çizilen 2 boyutlu çizimler Ansys/fluent/geometry bölümünde açıldı (Şekil 3.2).

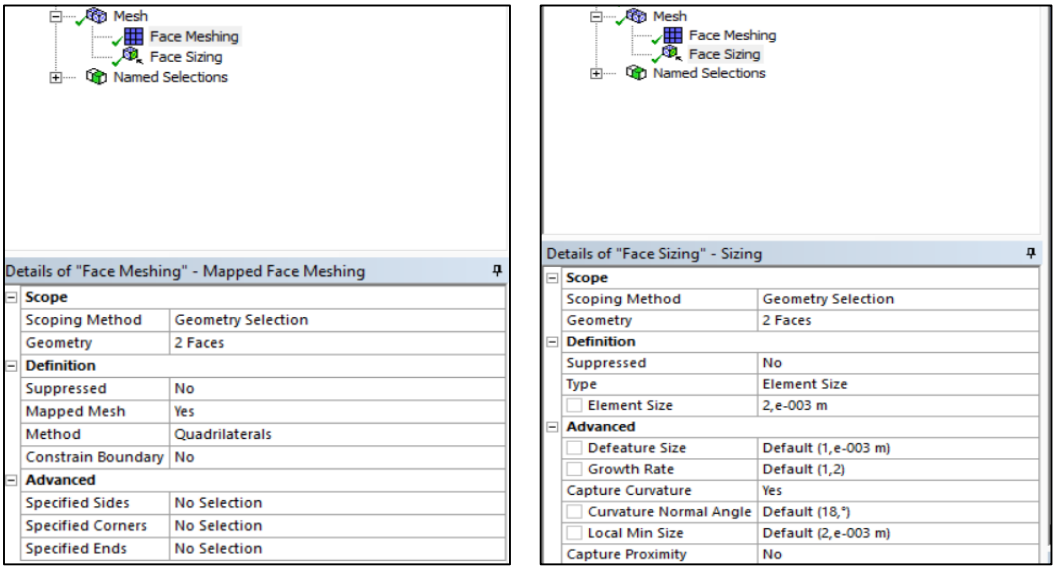


Şekil 3. 2. Ansys çalışma ekranı

- Geometri üzerinde son kontroller yapıldıktan sonra mesh kısmında mesh atımı ve parçadaki bölgelerin isimlendirilmesi yapıldı. 94470 elemanlı, quadratic yapılı mesh atıldı (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4).

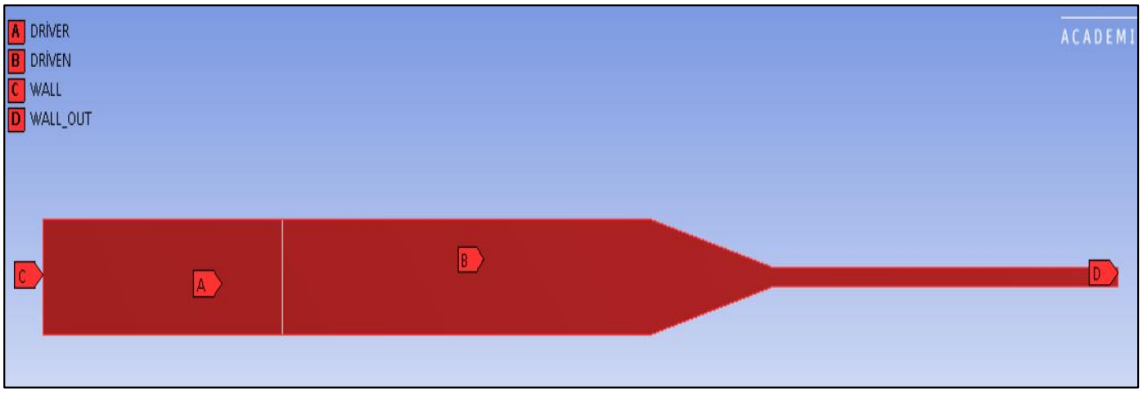


Şekil 3. 3. 2D model mesh yapısı



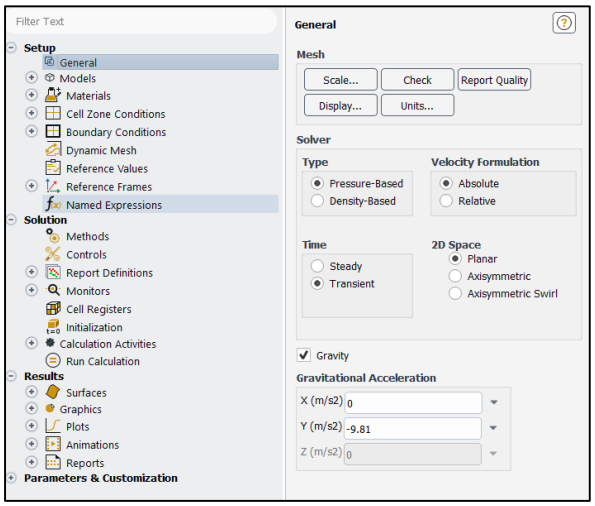
Şekil 3. 4. Mesh özellikleri

- Ön basınç bölgesi (driver) gazı dolduracağımız kısımdır. Akış bölgesi (driven akışın olacağı kısımdır. Wall kenarlar boru cidarlarıdır. Wall out da çıkış kısmımızdır. Ön basınç bölgesi ile akış bölgelerini de diyafram (beyaz çizgi) ayırır (Şekil 3.5).



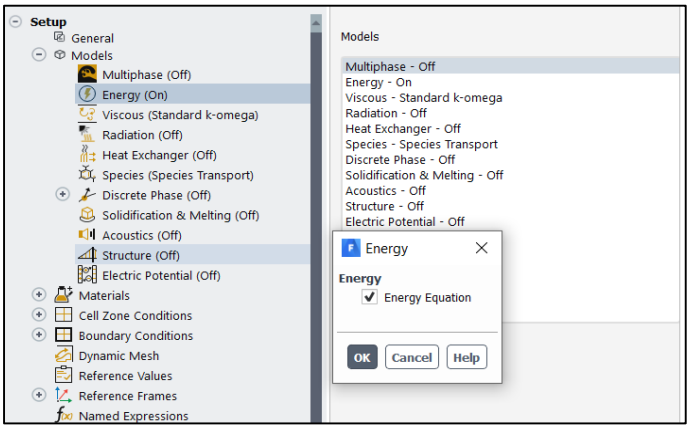
Şekil 3. 5. 2D modelin bölgelendirilmesi

➢ Mesh atma işlemi yapıldıktan sonra setup kısmında analiz şartları girildi. İlk önce setup/general kısmında type ve time kısımlarında analiz şartlarına uygun kısımlar seçildi (Şekil 3.6).



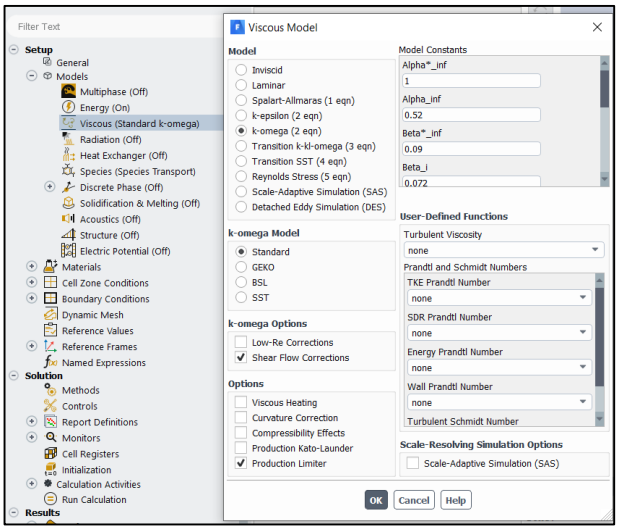
Şekil 3. 6. Analiz tipinin seçilmesi

➢ Setup/models kısmından energy açıldı (Şekil 3.7).



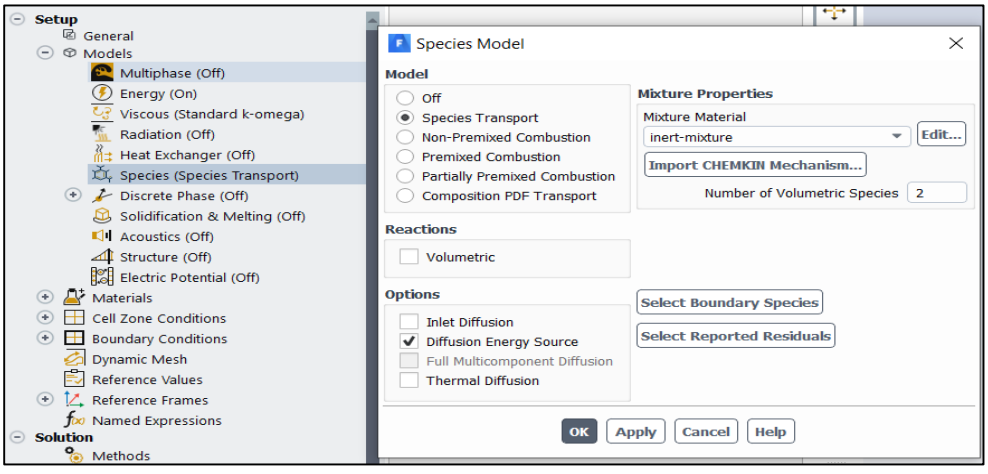
Şekil 3. 7. Analiz enerji modülünün aktif edilmesi

➢ Setup/models kısmından viscous k-omega seçildi (Şekil 3.8).

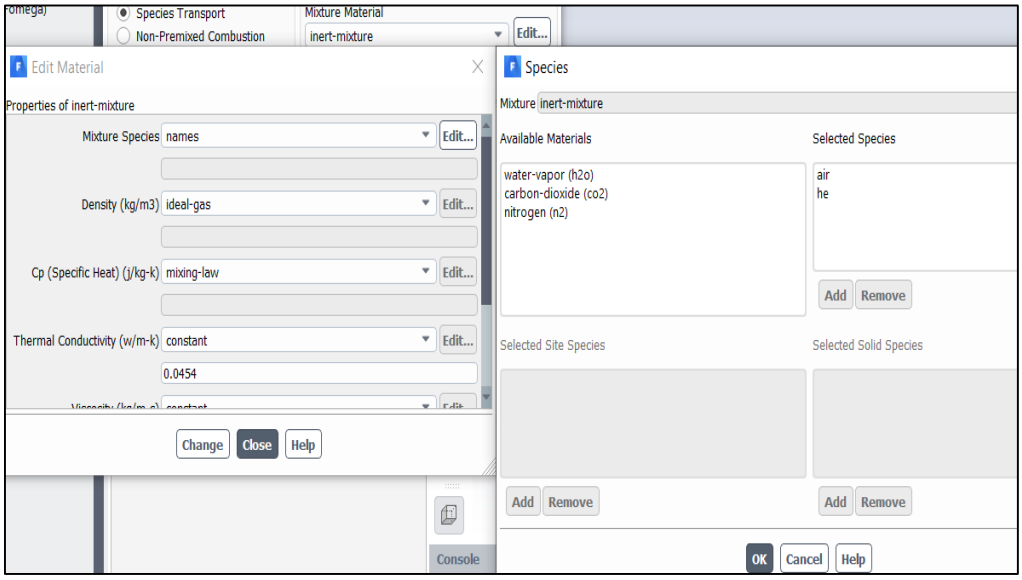


Şekil 3. 8. Analizin akış tipinin seçilmesi

➢ Setup/models kısmından species model kısmında species transport seçeneği işaretlendi, mixture material kısmı inert mixture seçeneği seçildi ve edit kısmına girilerek analizin yapıldığı gazlar (argon ve helyum) seçildi (Şekil 3.9 ve Şekil 3.10).

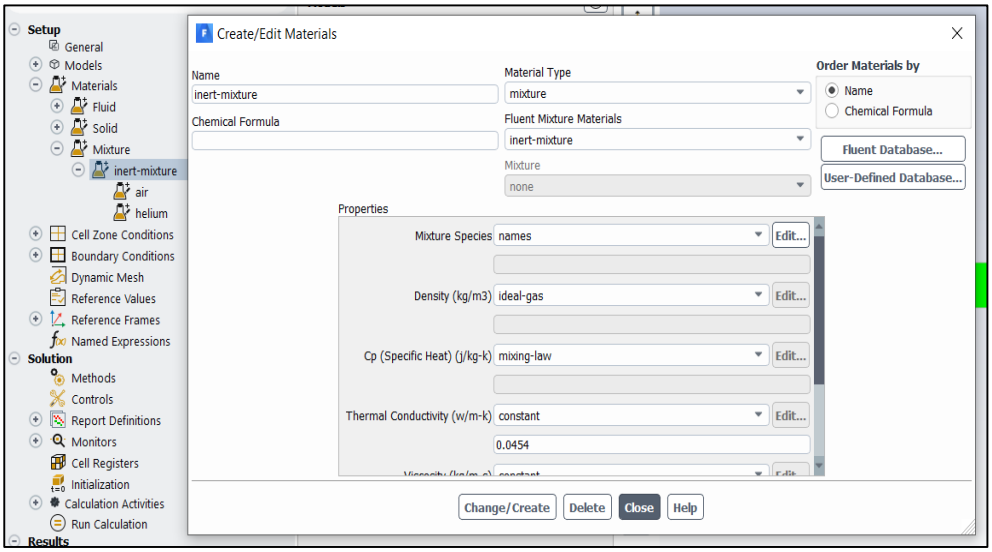


Şekil 3. 9. Analizin gaz karışımı tipinin seçilmesi

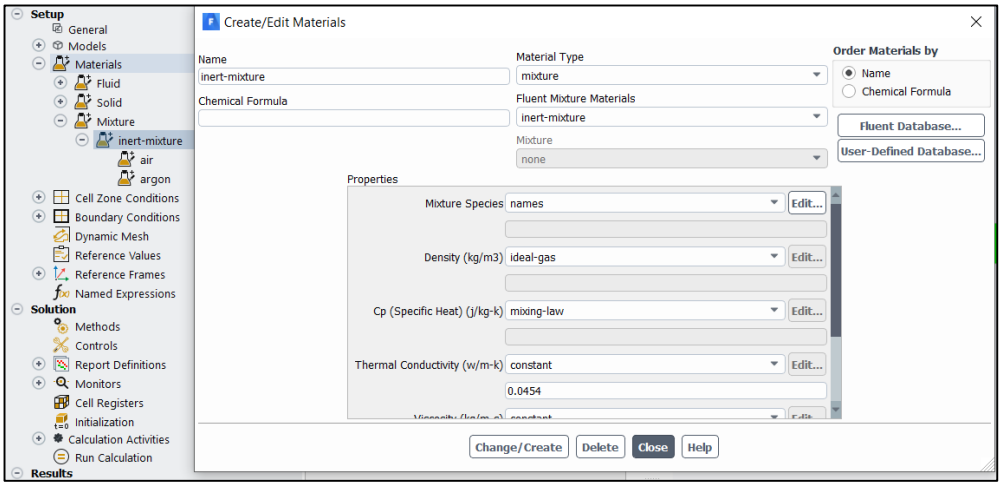


Şekil 3. 10. Analizde kullanılacak materyallerin seçilmesi

- Setup/materials kısmından seçtiğimiz gazların yoğunluklarını ideal gaz yapıldı (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12).

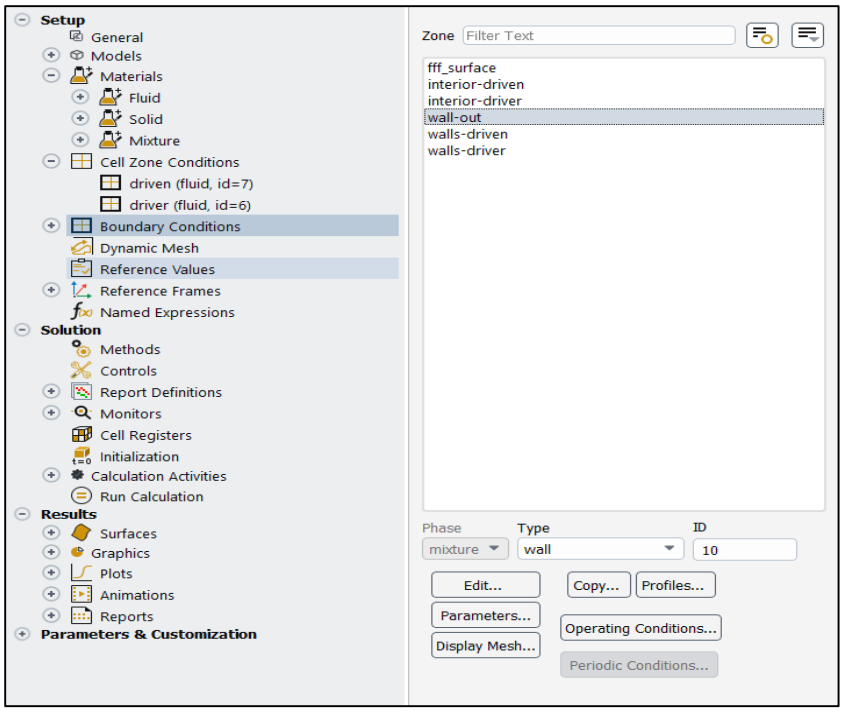


Şekil 3. 11. Analizde kullanılan materyallerin değerlerinin seçilmesi 1



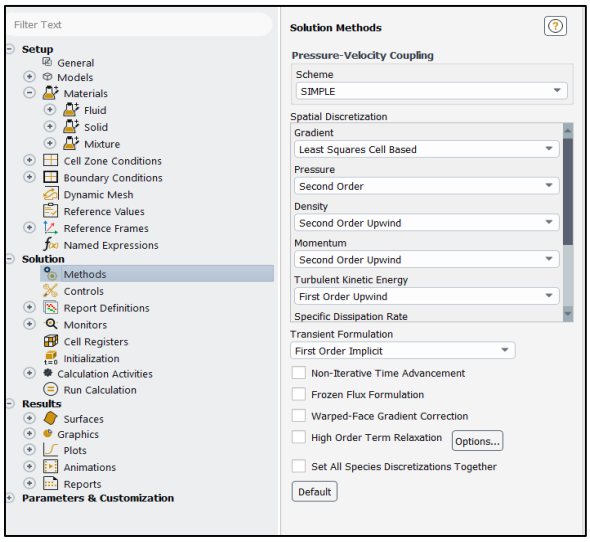
Şekil 3. 12. Analizde kullanılan materyallerin değerlerinin seçilmesi 2

- Setup/cell zone conditions kısmından ön basınç ve akış bölgeleri kontrol edildi ve setup/boundary conditions kısmından analizde kapalı kısımlar Wall(duvar) olarak seçildi (Şekil 3.13).



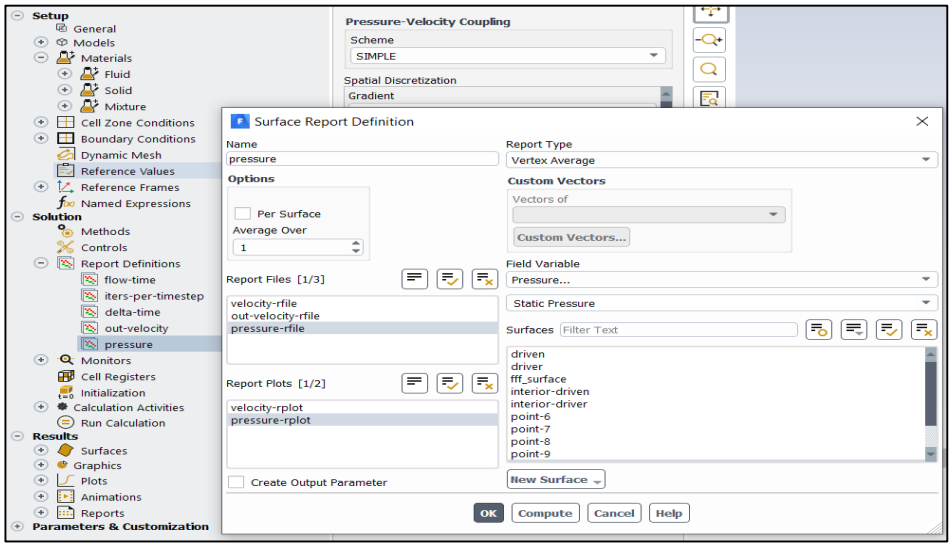
Şekil 3. 13. Analiz sınır şartlarının belirlenmesi

➢ Setup/solutions kısmından çözüm methodu simple olarak seçildi (Şekil 3.14).



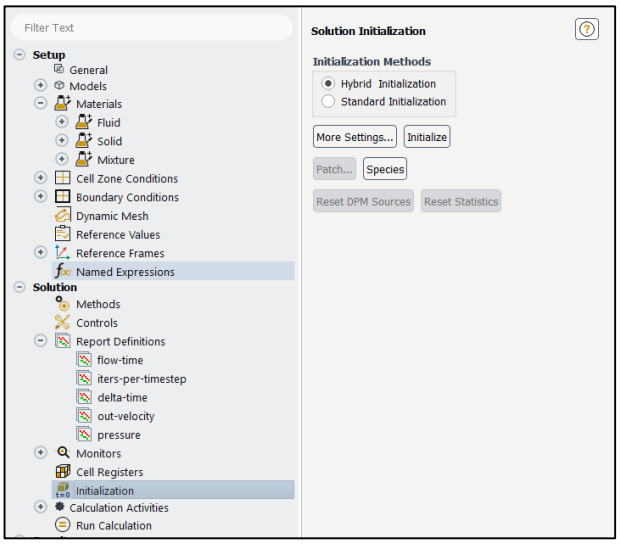
Şekil 3. 14. Analizin method tipinin seçilmesi

➢ Setup/solutions kısmında report definitions kısmından çıkış bölgesinde (Wall-out) elde edeceğimiz basınç ve hız değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren grafiklerin çizilmesi için rapor açıldı. Basınç değeri için çıkıştaki Wall-out kısmı dikkate alınırken, hız değeri için çıkış bölgesinin önüne bir nokta atılarak buradaki hız değerinin zamana bağlı değişimi dikkate alındı (Şekil 3.15).



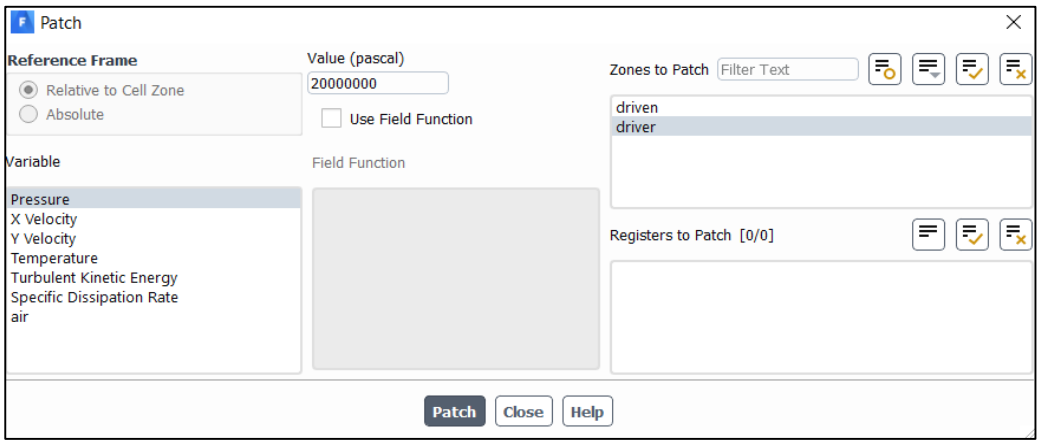
Şekil 3. 15. Analiz sonucu olarak istenilen grafiklerin seçilmesi

➢ Setup/solutions kısmından initializition kısmından hybrid initialization seçilerek initialization tıklanır ve daha sonrasında patch tıklanarak başlangıç şartları girildi (Şekil 3.16).

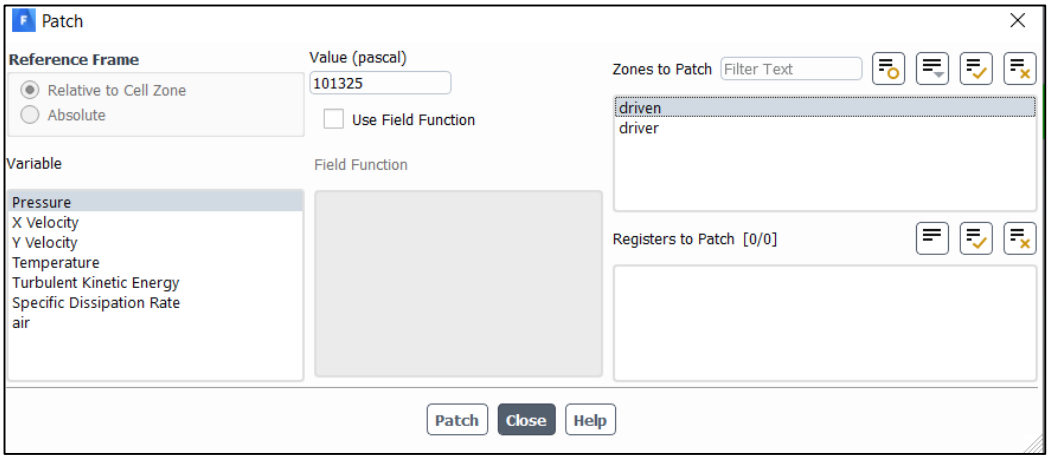


Şekil 3. 16. Analizin çözüm tipinin seçilmesi

➢ Açılan patch penceresinde ön basınç bölgesi (driver) ve akış bölgesi (driven) bölgelerinin basınç değerleri girildi (Şekil 3.17 ve Şekil 3.18).

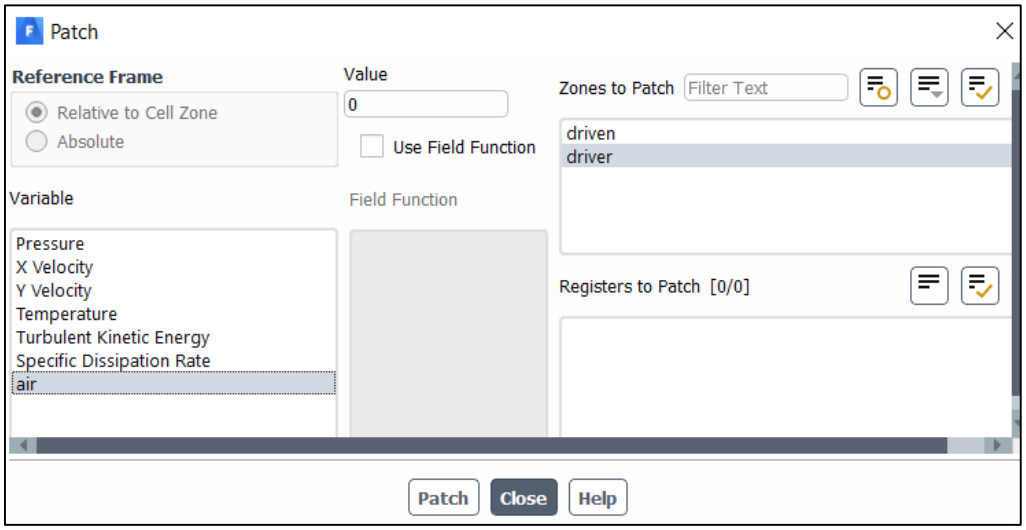


Şekil 3. 17. Analizin başlangıç şartlarının girilmesi 1



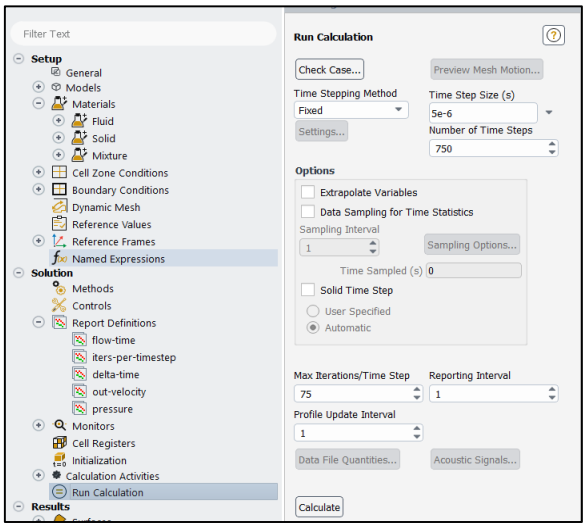
Şekil 3. 18. Analizin başlangıç şartlarının girilmesi 2

- Açılan patch penceresinde havanın sadece akış bölgesinde olması için ön basınç bölgesindeki hava değeri 0 yapıldı (Şekil 3.19).



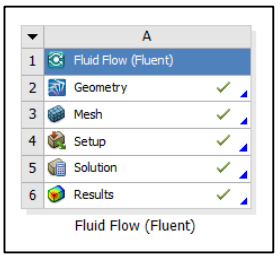
Şekil 3. 19. Analizin başlangıç şartlarının girilmesi 3

- Setup/solutions kısmından Run calculate seçeneği seçilir ve analizin başlaması için gerekli şartlar (time step size ve number of time steps) seçilerek analiz başlatıldı (Şekil 3.20).



Şekil 3. 20. Analizin başlangıç şartlarının girilmesi 4

- Analiz bittikten sonra Result kısmına tıklanarak akış animasyonlarına ve grafiklere bakılarak sonuçlar değerlendirildi (Şekil 3.21).



Şekil 3. 21. Analiz sonuçlarının görüntülenmesi

Analiz Sonucu

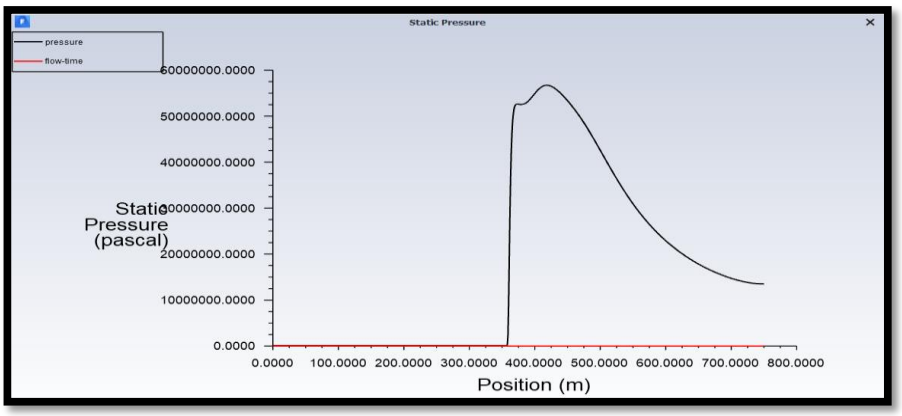
Ön basınç bölgesine (kırmızı bölge) 20 MPa basıncında helyum gazı tanımlandı. Akış bölgesine (mavi bölge) 101325 Pa (atmosfer basıncı) hava basıncı tanımlandı. Gazlar species komutu ile inert-mixture karışım olarak tanımlandı (Şekil 3.22).



Şekil 3. 22. Analiz başlangıcında bölgelerdeki basınç durumu

Basınç Değeri;

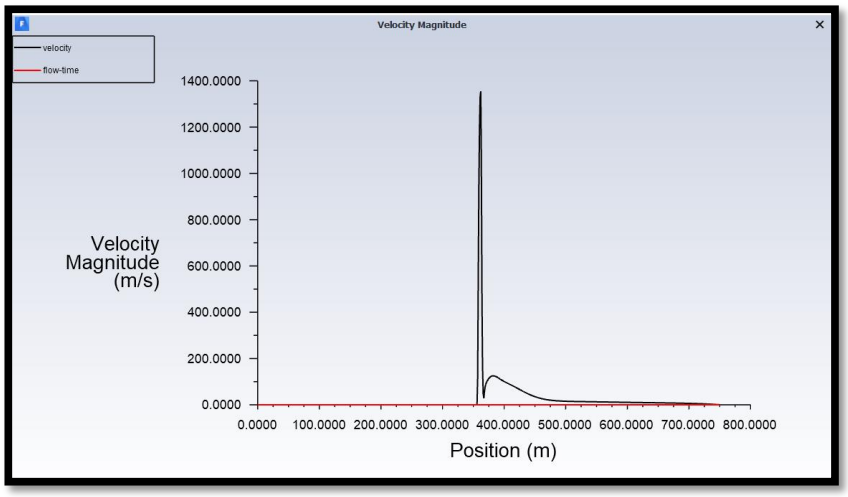
Şok tüpün çıkışından elde edilen basınç-zaman diyagramı;



Şekil 3. 23. Analiz sonucunda elde edilen basınç grafiği

- Bu diyagrama göre çıkış ağzına gelen maksimum basınç miktarı 57.823 Mpa değerindedir. 20 Mpa giriş basıncında çıkış olarak 57.823 Mpa çıkış alınmıştır (Şekil 3.23).

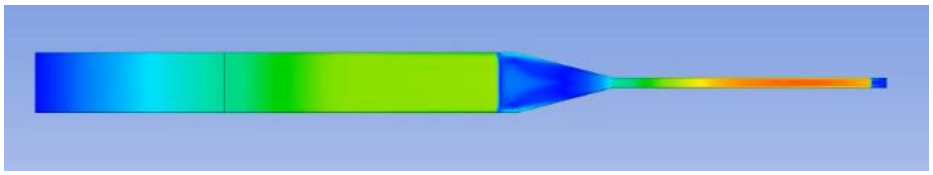
Hız Değeri;

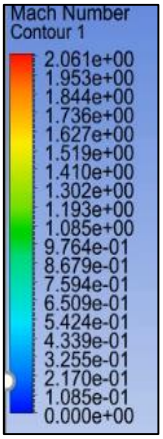


Şekil 3. 24. Analiz sonucunda elde edilen hız grafiği

- Çıkışta hız değeri olarak 1379.5 m/s max. hız değeri elde edildi (Şekil 3.24).

Mach Number Değeri;





Şekil 3. 25. Analiz sonucunda elde edilen mach sayısı görseli ve değeri

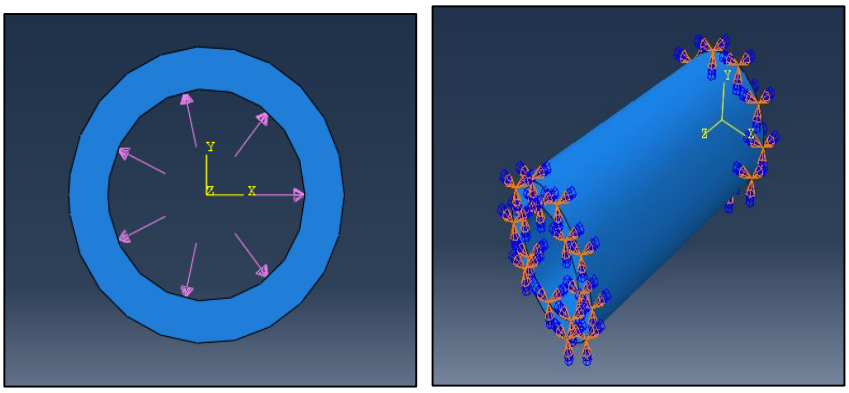
- Mach sayısı değeri olarak maksimum 2.061 değeri elde edildi. Bu değer akışımızın süpersonik hız değerinde (M>1) olduğunu gösterir (Şekil 3.25).

3.4. Yapısal Analizler

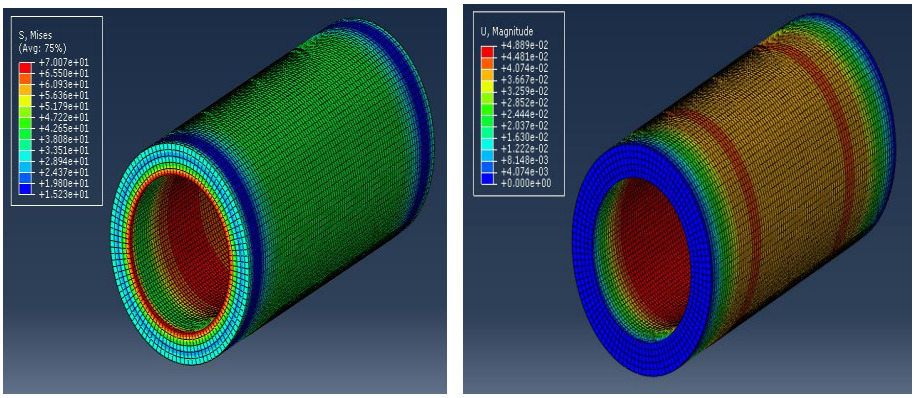
Abaqus programında yapısal analiz yapılmadan önce ilk önce tasarlanan 2 boyutlu şoktüpünün ölçülerine uygun kalın etli boruların piyasa araştırılması yapıldı ve sonra analizler yapıldı.

2 boyutlu tasarım 4 parçaya ayrıldı ve her parçanın iç yüzeyine 20 MPa basınç verildi ve dış yüzeyleri sabitlenerek gerilme analizleri yapıldı ve sonuçlar değerlendirildi.

Parça 1'in analiz başlangıç şartları ve sonuçları (Şekil 3.26 ve Şekil 3.27);



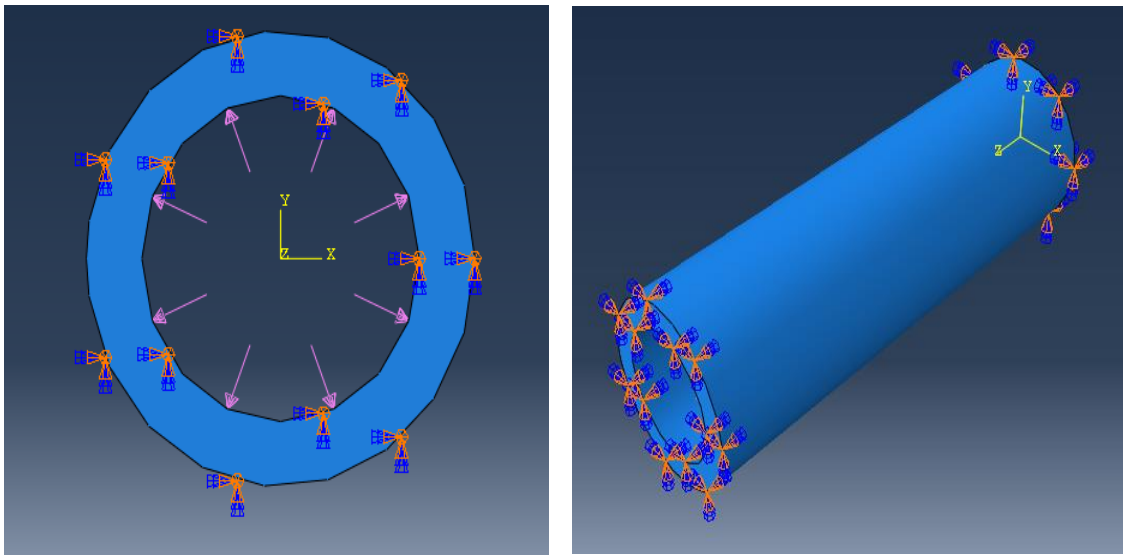
Şekil 3. 26. Parça 1'in analiz başlangıç şartlarının gösterimi



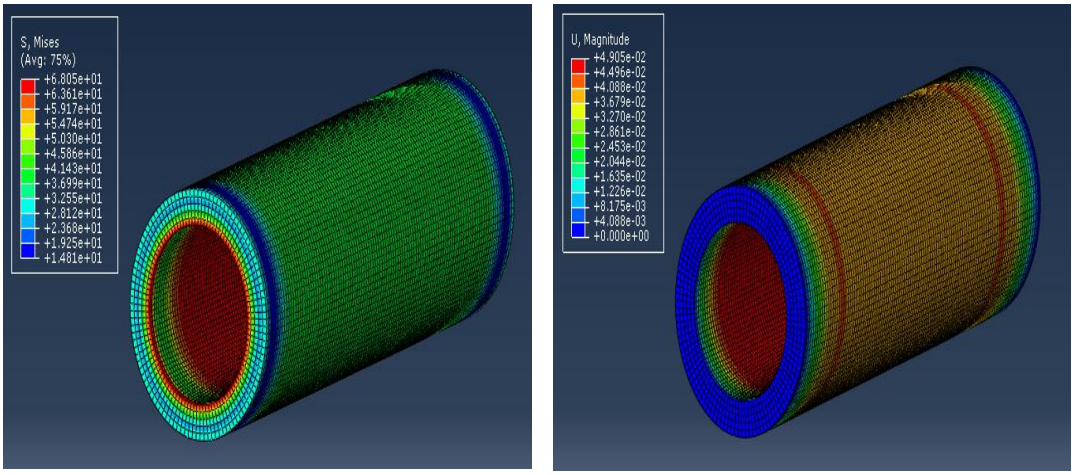
Şekil 3. 27. Parça 1'in analiz sonuçları

- Analiz sonucu olarak 70 MPa gerilme ve 0,048mm deplasman elde edildi.

Parça 2’nin analiz başlangıç şartları ve sonuçları (Şekil 3.28 ve Şekil 3.29);



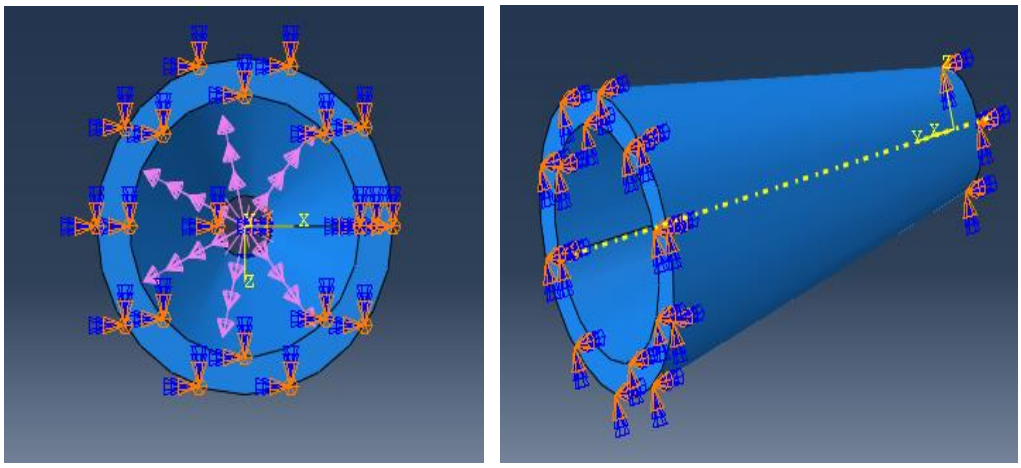
Şekil 3. 28. Parça 2'nin analiz başlangıç şartlarının gösterimi



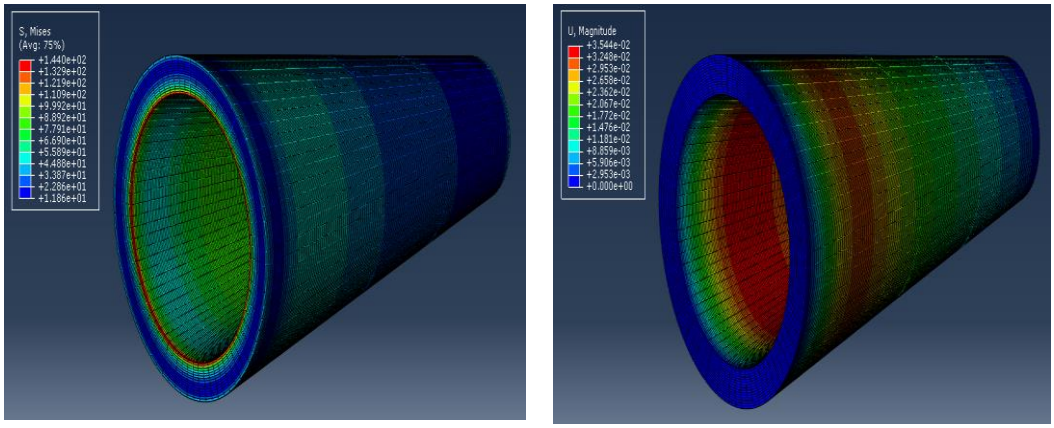
Şekil 3. 29. Parça 2'nin analiz sonuçları

- Analiz sonucu olarak 68.05 MPa gerilme ve 0,04905 mm deplasman elde edildi.

Parça 3’ün analiz başlangıç şartları ve sonuçları (Şekil 3.30 ve Şekil 3.31);



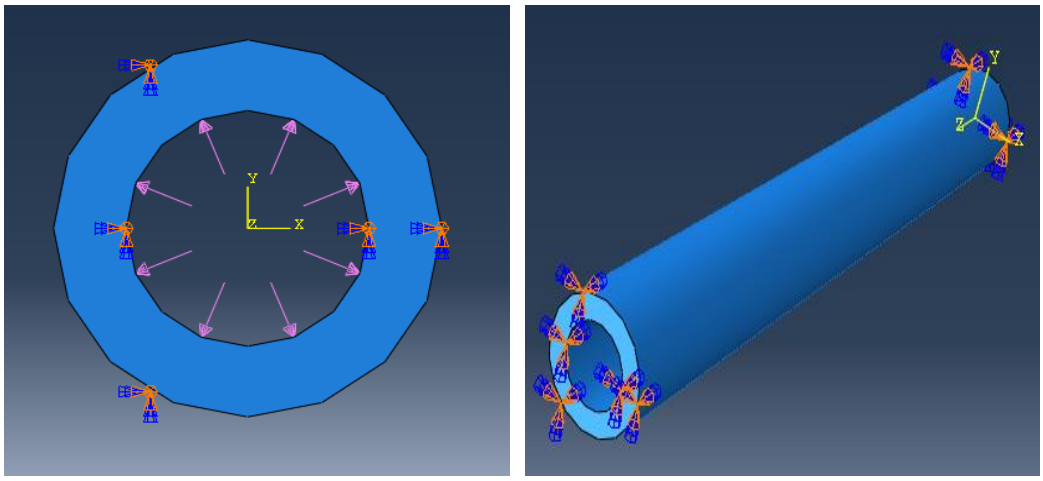
Şekil 3. 30. Parça 3'ün analiz başlangıç şartlarının gösterimi



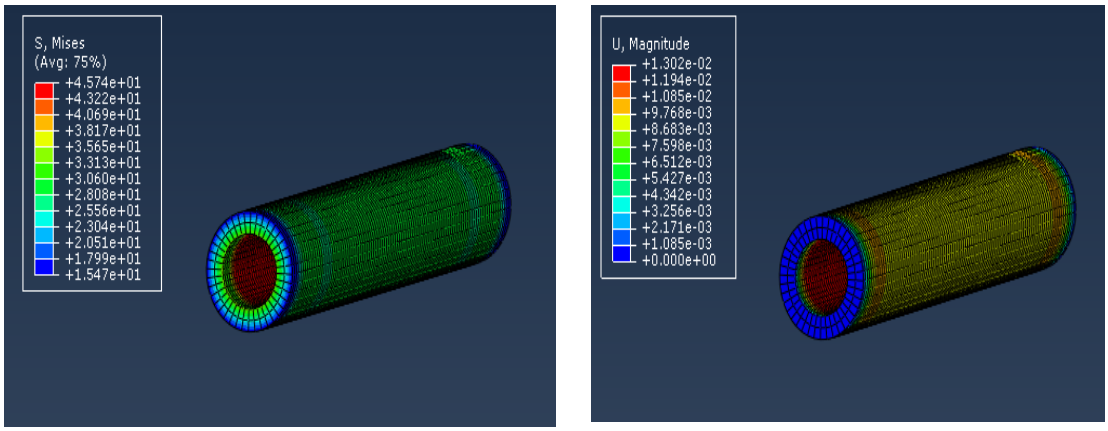
Şekil 3. 31. Parça 3'ün analiz sonuçları

- Analiz sonucu olarak 144 MPa gerilme ve 0,0354 mm deplasman elde edildi.

Parça 4’ün analiz başlangıç şartları ve sonuçları (Şekil 3.32 ve Şekil 3.33);



Şekil 3. 32. Parça 4'ün analiz başlangıç şartlarının gösterimi



Şekil 3. 33. Parça 4'ün analiz sonuçları

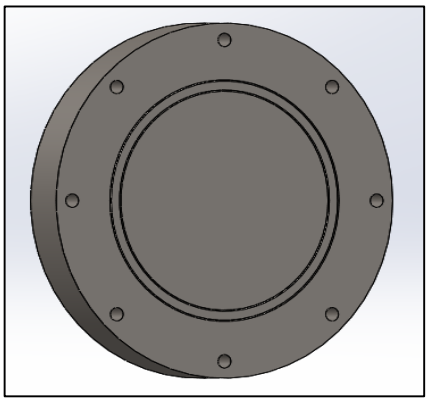
- Analiz sonucu olarak 144 MPa gerilme ve 0,0354 mm deplasman elde edildi.

✓ Yapılan analizlerin sonucuna göre uygun bir et kalınlığına sahip kalın etli çelik boru verilen basınçlarda emniyet sınırları içerisinde kaldı ve üretim için seçildi.

3.5. 3D CAD Tasarımı Ve Şok Tüpü Makinesinin Üretimi

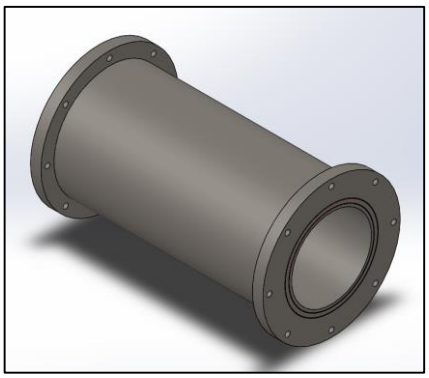
Şoktüpün 3D cad tasarımı solidworks programında parçalar halinde çizilerek montajı yapıldı. Parçaların üzerine sızdırmazlık sağlaması için oring delikleri de çizildi.

Dış kapak (Şekil 3.34);



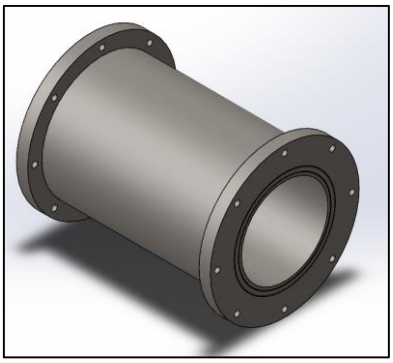
Şekil 3. 34. Şok tüpü kapak tasarımı

Ön basınç bölgesi (Şekil 3.35);



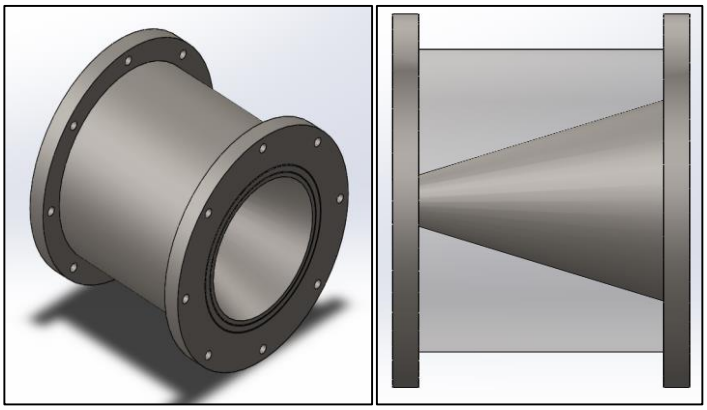
Şekil 3. 35. Şok tüpü ön basınç bölgesi tasarımı

Akış bölgesi düz kısım (Şekil 3.36);



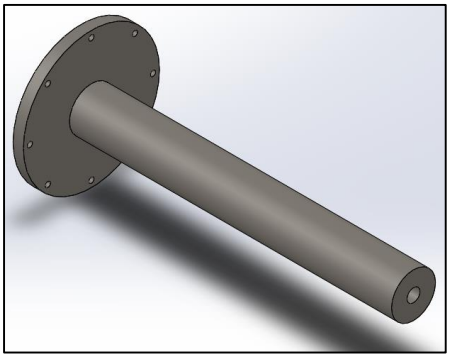
Şekil 3. 36. Şok tüpü akış bölgesi tasarımı

Akış bölgesi konik kısım (Şekil 3.37);



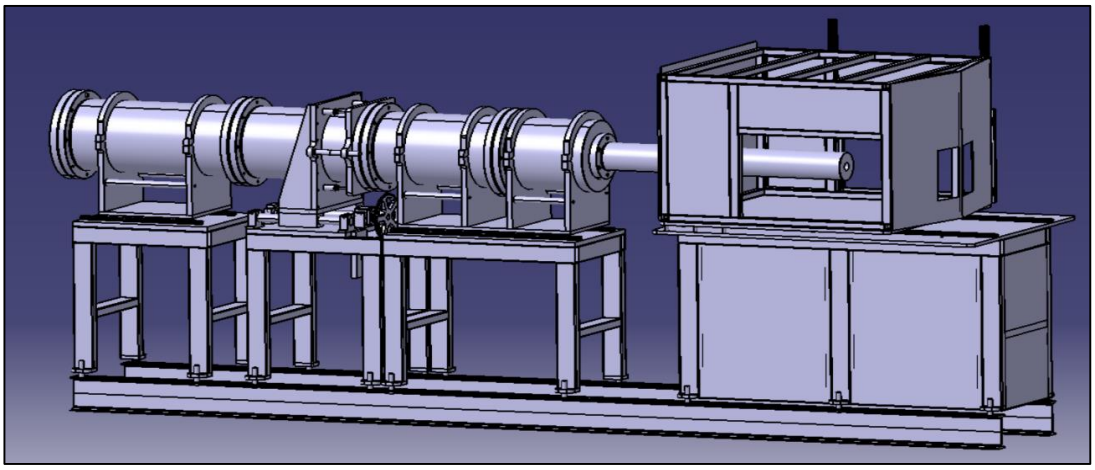
Şekil 3. 37. Şok tüpü akış bölgesi konik kısım tasarımı

Akış bölgesi çıkış kısmı (Şekil 3.38);



Şekil 3. 38. Şok tüpü akış bölgesi çıkış kısmı tasarımı

Şok tüp deney düzeneği tasarımı genel montaj (Şekil 3.39);



Şekil 3. 39. Şok tüpü son tasarımı

Üretim aşamalarından sonra şok tüp deney düzeneği Bursa Uludağ Üniversitesi'nde bulunan "Uygulamalı Mekanik Ve İleri Malzemeler Araştırma Laboratuvarı " na yerleştirildi (Şekil 3.40);



Şekil 3. 40. Şok tüpü üretim sonrası görseli

3.6. Sandviç Malzeme Üretimi

Bu tez çalışması kapsamında deney yapılması için 2 farklı köpük malzemeden çekirdek yapısına sahip olan sandviç yapılar üretildi.

1. EPP köpük malzeme çekirdek yapısına sahip sandviç
2. XPS köpük malzeme çekirdek yapısına sahip sandviç

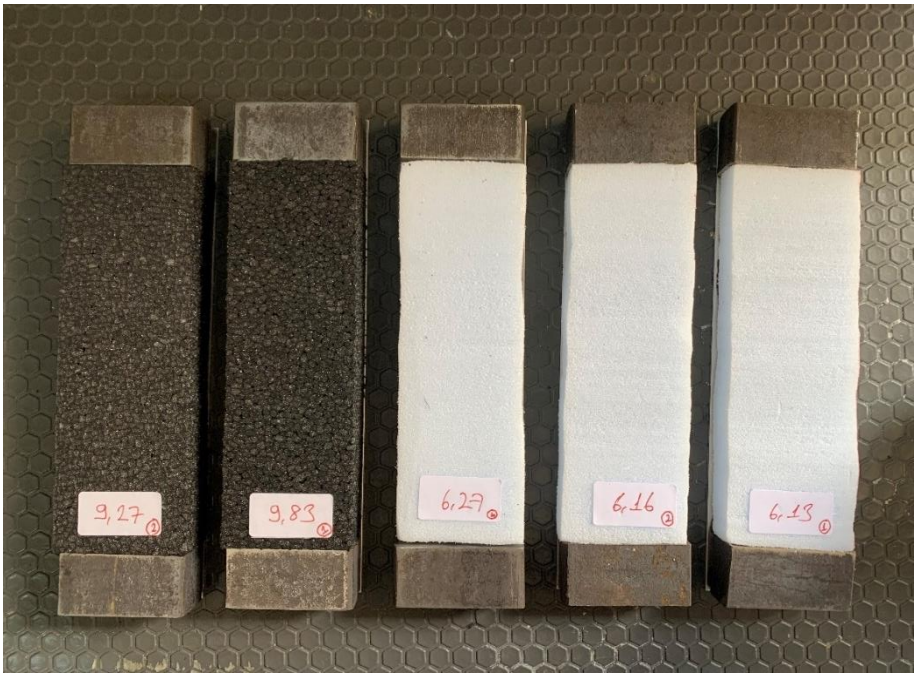
Sandviç yapılar üretilirken ilk önce sandviç yapıların üst ve alt kısmını kapsayacak olan alüminyum plakalar ve sabitleme aparatları olan metal parçalar uygun ebatlarda kesilerek aseton yardımıyla üzerindeki yağ ve kir tabakası temizlendi. EPP ve XPS köpükler uygun ebatlarda kesilerek ağırlıkları ölçüldü. Hazırlanan sandviç yapı elemanları sıcak silikon (Şekil 3.41) yardımıyla Şekil 3.42'de gösterildiği gibi birbirlerine yapıştırıldı. Toplamda üç adet XPS köpük ve iki adet EPP köpük çekirdekli olmak üzere beş adet sandviç numune üretildi (Şekil 3. 43). Son olarak deplasman sensörü bağlama aparatı sandviç yapılara eklendi ve Şekil 3. 44'deki sandviç yapılar elde edildi.



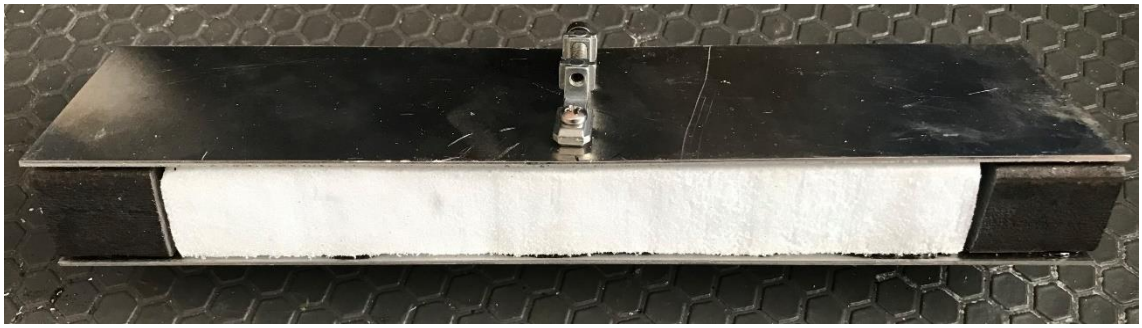
Şekil 3. 41. Sandviç üretiminde kullanılan silikon yapıştırıcı



Şekil 3. 42. Yapıştırıcı sürülen yüzey plakaları



Şekil 3. 43. Hazırlanan XPS ve EPP köpük çekirdekli numuneler



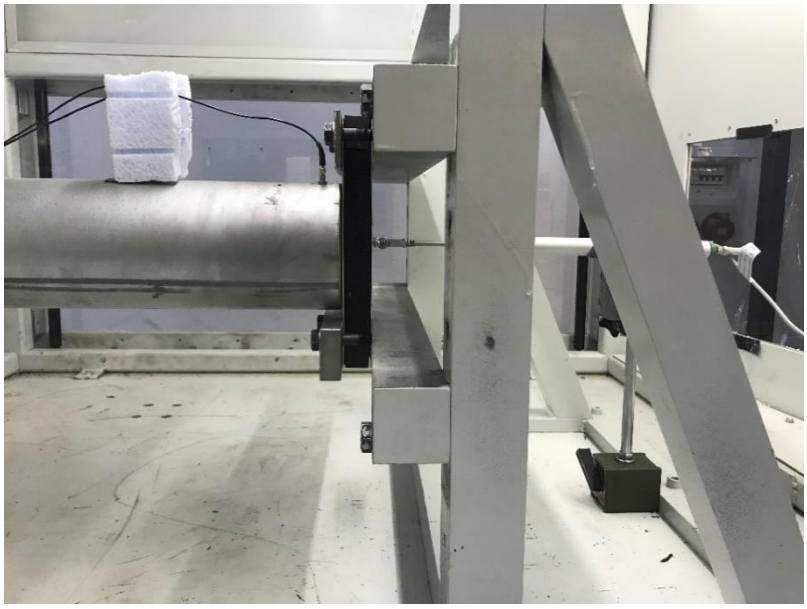
Şekil 3. 44. Deplasman sensörü aparatı bağlanarak teste hazır hale getirilen numuneler

Hazırlanan numunelerin kütleleri ölçüldü. Ölçümlere göre;

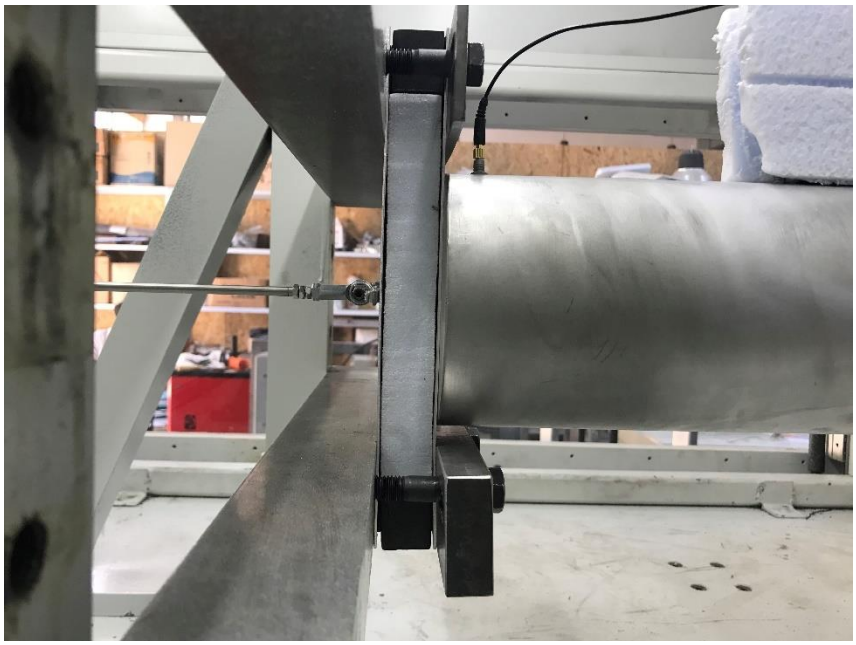
1. EPP köpük malzeme çekirdek yapısına sahip sandviçlerin ortalama ağırlığı: 810.86 g
2. XPS köpük malzeme çekirdek yapısına sahip sandviçlerin ortalama ağırlığı: 807.45 g

3.7. Sandviç Yapıların Şok Testi

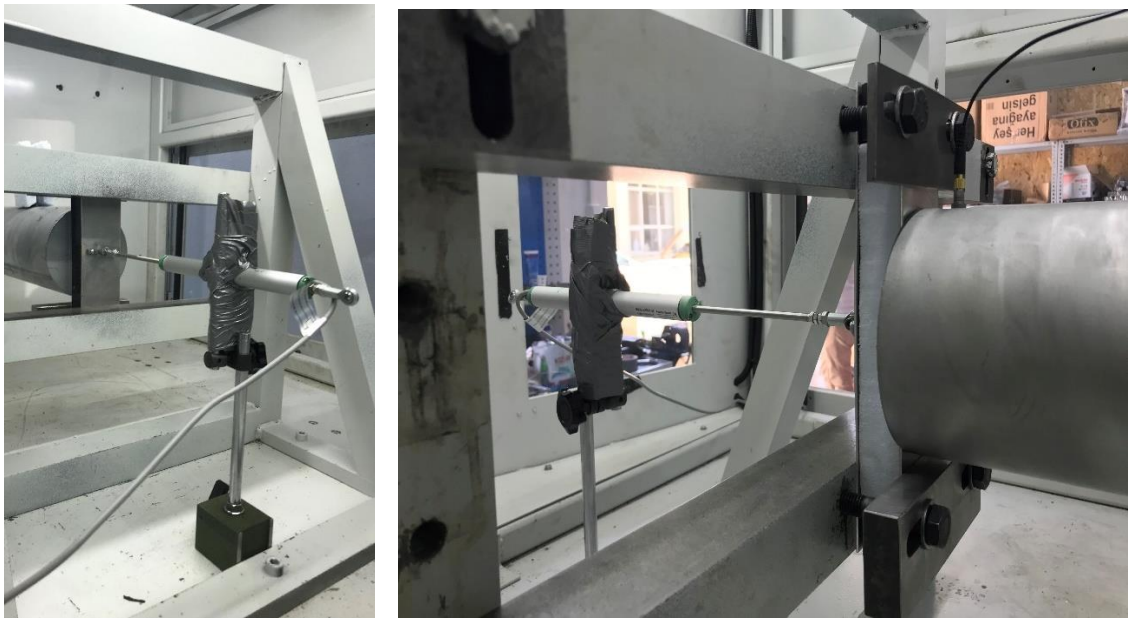
Üretilen EPP ve XPS köpük malzeme çekirdek yapısına sahip sandviç yapıların şok testleri yapıldı ve sonuçları veri toplama cihazı yardımıyla elde edildi. Test yapılacak sandviç yapılar şok tüpünün çıkışında bulunan sabitleme aparatına bağlandı (Şekil 3.45 ve Şekil 3.46). Sandviç yapılarda bulunan deplasman sensörü aparatına deplasman sensörü bağlandı (Şekil 3.47). Diyafram için mylar malzeme seçildi, şok tüpü bağlantı noktalarına göre hazırlandı ve şok tüpüne monte edildi (Şekil 3.48). Basınç sensörleri ve deplasman sensörü veri toplama cihazına bağlandı ve deney düzeneği hazırlandı (Şekil 3.49 ve Şekil 3.50). Deneyler için azot gazı kullanıldı. Her iki sandviç yapı için aynı şartlar altında şok testleri yapıldı ve sonuçlar elde edildi.



Şekil 3. 45. EPP köpük malzeme çekirdek yapısına sahip sandviç yapı test düzeneğine bağlanması



Şekil 3. 46. XPS köpük malzeme çekirdek yapısına sahip sandviç yapı test düzeneğine bağlanması



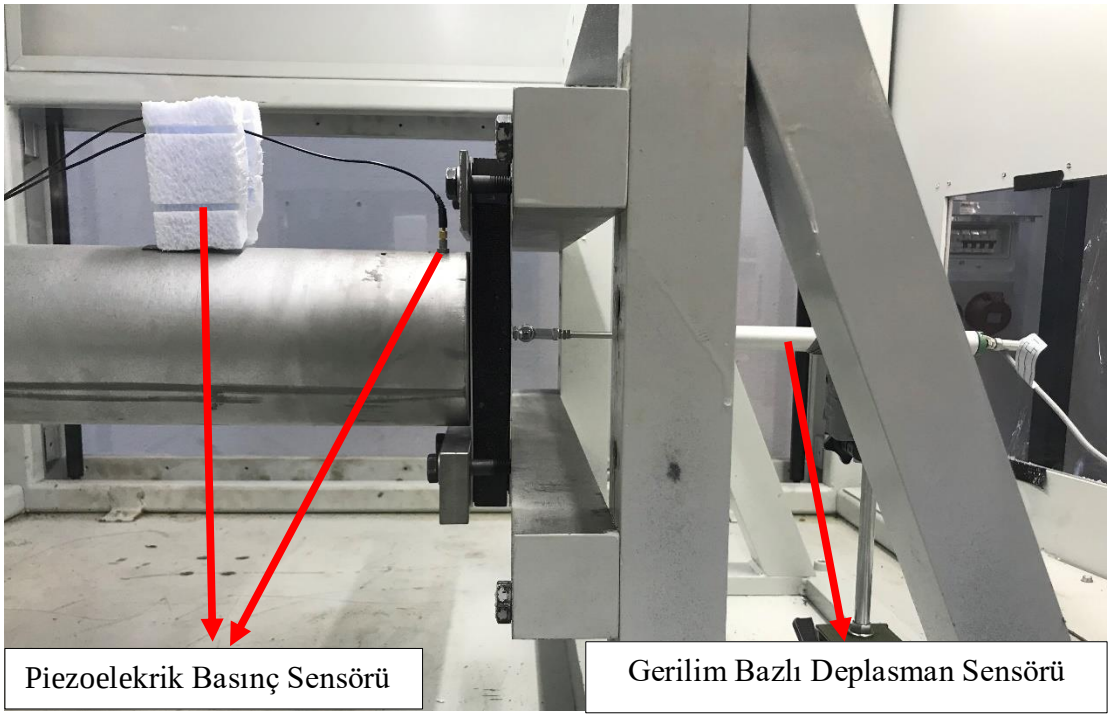
(a) (b)

Şekil 3. 47. Deplasman sensörünün konumlandırılması

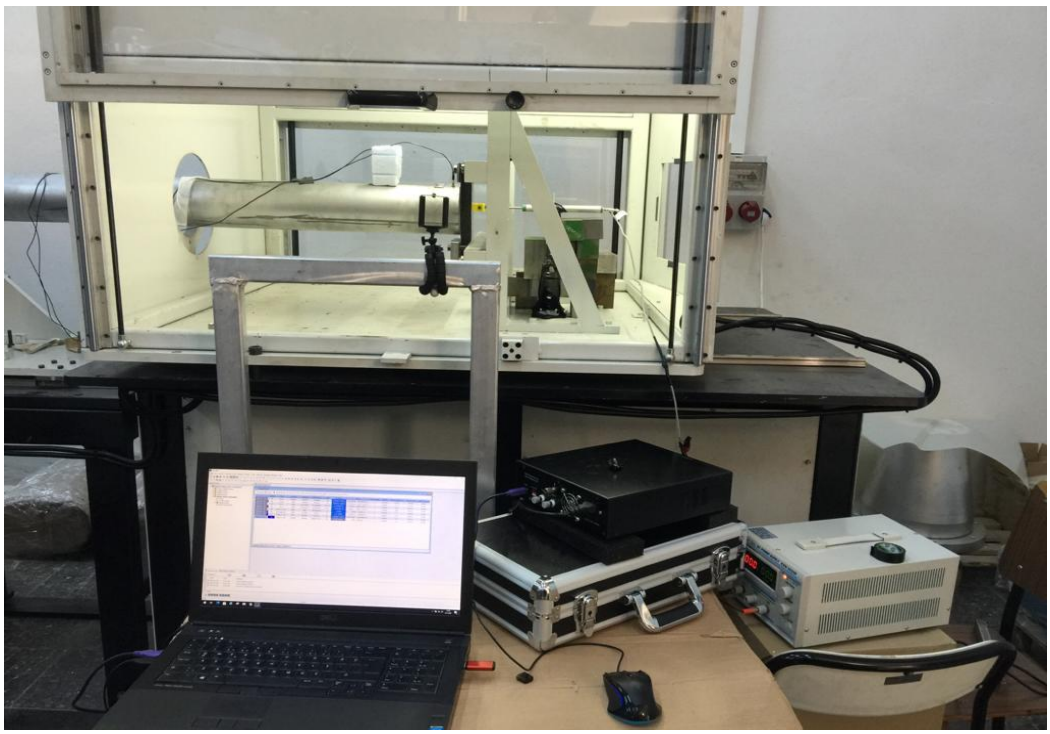
a) arkadan görünüş b) önden görünüş



Şekil 3. 48. Deneyde kullanılan diyaframın başlangıç görüntüsü



Şekil 3. 49. Deney düzeneğinde basınç ve deplasman sensörlerinin konumları



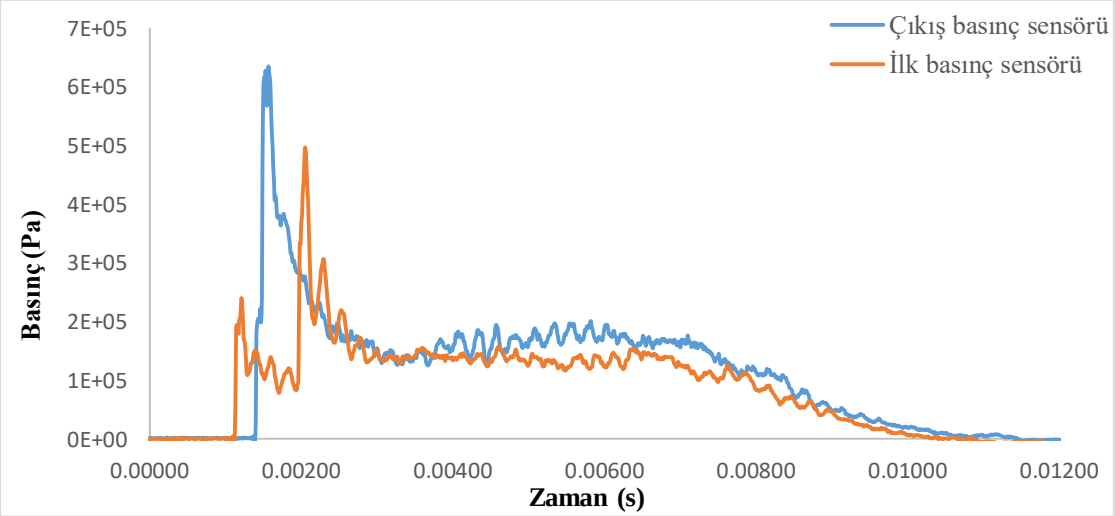
Şekil 3. 50. Şok testi deney düzeneği

4. BULGULAR

Bu bölümde yukarıda anlatılan şok tüpü deneyi sonuçları açıklamalarıyla birlikte verilmiştir. Farklı çekirdek malzemesine sahip sandviç yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi adına şok tüpü deneyleri yapılmış ve sonuçlar kıyaslama yapılarak incelenmiştir. Yapılan şok tüpü deneyleri ile hem yapıların şok yükü altındaki davranışlarının farklılığı incelenmiş hem de farklı geometrideki sandviç yapıların mekanik özellikleri kıyaslanmıştır.

EPP Ve XPS Köpük Malzeme Çekirdek Yapısına Sahip Sandviçlerin Şok Testi Sonuçları

Üretilen EPP köpük malzeme çekirdek yapışıma sahip sandviç yapılar, üretilen şok tüpü deney cihazında literatüre uygun olarak testleri yapıldı. Malzemeye etkiyen basınç kuvveti şok tüp deney düzeneğindeki basınç sensörleri yardımıyla elde edildi (Şekil 4.1) ve hız verisine ulaşıldı. Deneyde kullanılan diyaframın deney sonrası görüntüsü fotoğraflandı. Ayrıca numuneye bağlı olan deplasman sensörü yardımıyla numunenin zamana bağlı olarak sergilediği deplasman verisi ve kamera yardımı ile de deney anındaki ağır çekim görüntüleri elde edildi.

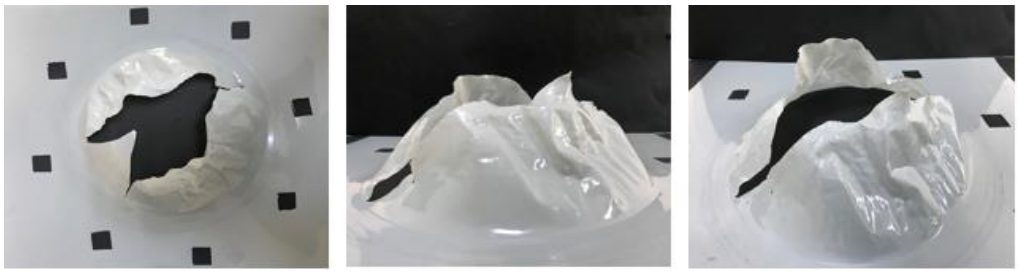


Şekil 4. 1. Şok testlerinde patlama sonucu oluşan basınç- zaman grafiği

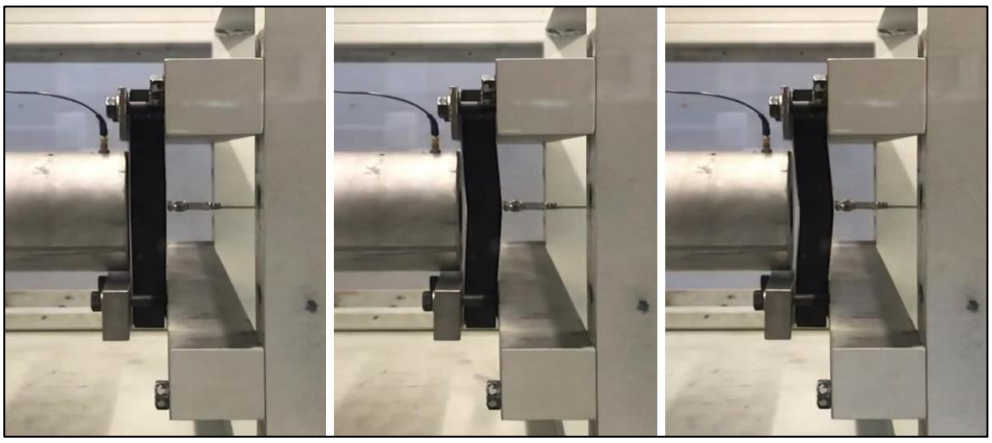
Şok testi sonucunda Şekil 4.1 incelendiğinde malzeme üzerine gelen maksimum basınç değeri çıkış basınç sensöründen 0,635 MPa olarak ölçülmüştür.

Şok testi sonucunda oluşan test hızı verisini bulmak için Şekil 4.1'deki iki basınç sensörünün ilk yükselme zamanları arasındaki fark bulundu (0,00026 s). İki sensör arasındaki mesafe ölçüldü (16 cm). Yolun hız ve zamana bağlı denklemi doğrultusunda hız verisi 615,38 m/s bulundu. Mach sayısını bulmak için deney hızını ses hızına oranlamamız gerekmektedir. Bunun sonucunda deneyde sonucunda oluşan mach sayısı (615.38 / 343.2) 1,79 bulundu. Çizelge 2.3 incelendiğinde akış tipimizin süpersonik akış olduğu bulundu. Mylar diyaframın patlaması için gereken basınç değeri de yaklaşık olarak 7 MPa olarak argon tüpünün üzerindeki manometre yardımıyla elde edildi.

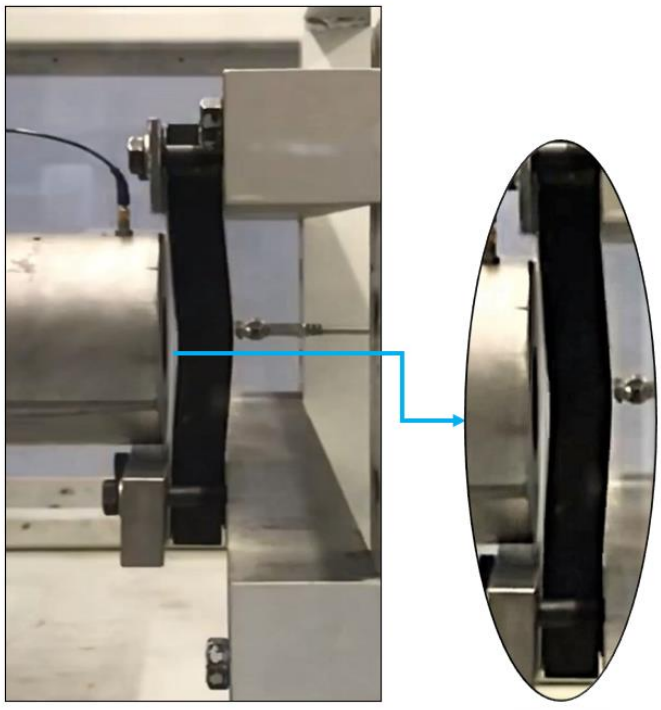
Şok testinde patlama sonucunda diyafram görüntüsü Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



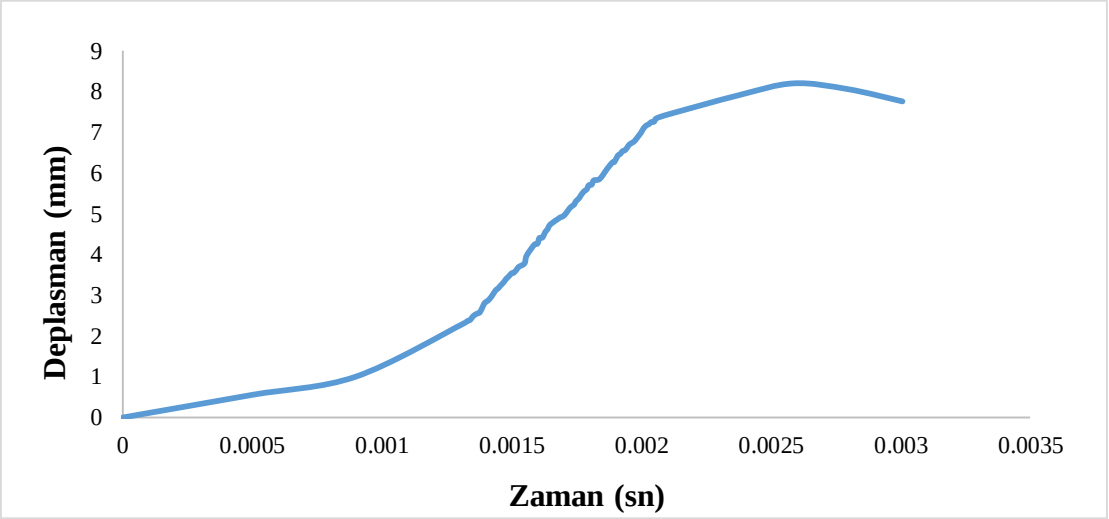
Şekil 4. 2. Şok testleri sonucunda oluşan diyafram görüntüsü



Şekil 4. 3. EPP köpük çekirdek yapılı sandviçin şok tüpü testindeki zamana bağlı değişim görüntüsü

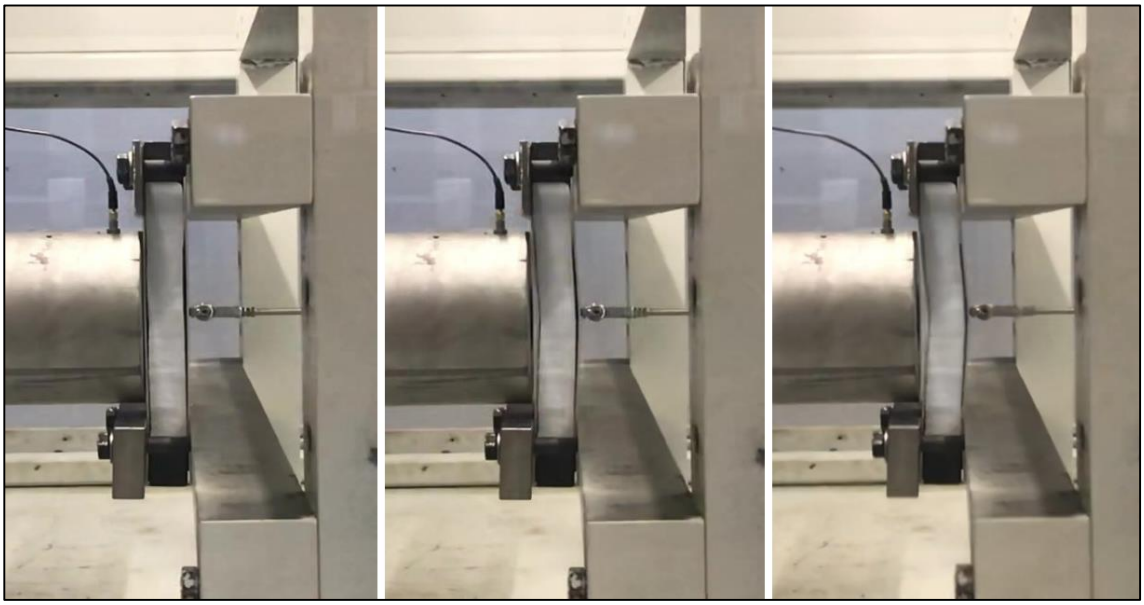


Şekil 4. 4. Şok testi sırasında malzemede oluşan deplasman (EPP köpük)

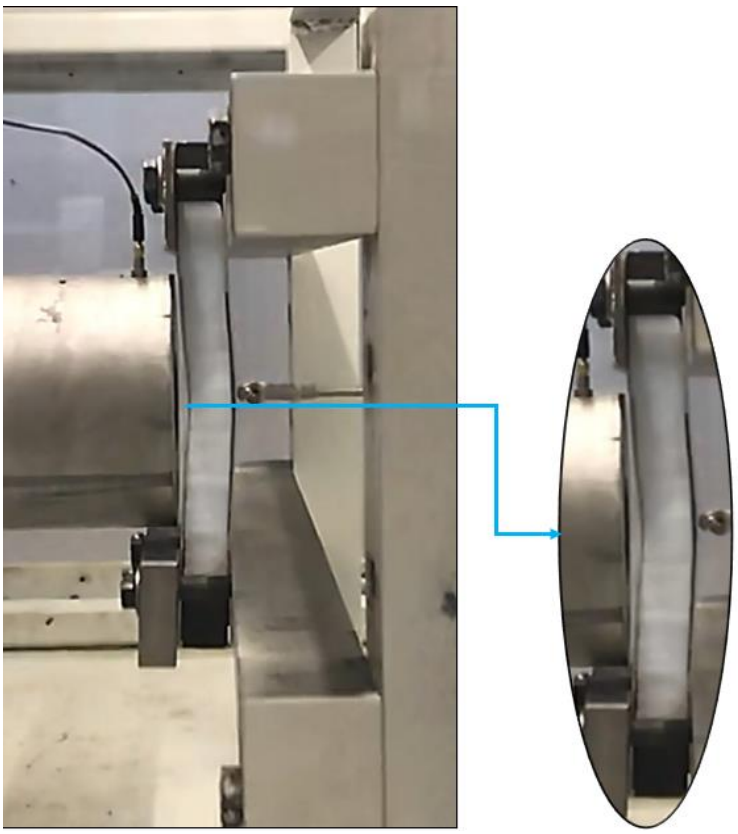


Şekil 4. 5. EPP köpük çekirdek yapısına sahip sandviç yapının arka plakasının şok testi sonucunda oluşan deplasman-zaman grafiği

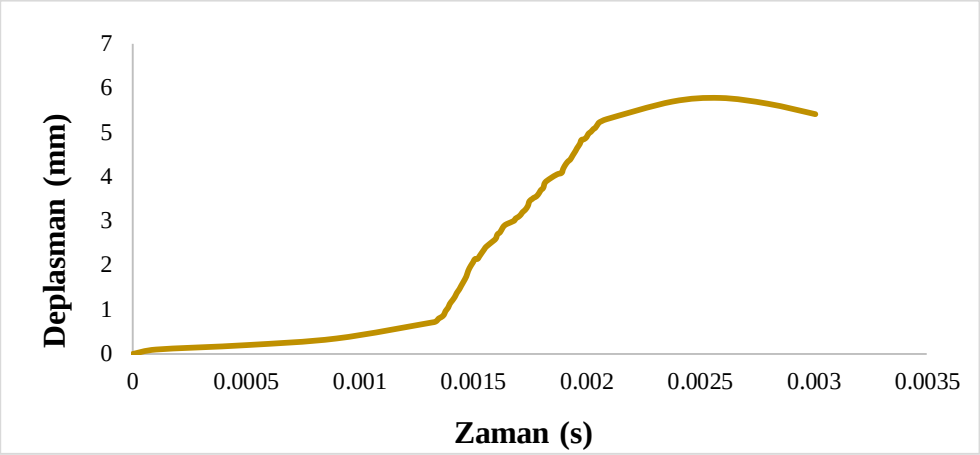
Şekil 4.3'den de görüldüğü üzere şok testi sonucunda EPP köpük çekirdek yapısına sahip malzeme 8.1925 mm maksimum deplasman yapmıştır. Maksimum deplasmandan sonra malzeme bir miktar ters yönde geri yaylanma yapmıştır.



Şekil 4. 6. XPS köpük çekirdek yapılı sandviçin şok tüpü testindeki zamana bağlı değişim görüntüsü



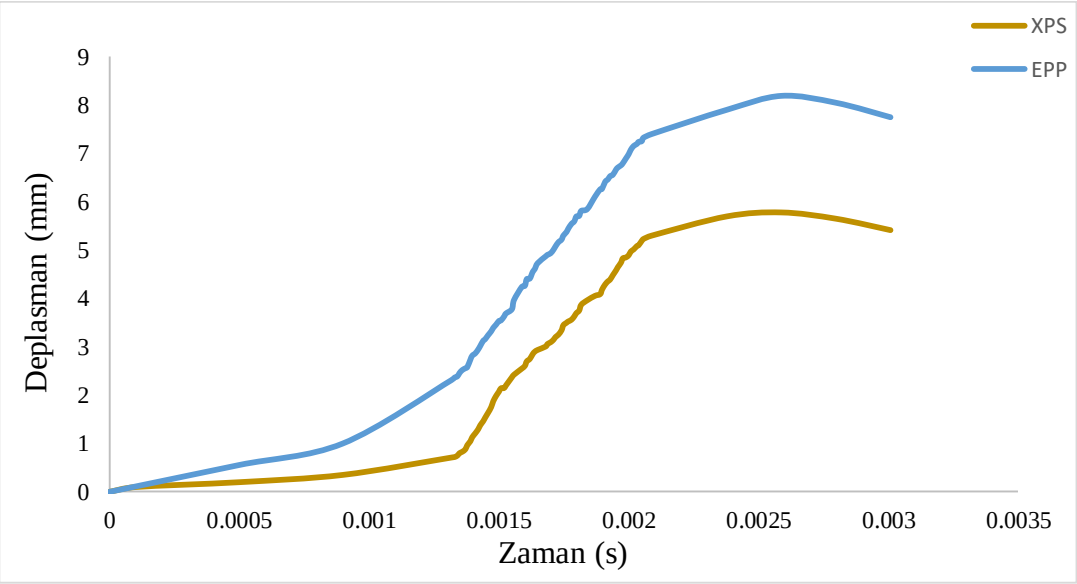
Şekil 4. 7. Şok testi sırasında malzemede oluşan deplasman (XPS köpük)



Şekil 4. 8. XPS köpük çekirdek yapısına sahip sandviç yapının arka plakasının şok testi sonucunda oluşan deplasman-zaman grafiği

Şekil 4.8'den de görüldüğü üzere şok testi sonucunda XPS köpük çekirdek yapısına sahip malzeme 5.7829 mm maksimum deplasman yapmıştır. Maksimum deplasmandan sonra bu sandviç yapıda da malzeme bir miktar ters yönde geri yaylanma yapmıştır.

Şekil 4.9'da ise XPS ve EPP köpük çekirdek malzemesine sahip sandviç yapıların şok testi altındaki zamana bağlı deplasmanları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4. 9. XPS ve EPP köpük çekirdek yapısına sahip sandviç yapıların arka plakalarında şok testi sonucunda oluşan deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, şok tüpü deney düzeneği oluşturularak iki farklı köpük malzeme çekirdek yapısına sahip sandviç yapıların şok yükü altındaki yapısal davranışları hakkında bilgiler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yapılar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca şok testi sonucunda üretilen şok tüpü deney makinesi hakkında bilgiler elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan şu çıkarımları yapılabilir;

- Şok testi sonucunda ortaya çıkan basınç-zaman grafikleri incelendiğinde, iki basınç sensörü arasındaki mesafe, iki basınç sensörü arasındaki geçen süreye oranlandığında deney hızı 615,38 m/s olarak elde edilmiştir. Bulunan hız değeri ses hızına oranlandığında akışın mach sayısı 1,79 olarak bulundu. Çizelge 2.3 incelendiğinde akış tipinin süpersonik akış olduğu tespit edildi.

- Şok testi sonucunda ortaya çıkan basınç-zaman grafikleri incelendiğinde çıkış basınç sensöründeki maksimum basınç değeri 0,635 MPa elde edilmiştir. Basınç-zaman grafiği, literatürdeki şok testi basınç-zaman grafikleri ile karşılaştırıldığında benzer eğriler görülmektedir. Bu kıyaslama sonucunda üretilen şok tüpü deney makinesinde yapılan şok testinin başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

- Şok testi patlama sonucunda elde edilen Şekil 4.2'deki patlamış diyafram görüntüsü literatür ile karşılaştırıldığında benzerlik göstermektedir. Bu karşılaştırma sonucu da üretilen şok tüpü deney makinesinde yapılan şok testinin başarılı olduğunu göstermektedir.

- Yapılan şok testi sonucunda EPP ve XPS köpük çekirdek yapısına sahip olan sandviçlerin arka plakalarının yaptıkları deplasman verileri incelenecek olursa XPS köpük çekirdek yapısına sahip olan sandviç yapının, EPP köpük çekirdek yapısına sahip olan sandviç yapıya göre daha az deplasman yaptığı gözlemlenmiştir.

- Şok testi sonucunda arka plakalarda oluşan deplasman verilerine göre XPS köpüğün, daha hafif bir yapıya sahip olmasının yanında EPP köpüğe göre daha fazla enerji sönümleme kabiliyeti olduğu da tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

Asi, D. (2018). Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerde İlave Olarak Kullanılan Parçacıkların Geometrisinin Kompozit Malzemelerin Fiziksel Ve Mekaniksel Özelliklerine Etkisinin Araştırılması (Doktora tezi). Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr/

ASTM-C297. (2020). Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions 1. doi: 10.1520/C0297

ASTM-C364. (2007). Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich. doi: 10.1520/C0364

ASTM-C365. (2003). Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores 1. doi: 10.1520/C0365

ASTM-C393. (2006). Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. doi: 10.1520/C0393

ASTM-D1781. (2008). Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives. doi: 10.1520/D1781-98R12.2

Borovinšek, M., Vesenjak, M., Matela, J. ve Ren, Z. (2008). Computational Reconstruction Of Scanned Aluminum Foams For Virtual Testing. J. Serbian Soc. Comput. Mech, 2:16-28.

Bulut, S., Ünveren, M., Arısoy, A. ve Böke, E. (2011). CFD Analiz Yöntemiyle Klima Santrallerinde İç Kayıpların Azaltılması. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.

Demir, H. (2013). Doğal Havalandırma Yöntemlerinin Sayısal Modellemesi. (Yüksek lisans tezi) Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr/

Fiedler, T., Pesetskaya, E., Öchsner, A. ve Grácio, J. (2006). Calculations Of The Thermal Conductivity Of Porous Materials. In Materials Science Forum (Vol. 514, Pp:754-758). Trans Tech Publications Ltd.

Grünewald, J., Parlevliet, P. ve Altstädt, V. (2015). Manufacturing Of Thermoplastic Composite Sandwich Structures: A Review Of Literature. Journal Of Thermoplastic Composite Materials, 30(4): 437-464.

Kooistra, G. W., Deshpande, V. S. ve Wadley, H. N. (2004). Compressive Behavior Of Age Hardenable Tetrahedral Lattice Truss Structures Made From Aluminium. Acta Materialia, 52(14): 4229-4237.

Kooistra, G. W. ve Wadley, H. N. (2007). Lattice Truss Structures From Expanded Metal Sheet. Materials & Design, 28(2): 507-514.

Reis, E. M. (2005). Characteristics Of Innovative 3-D Frp Sandwich Panels. Phd Thesis. Graduate Faculty Of North Carolina State University. Department Of Civil Engineering Raleigh, USA.

Russo, A. L. ve Hertzberg, A. (1958). Modifications Of The Basic Shock Tube To Improve Its Performance. Cornell Aeronautical Laboratory, Buffalo, N.Y., Report AD 1052-A-7available From DDC As AD162251).

Saad, M. A. (1993). Compressible Fluid Flow, 2nd Ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc.

Seigal, A. E. (1957). Theoretical Study Of The Effect Of The Non-Ideality Of A Dense Shock Tube Driven Gas With Special Reference To Non-Uniform Shocktubes. U.S. Naval Ordnance Laboratory, White Oak, Maryland, NAVORD Report 5707(Available From DDC As AD167932).

Türkoğlu, İ. K. (2020). Üç Boyutlu Eklemeli Üretim Yöntemiyle Üretilmiş Termoplastik Esaslı Ökzetik Çekirdek Geometrili Sandviç Yapıların Statik Ve Dinamik Yükler Altında Davranışının İncelenmesi (Doktora tezi). Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr/

Türkoğlu, İ. K., Güçlü, H. ve Yazıcı, M. (2018). Quasi-Static And Dynamic Characterisation Of Hotmelt Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer (Eva) Adhesives And Self Reinforced Composite Laminates /Expanded Polypropylene Foam Sandwich Beams. 9. Otomotiv Teknolojileri Kongresi.7-8 Mayıs 2018. Bursa-Türkiye.

Vinson, J. R. (2018). The Behavior Of Sandwich Structures Of İsotropic And Composite Materials. CRC Press. Delaware, USA, Pp:188. Wright, J. 1961. "Shock Tubes," (Methuen And Co., Ltd., London).

Wright, J. K. (1961). The Shock Tube in High-Temperature Chemical Physics. doi: https://doi.org/10.1017/S0022112063211555

Zenkert, D. (1995). An Introduction To Sandwich Structures. Engineering Materials Advisory Services Ltd., Stockholm, Sweeden, pp: 277.

Zok, F. W., Waltner, S. A., Wei, Z., Rathbun, H. J., Mcmeeking, R. M. ve Evans, A. G. (2004). A Protocol For Characterizing The Structural Performance Of Metallic Sandwich Panels: Application To Pyramidal Truss Cores. . International Journal Of Solids And Structures, 41(22-23): 6249-6271.