ÇOK KATMANLI YAKIT BORULARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ VE MODELLERİN DENEYSEL OLARAK DOĞRULANMASI

Metin ALİBAŞOĞLU

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATMANLI YAKIT BORULARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ VE MODELLERİN DENEYSEL OLARAK DOĞRULANMASI

Metin ALİBAŞOĞLU
0000-0003-0622-2766

Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇOK KATMANLI YAKIT BORULARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ VE MODELLERİN DENEYSEL OLARAK DOĞRULANMASI

Metin ALİBAŞOĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR

Binek araçlarda yer alan yakıt taşıma sistemlerinde yakıtın iletimi yakıt boruları vasıtasıyla yapılmaktadır. Tek katmanlı veya çok katmanlı olarak kullanılabilen bu boruların malzemesi kauçuk veya plastik olabilmektedir. Çalışma kapsamında, üç katmanlı ve her bir katmanı PA12 malzemesinden imal edilmiş yakıt borusunun üç boyutlu olarak modellenmesi ve oluşturulan modelin sıcaklık etkisi altında sonlu elemanlar metodu kullanılarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. Modelleme ve sonlu elemanlar metodu için SolidWorks programı tercih edilmiştir. Analiz sonrası elde edilen model ile fiziki olarak üretilmiş ve tersine mühendislik ile üç boyutlu datası elde edilmiş olan model kıyaslanmıştır. İki data arasındaki konum farklılıkları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, fiziki üretimlerde parçayı ilgili kontrol fikstürüne göre uygun seviyeye getirmek için kullanılan deneme-yanılma metoduna yön vermesi ve deneme miktarlarının en aza indirgenmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yakıt borusu, sonlu elemanlar yöntemi, ürün doğrulama, modelleme, yakıt taşıma sistemleri
2022, xii + 50 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

MODELLING OF MULTILAYER FUEL TUBES WITH FINITE ELEMENT METHOD AND PHISICALLY VERIFICATION OF THOSE MODELS

Metin ALİBAŞOĞLU

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR

In the fuel carrying systems in passenger cars, the fuel is transmitted by fuel tubes. The material of these tubes, which can be used as single-layer or multi-layer, can be rubber or plastic. Within the scope of the study, three-dimensional modeling of a three-layer fuel tube, each layer of which is made of PA12 material, and analysis of the created model using the finite element method under the effect of temperature. SolidWorks program was preferred for modeling and finite element method. The model obtained after the analysis was compared with the model, which was physically produced and whose three-dimensional data were obtained by reverse engineering. The position differences between the two data were evaluated. As a result, it was ensured that it gave direction to the trial-and-error method used in physical productions to bring the part to the appropriate level according to the relevant checking fixture and to minimize the trial quantities.

Key words: Fuel tube, finite element method, product verification, modelling, fuel carrying systems
2022, xii + 50 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren ve rehberlik eden danışman hocam Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR'a teşekkür eder, öğrencisi olmaktan duyduğum mutluluğu belirtmek isterim.

Ayrıca, tez çalışmalarımda göstermiş oldukları destekten dolayı başta Aytekin Çağlar Bey olmak üzere tüm TI Otomotiv Bursa ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, her daim bana destek olan sevgili eşim Elif KOÇ ALİBAŞOĞLU'na, annem Habibe, babam Sami ve abim Mesut ALİBAŞOĞLU'na teşekkür ederim.

Metin ALİBAŞOĞLU
…/…/…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....vi
ABSTRACT.....vii
ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR.....viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....xiii
1. GİRİŞ…...……..1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....4
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....25
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....38
5. SONUÇ ……. 45
KAYNAKLAR.....47
ÖZGEÇMİŞ.....51

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
%	Yüzde
±	Artı veya eksi
F	Kuvvet
k	Global Direngenlik Matrisi
ºC	Santigrat derece
u	Bilinmeyen vektörü
Δu	Yer Değiştirme
ε	Mühendislik gerinmesi
εg	Gerçek gerinme
σ	Mühendislik Gerilmesi
σg	Gerçek Gerilme

Kısaltmalar	Açıklama
3D	Üç Boyutlu
AVI	Audio Video Interleaved
BBSA	Benzensülfonamid
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
DIN	Deutsches Institut für Normung
EFEP	Etilenperfloroetilenpropen
ETFE	Etilentetrafluoroetilen
ETFE	Etilentetralforoetilen
EVOH	Etilenvinilalkol
FEM	Finite Element Method
Hz	Hertz
mm	Milimetre
Na	Sodyum
NOK	Uygun olmayan
OEM	Original equipment manufacturer
OK	Uygun
PA12	Poliamid12
PA6	Poliamid6
PBN	Polibütilenaftalat
PBT	Polibütilenteraftalat
PPS	Polifenilen sülfür
PVDF	Plivinilidenflorür
Sec	Saniye
UV	Ultraviyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Araç yakıt sistemi şeması-1…….	4
Şekil 2.2.	Araç yakıt sistemi şeması-2……	5
Şekil 2.3.	Dizel motor çalışma prensibi……..	6
Şekil 2.4.	Emme zamanı……..	6
Şekil 2.5.	Sıkıştırma zamanı……	7
Şekil 2.6.	Ateşleme zamanı…….	7
Şekil 2.7.	Egzoz zamanı……..	8
Şekil 2.8.	Araç yakıt deposu…….....	9
Şekil 2.9.	Besleme pompası ile yakıt deposu…….....	10
Şekil 2.10.	Yakıt boruları…….	11
Şekil 2.11.	Yakıt filtresi……	12
Şekil 2.12.	Enjektörler……..…	13
Şekil 2.13.	Bujiler……	14
Şekil 2.14.	Ekstrüzyon hattı örneği……..	20
Şekil 2.15.	Çok katmanlı yakıt borusu ve PA ara yapıştırıcı……	20
Şekil 2.16.	İki katmanlı ve beş katmanlı yakıt borusu örnekleri…….	21
Şekil 3.1.	Çizgi elemanlar……..	27
Şekil 3.2.	Yüzey elemanlar……	27
Şekil 3.3.	Hacim elemanlar…….	27
Şekil 3.4.	Doğrusal yayın serbest cisim diyagramı…….	27
Şekil 3.5.	Yakıt borusu üç boyutlu modeli-1……..	30
Şekil 3.6.	Yakıt borusu üç boyutlu modeli-2…….	30
Şekil 3.7.	Yakıt borusu üç boyutlu modeli-3…….	31
Şekil 3.8.	Üç katmanlı yakıt borusu örneği……	31
Şekil 3.9.	Müşteriye ait dış ve iç çap ölçülerinin yer aldığı yüzey data…….	32
Şekil 3.10.	Yüzy dataya kalınlık verilerek elde edilen üç boyutlu boru datası……..……	32
Şekil 3.11.	Tersine mühendislik ile taramanın yapıldığı AICON makinesi-1	33
Şekil 3.12.	Tersine mühendislik ile taramanın yapıldığı AICON makinesi-2	33
Şekil 3.13.	Termal analiz simülasyonu……	34
Şekil 3.14.	Sıcaklık girdisinin gösterimi……..	34
Şekil 3.15.	Analizin başlatılması……..	35
Şekil 3.16.	Termal analiz sonucu…….	35
Şekil 3.17.	Fırın prosesi öncesi düz haldeki yakıt borusu……	36
Şekil 3.18.	Fırın prosesine girmek üzere kalıp gözlerine yerleştirilen yakıt boruları……...	37
Şekil 4.1.	Fırın prosesi tamamlanan ve şekil verilen yakıt boruları……	38
Şekil 4.2.	Analiz sonucuna göre elde edilen datanın fırın prosesi sonrası taranan data ile çakıştırılması-1……..	38
Şekil 4.3.	Analiz sonucuna göre elde edilen datanın fırın prosesi sonrası taranan data ile çakıştırılması-2……..	40
Şekil 4.4.	Gerilme analiz sonuçları-1…….....	40
Şekil 4.5.	Yer değiştirme analiz sonuçları-1…….	41
Şekil 4.6.	Gerilme analiz sonuçları-2…….....	41

Şekil 4.7. Yer değiştirme analiz sonuçları-2…….. 42
Şekil 4.8. Gerilme analiz sonuçları-3……..... 42
Şekil 4.9. Yer değiştirme analiz sonuçları-3…….. 43
Şekil 4.10. Gerilme analiz sonuçları-4……. 43
Şekil 4.11. Yer değiştirme analiz sonuçları-4…….. 44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklara ait deneme sonuçları……. 38

1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisindeki plastik uygulamaları olağanüstü bir büyüme kaydetmektedir. Bu uygulamaların en önemli kullanım alanlarından olan yakıt ve havanın taşınması, herhangi bir otomobilin çalışması için kritik öneme sahiptir. Kauçuktan yapılmış borular, bazı durumlarda metal borular da kullanılmış olsa da, yakıt veya hava taşımanın başlıca yolu olmuştur. Yakıt olarak alkol kullanımının artması, petrol yakıtlarından kaynaklanan emisyonlara ilişkin katı çevresel düzenlemeler ve yakıtlarda katkı maddesi olarak çeşitli kimyasalların kullanımına ilişkin kısıtlamalar, modern otomobillerde geleneksel kauçuk, plastik veya metal hortumları yakıt veya hava taşımacılığı için uygunsuz hale getirmiştir. Son zamanlardaki eğilim, farklı işlevlere sahip ve gereksinimlere özel hibrit malzemeler kullanan çok katmanlı borular geliştirmek olmuştur. Çok katmanlı kauçuk borulara ek olarak, naylon gibi çok sayıda polimer ve çok katmanlı boruları geliştirmek için türevler kullanılmıştır.

Yakıt ve havanın taşınması, herhangi bir otomobilin çalışması için kritik öneme sahiptir. Kauçuktan yapılmış borular, bazı durumlarda metal borular da kullanılmış olsa da, yakıt veya hava taşımanın başlıca yolu olmuştur. Yakıt olarak alkol kullanımının artması, petrol yakıtlarından kaynaklanan emisyonlara ilişkin katı çevresel düzenlemeler ve yakıtlarda katkı maddesi olarak çeşitli kimyasalların kullanımına ilişkin kısıtlamalar, modern otomobillerde geleneksel kauçuk, plastik veya metal hortumları yakıt veya hava taşımacılığı için uygunsuz hale getirmiştir. Son zamanlardaki eğilim, farklı işlevlere sahip ve gereksinimlere özel hibrit malzemeler kullanan çok katmanlı borular geliştirmek olmuştur. Çok katmanlı kauçuk borulara ek olarak, çok katmanlı boruları geliştirmek için naylon ve türevleri gibi çok sayıda polimer kullanılmıştır. Birkaç şirket, çok katmanlı hibrit boruları ticari olarak pazarlamaktadır, ancak en son özellikleri karşılayacak yeni borular geliştirmeye yönelik araştırmalar devam etmektedir. Farklı malzemeler veya teknolojiler kullanan yeni tip çok katmanlı boruların geliştirilmesine ilişkin kayda değer sayıda patent rapor edilmiştir. Çeşitli malzemeler kullanılarak hibrit boruların geliştirilmesi konusunda çok sayıda patent başvurusu yapılmış olmasına rağmen, çok katmanlı hibrit boruların yapısı ve özellikleri hakkında sınırlı bilimsel literatür bulunmaktadır (Jing ve ark., 2005).

Düzenleyici gereklilikler, otomobil üreticilerinin ve araç yakıt sistemi üreticilerinin bu gereksinimleri karşılayabilecek yakıt sistemleri tasarlamasını giderek daha zor hale getirmiştir. Bu eğilimler, borular ve yakıt hatları için daha iyi geçirgenliğe sahip malzemelerinin, daha iyi ve daha az sayıda bağlantının ve zorunlu dayanıklılık gereksinimini karşılayacak kadar dayanıklı malzemelerin kullanılmasını gerektirmiştir.
Bir araç için yakıt borusu evaporatif emisyon ihtiyaçları, borunun yüzey alanına, yapım malzemelerine ve aracın diğer yakıt bileşenlerinin toplam emisyonlarına bağlı olarak değişebilmektedir. Yakıt borusu, çarpmaya dayanıklılık ve montaj kolaylığı gibi performans gereksinimlerini de karşılamalıdır. Bu çeşitli gereksinimleri karşılamak için yeni boru yapılarının geliştirilmesi, genellikle benzer yapılar için malzeme bilgisi ve geçmiş performans verileri kullanılarak yapılmaktadır. Uç etkiler ve mikro sızıntılar daha önemli bir rol oynamaya başladığından, buharlaşma emisyonları gereksinimleri çok düşük olduğunda boru geçirgenliği ve toplam emisyon performansının tahmini daha zordur. Bu nedenle, belirli bir boru yapısının buharlaşma emisyonunun makul bir tahminini sağlayabilecek bir modele sahip olmak faydalıdır. Bu, deneme yanılma sürecini ortadan kaldıracak ve düşük emisyonlu boruların daha hızlı geliştirilmesine olanak sağlayacaktır (Molnar ve ark., 2002).

Çeşitli devlet kurumları tarafından yeni, daha katı hidrokarbon emisyon standartlarının oluşturulması, izin verilen geçirgenlik seviyeleri ve bunların nasıl ölçüldüğü ile ilgili durumda önemli değişikliklere neden olmaktadır. Diğer bir faktör, piyasada bulunan yakıtların doğasıdır: kimyasal olarak daha "agresif" hale gelmektedirler. Bu iki faktör nedeniyle, test yakıtları daha zorlayıcı hale gelmektedir. Aynı zamanda geçirgenlik direncini ölçmek için kullanılan test prosedürleri de değişmektedir. Bu prosedürler, artık, geçirgenlik seviyelerinin ölçümünde eskisinden çok daha hassas olmak zorundadır. Geçirgenlik direnci iyileştirildikçe, esnek hatların diğer gereksinimleri korunmalıdır. Bunlar, aşağıdaki gibi özellikleri içermektedir:

- Korozyon direnci
- Yakıt direnci
- Soğuk darbe performansı
- Konnektör entegrasyonu (Hopf ve ark., 1994).

Yakıt hatları için çok katmanlı boru geliştirmedeki ana sorun, genellikle uyumsuz olan polimerler arasında kalıcı bir bağ sağlamaktır. Geçirgenliğin ortada olduğu 3 katmanlı bir sistemde, bu katmanın hem dış katmana hem de iç katmana yapıştırılması gerekmektedir. Bu bağ aynı zamanda oldukça yüksek çalışma sıcaklıklarına ve yakıtın etkilerine karşı dayanıklı olmalıdır. Otomobil şirketlerinin oldukça belirsiz gereksinimlerinden (geliştirme çalışması için temel oluşturmalarına rağmen) ek zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu, özellikle izin verilen maksimum geçirgenlik oranı, test yakıtlarının bileşimi ve ölçümlerin yapılması gereken koşullar için geçerlidir. Doğru malzeme kombinasyonlarını belirlemenin yanı sıra, özellikle çok küçük geçirgenlik oranlarını ölçmek için geçirgenlik test cihazlarının da geliştirilmesi gerektiği bildirilmiştir (Hopf ve ark., 1994).

Düşük geçirgenlikli sıvı yakıt transferi için çok katmanlı termoplastik ve termoset boru ve hortum yapılarını başarılı bir şekilde geliştirmek için kapsamlı çabalar sarf edilmiştir. Yakıt sistemi boru tesisatının yaklaşık üçte biri ila yarısı, buhar işleme sisteminde kullanılmaktadır. Son kullanım koşulları altında yakıt buharlarına geçirgenlik sorunu ele alınmayı beklemektedir.

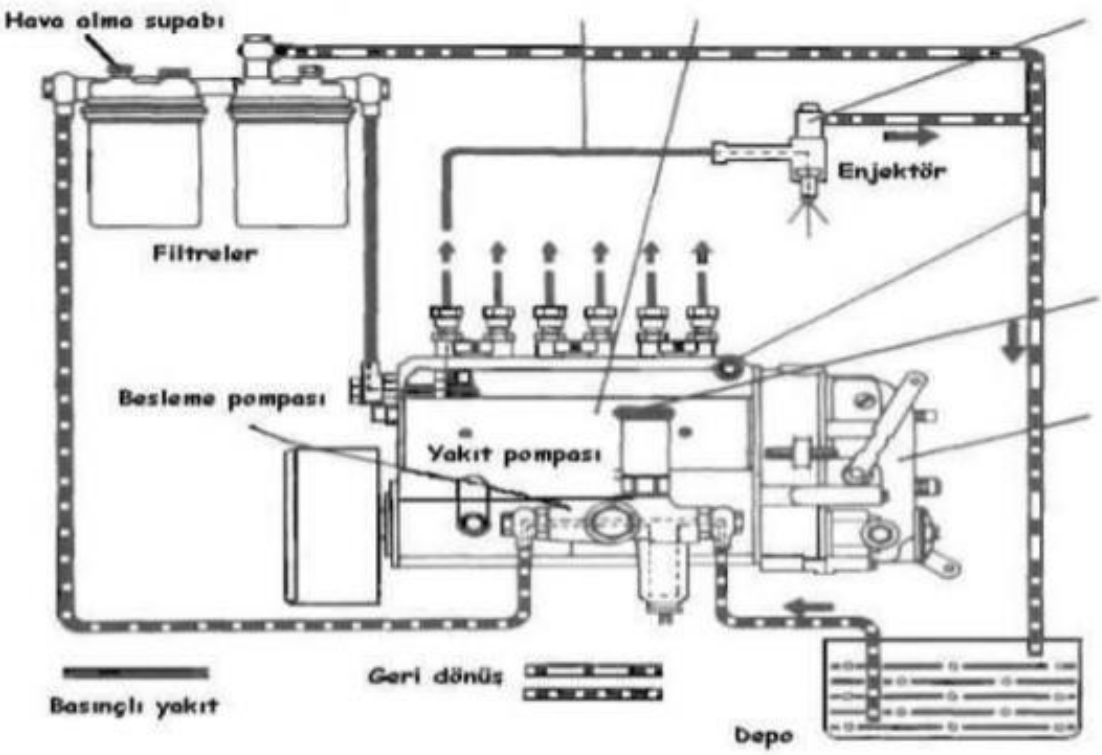
Son zamanlarda OEM'ler tarafından yakıt dağıtım sistemi performansı üzerindeki yakıt hattı malzemelerinin çıkarılabilir türlerinin etkileriyle ilgili endişeler dile getirilmiştir. Hem buhar hem de sıvı geçirgenlik verileri sağlamak için bir yöntem geliştirme sürecinde, sıvı ve buhar ortamları ile yakıt sistemi polimerlerinde bulunan ekstrakte edilebilir türler arasındaki etkileşimi aynı anda değerlendirmek için çaba sarf edilmiştir (Brahmi ve Wolf, 1999).

Bu çalışma kapsamında çok katmanlı PA12 yakıt borularının bilgisayar destekli tasarım programlarıyla modellenmesi, analiz edilmesi ve oluşturulan modellerin fiziki olarak doğrulanması amaçlanmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda elde edilen bulgular yakıt borularının şekillendirilmesinde önemli bir yeri olan çalışma parametrelerinin belirlenebilmesine katkıda bulunacaktır.

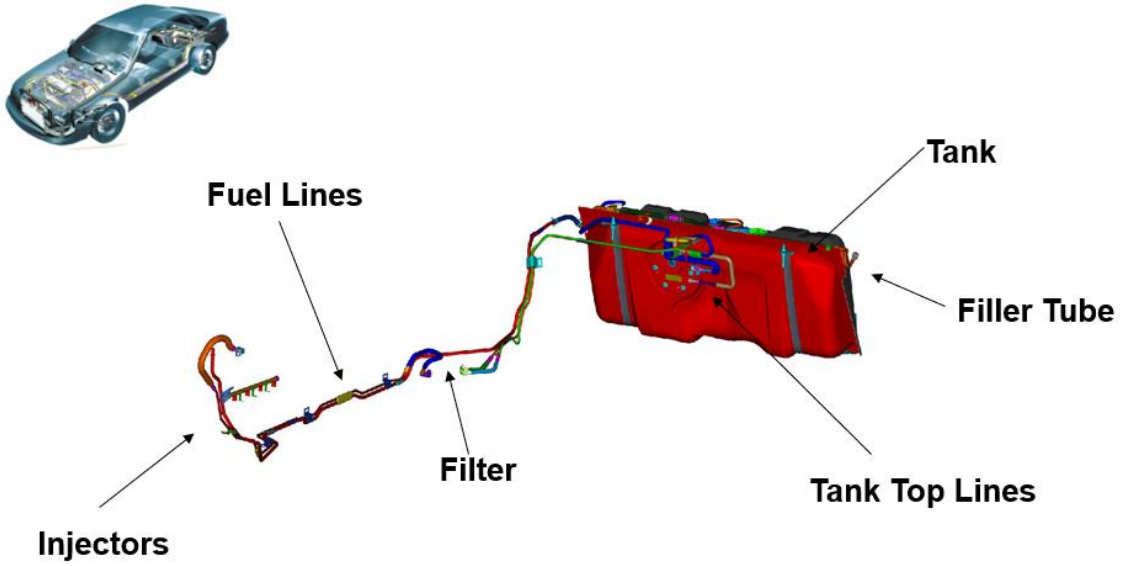
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Araç Yakıt Sistemi

Araç yakıt sistemi, motor için gerekli mazotu sıkıştırma zamanı sonunda silindir içerisine püskürterek yanma işlemini sağlamayı ve araç için gerekli gücü üretmeyi sağlar (Şekil 2.1., Şekil 2.2.).



Şekil 2.1. Araç yakıt sistemi şeması-1



Şekil 2.2. Araç yakıt sistemi şeması-2

2.2.Dizel Motorlar

Dizel motorların sektörde en küçük araçlardan, büyük iş makinelerine kadar pek çok alanda kullanımı mevcuttur. Gelişen teknolojiyle beraber daha sessiz çalışan ve daha verimli dizel motorlar geliştirilerek taşıtlarda kullanımı da yaygın hale gelmiştir. Dizel motorlar; kamyon, traktör, otobüs, otomobil ve iş makinelerinde, tüm deniz araçlarında, lokomotiflerde, sabit güç makinelerinde ve jeneratörlerde kullanılmaktadır (Anonim2, 2022).

Dizel motorların başlıca avantajları;

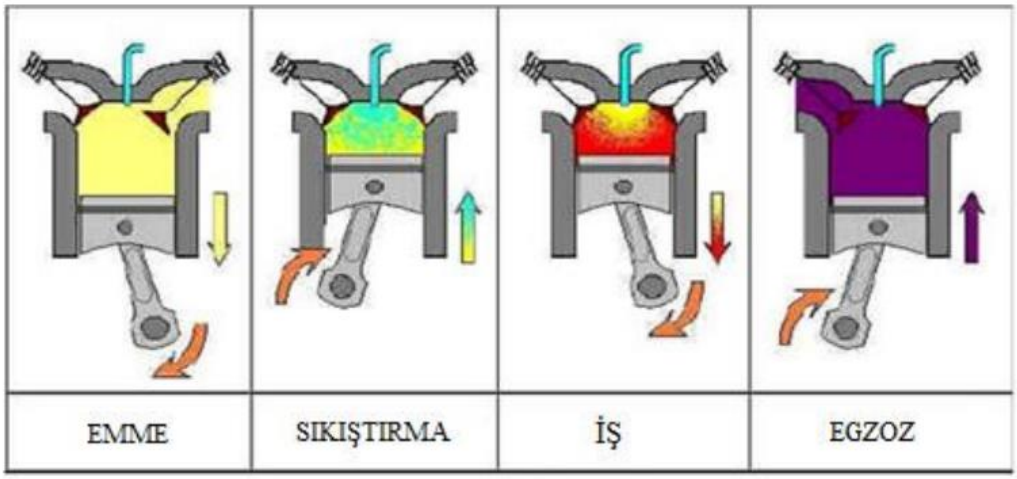
- Dizel motorlar benzinli motorlara göre daha az yakıt kullanırlar.
- Daha dayanıklı olmaları ve elektriksel bir ateşlemeye gerek duymamaları dolayısıyla benzinli motorlara kıyasla daha az sorun çıkarırlar.
- Dizel motorlar ağır vasıtalarda kullanım için uygundur.

Başlıca dezavantajları ise;

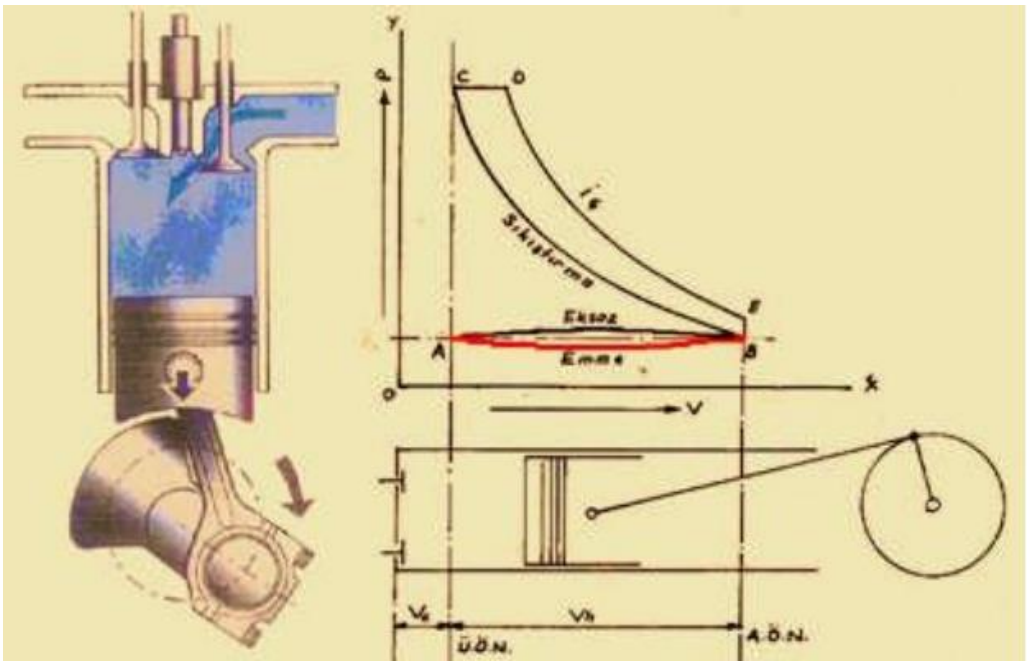
- Yanma işleminin, difüzyon yanma halinde olması nedeniyle daha fazla partikül madde oluşmaktadır.
- Dizel motorlar titreşimli ve seslidirler.
- Maksimum yanma basıncının çok yüksek olması sebebiyle dizel motorlar yüksek basınca dayanıklı materyalden üretilmiştir. Beygir gücü başına düşen ağırlık benzinli motorlara kıyasla daha fazla olup maliyeti de yüksektir.

- Yakıt enjeksiyon sistemleri kusursuz olmalıdır. Dolayısıyla daha sistemli olarak donatılmış olmakla birlikte dikkatli bakım ve servis gerektirmektedirler.
- Yüksek sıkıştırma oranının sağlanması için tahrik kuvveti fazla olmalıdır. Bu nedenle yüksek çalışma kapasitesine sahip marş motoru ve akü gerekmektedir (Anonim3, 2022).

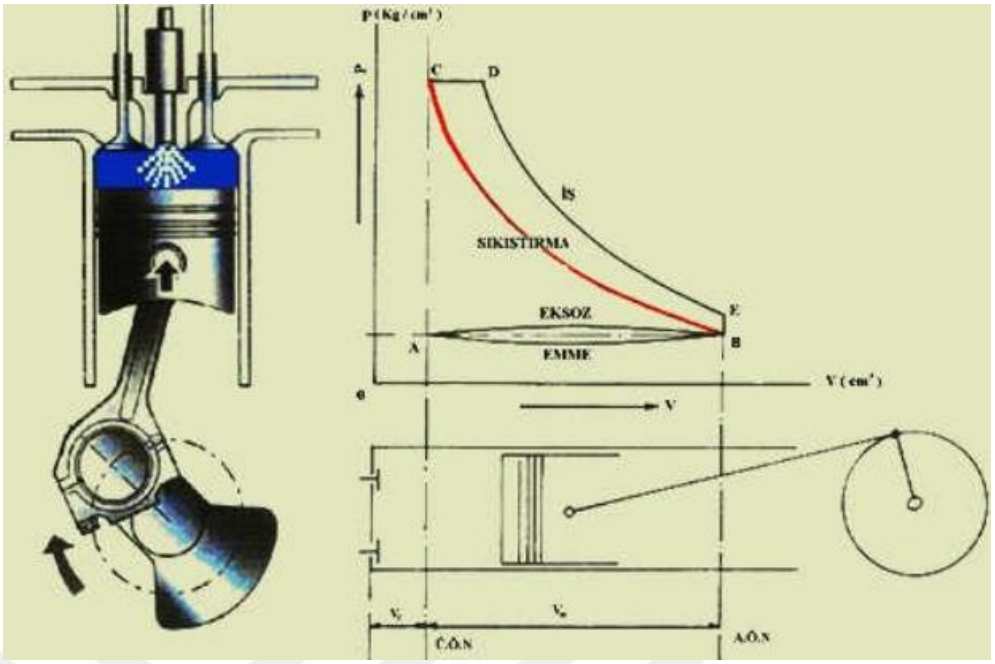
Dizel motorların dört zamanlı bir çalışma prensibi mevcuttur (Şekil 2.3.). Bu çevrim; emme zamanı (Şekil 2.4.), sıkıştırma (Şekil 2.5.), ateşleme (Şekil 2.6.) ve egzoz (Şekil 2.7.) şeklindedir.



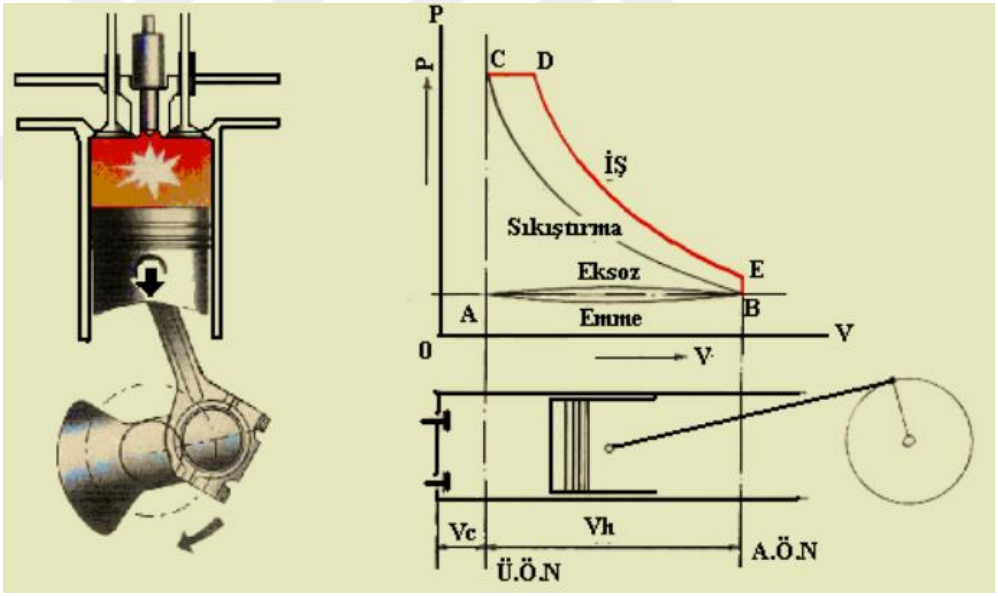
Şekil 2.3. Dizel motor çalışma prensibi (Anonim3, 2022)



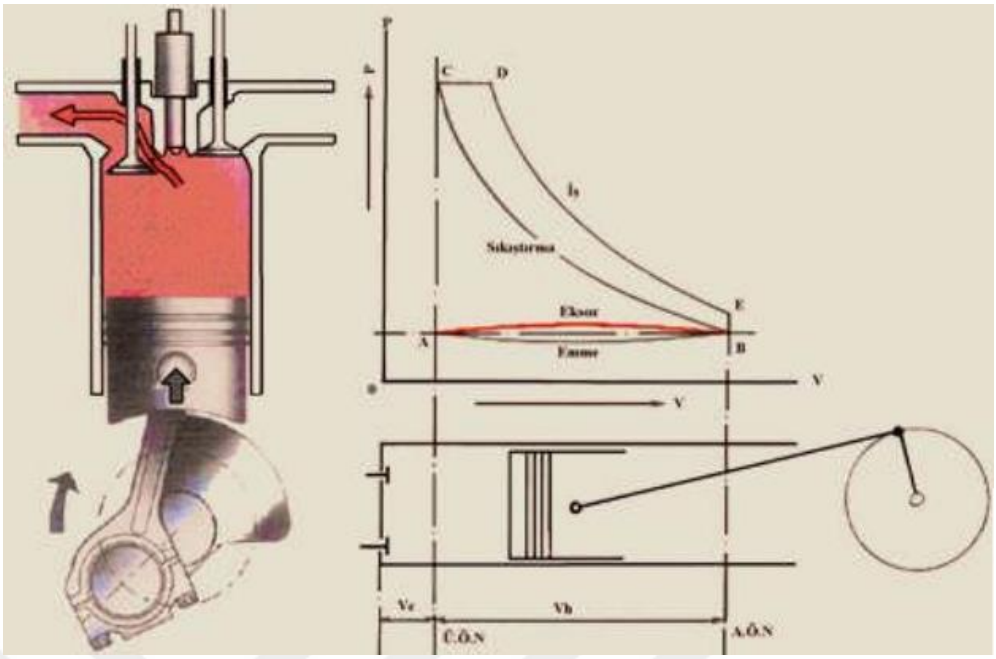
Şekil 2.4. Emme zamanı (Anonim2, 2022)



Şekil 2.5. Sıkıştırma zamanı (Anonim2, 2022)



Şekil 2.6. Ateşleme zamanı (Anonim2, 2022)



Şekil 2.7. Egzoz zamanı (Anonim2, 2022)

Kullanılacak dizel yakıtların aşağıdaki niteliklere sahip olması beklenmektedir.

- Uygun viskozitede olmalıdır.
- Yeterli buharlaşma enerjisine sahip olmalıdır.
- Vuruntuya karşı mukavemetli olmalıdır.
- Yakıt ve yanma ürünleri korozyona sebep olmamalıdır.
- Egzoz emisyonları az olmalıdır.
- Çinkoya karşı aktivitesi az olmalıdır.
- Akma noktası kullanım şartlarına uygun olmalı ve donmaya karşı dirençli olmalıdır.
- Düşük tutuşma noktasına sahip olmalıdır (Anonim3,2022).

2.2.1. Enjeksiyon sisteminin görevleri

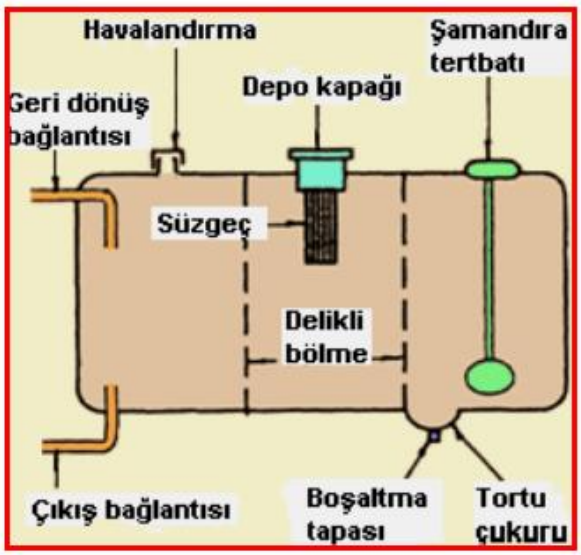
Dizel motorlarda yer alan enjeksiyon sisteminin görevleri aşağıdaki yer aldığı gibidir.

- Yakıtı depolayarak temizlenmiş olarak sisteme göndermek
- Püskürtülecek yakıtın basıncını artırmak.
- Motorun tüm devirlerinde ve çalışma yüklerinde yakıtı istenilen zamanda ve miktarda silindirlere püskürtmek.
- Püskürtmenin hızla başlayıp, bitmesini sağlamak
- Yanma odasının her tarafına düzgün bir şekilde dağılması amacıyla yakıtı küçük parça ve zerreler şeklinde (atomize olarak) püskürtmek.
- Yakıt sisteminde kullanılmayan fazla yakıtın depoya/filtreye geri gönderimini sağlamak.

2.2.2. Enjeksiyon sisteminin genel yapısı ve elemanları

Yakıt Deposu

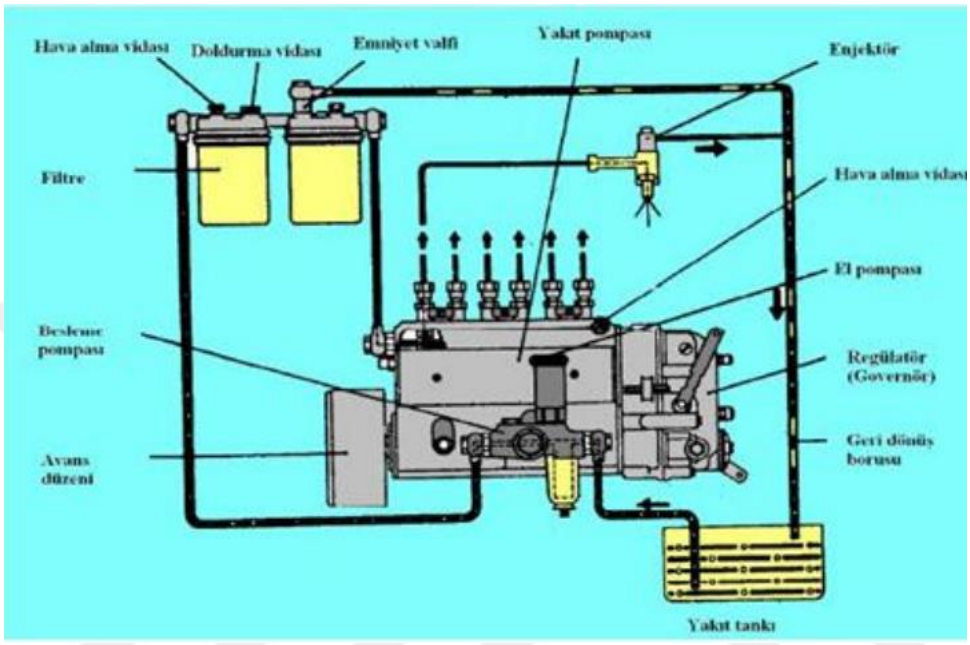
Motorun çalışabilmesi için ihtiyaç duyulan yakıtı depolamaktadır (Şekil 2.8.). Aracın büyüklüğüne bağlı olarak yakıt depolarının büyüklükleri de değişiklik göstermektedir. Normal bir taşıtın deposu yaklaşık 50 litre kapasiteye sahip olabilmektedir. Taşıtın menzili bir depo yakıtla alacağı yolu ifade etmekte olup ve menzil depo kapasitesine bağlıdır (Anonim2, 2022).



Şekil 2.8. Araç yakıt deposu (Anonim3, 2022)

Besleme Pompası

Yakıtı depodan çekerek alçak basınç boruları vasıtasıyla yakıt enjeksiyon pompasına gönderen pompa besleme pompası (Şekil 2.9.) olarak adlandırılmaktadır (Anonim3, 2022).



Şekil 2.9. Besleme pompası ile yakıt deposu (Anonim3, 2022)

Yakıt Boruları

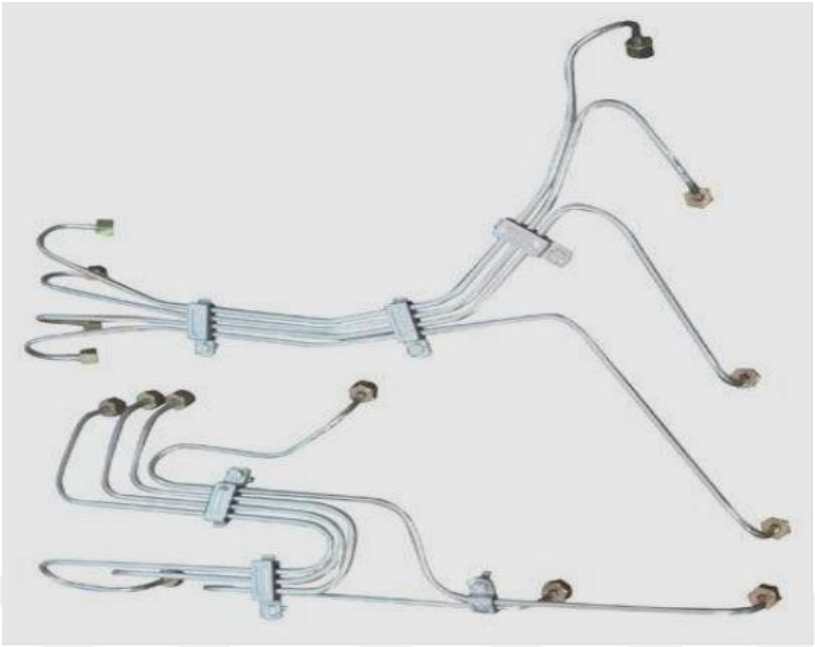
Yakıt iletimini sağlayan borulara yakıt boruları denilmektedir (Şekil 2.10.)

Alçak Basınç Boruları

Alçak basınç boruları, yakıtın depodan besleme pompası ve filtre vasıtasıyla yakıt pompasına kadar iletilmesine yarayan parçalardır. Bu borulardaki basıncın düşük olması nedeniyle alçak basınç boruları olarak adlandırılmaktadır (Anonim2, 2022).

Yüksek Basınç Boruları

Yüksek basınç boruları yakıt pompasından enjektörlere yüksek basınçlı yakıt iletilmesine yarayan parçalardır. Yüksek basınca mukavemetinin artırılması amacıyla çelik materyalden özel olarak üretilen cidarı kalın borular kullanılmaktadır (Anonim2, 2022).



Şekil 2.10. Yakıt boruları (Anonim3, 2022)

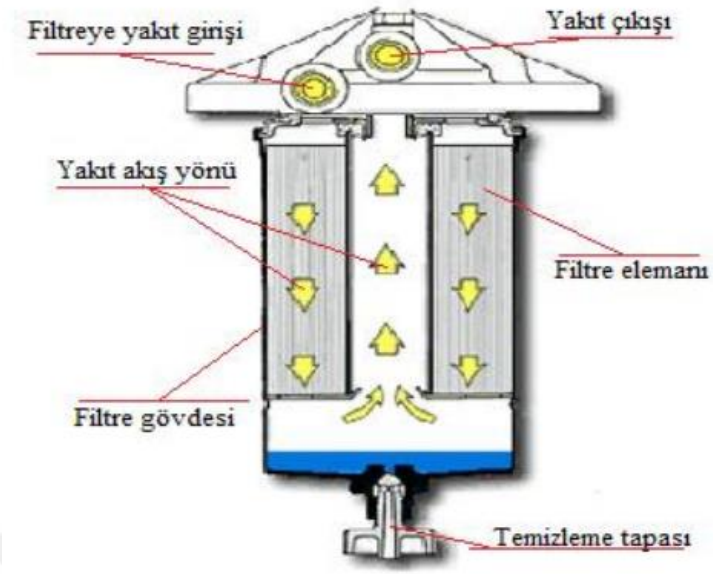
Geri Dönüş ve Sızıntı Boruları

Geri dönüş ve sızıntı boruları, yakıt sisteminde kullanılmayan yakıtın depoya taşımına yarayan parçalardır. Sistemin bu bölümünde yakıt basınç değeri düşük olduğu için geri dönüş ve sızıntı borularının yüksek basınçlara dayanım özelliğine sahip olmasına gerek yoktur (Anonim3, 2022)

Yakıt Filtreleri

Yakıt filtreleri, depodan gelen yakıtın yakıt pompasına girmeden evvel içerisindeki yabancı maddelerin süzerek sistemden uzaklaştırılmasını sağlamaktadır (Şekil 2.11.). Böylece sistemde olması muhtemel tıkanıklıklar engellenmektedir (Anonim2, 2022).

Kullanılan filtrenin kalitesi, enjeksiyon pompasının ve enjektörlerin ömrünü belirlediğinden filtreler büyük öneme sahiptir. Enjeksiyon pompasının basınç oluşturan parçaları ve enjektör memeleri, milimetrenin binde biri kadar bir hassasiyetle çalışmaktadır. Bu durum yakıt içerisinde bulunan çok küçük toz zerrelerinin bile hassas çalışan parçaların çalışmasını tehlikeye soktuğunun göstergesidir. Bundan dolayı yakıtın iyi bir şekilde ve yeterli filtrelenmemesi; pompa pistonları, basınç valfleri ve enjektör memelerinde hasara sebep olmaktadır (Anonim3, 2022).



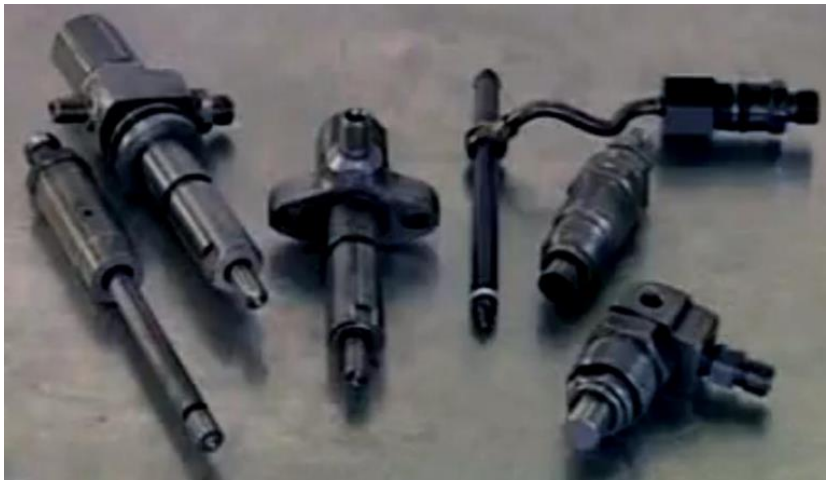
Şekil 2.11. Yakıt filtresi (Anonim3, 2022)

Yakıt Enjeksiyon Pompası

Yakıt enjeksiyon pompası düşük basınçtaki yakıtın basıncını 400–2000 bar gibi çok yüksek bir basınca artırarak, uygun zaman ve miktarda yüksek basınç boruları vasıtasıyla enjektörlere gönderilmesini sağlayan yakıt sistemi parçasıdır. Aynı zamanda taşıtın yük ve hız durumuna göre enjektörler gönderilecek yakıt miktarının ayarlanmasını da yakıt pompası gerçekleştirmektedir (Anonim2, 2022).

Enjektörler

Yakıt pompasının gönderdiği basınçlı yakıtı yanma odasına atomize şekilde püskürten yakıt sistemi parçaları enjektör olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.12.). Enjektörler çok çeşitli tip ve büyüklüklerde üretilebilmektedir. Sistemin en önemli elemanlarından olan enjektörler, filtrelerin zamanında değiştirilmemesi ve yakıt kalitesine bağlı olarak çok sık tıkanarak arızalara sebebiyet vermektedir (Anonim2, 2022).



Şekil 2.12. Enjektörler (Anonim3, 2022)

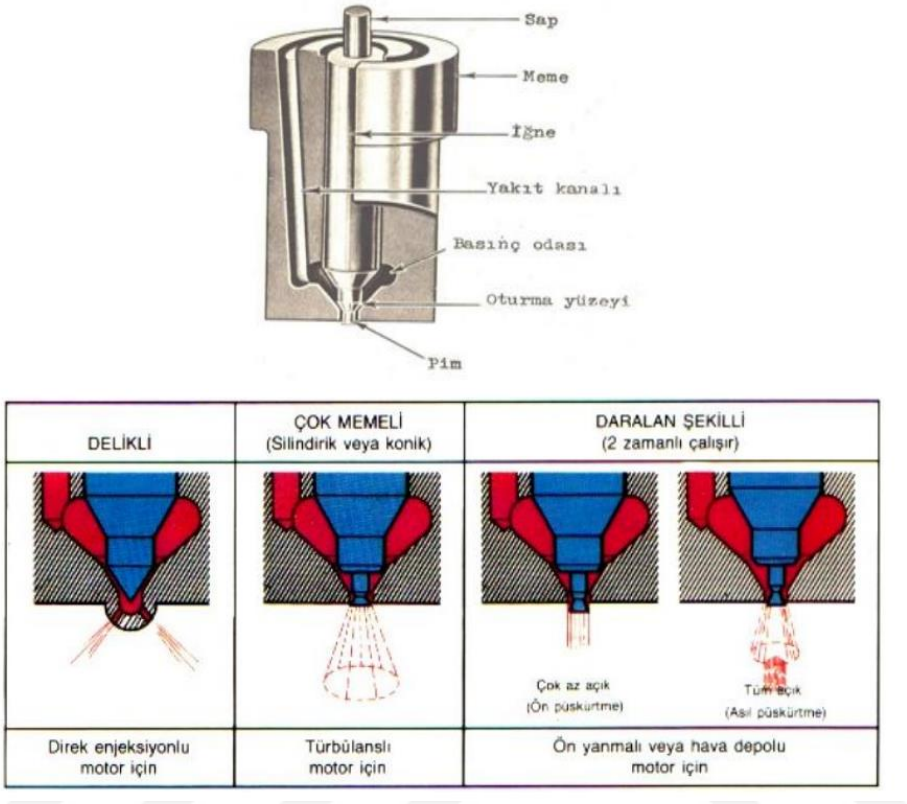
Enjektörlerin görevleri:

- Püskürtme için gereken basınç oluşuncaya dek yakıtı yanma odasından uzakta tutmak, gereken basınç oluştuğunda açılıp ani bir şekilde yakıtı yanma odasına püskürtmek,
- Püskürtme sonucunda enjektörün damlama yapmasını önlemek amacıyla hızlıca kesmek,
- Püskürtülecek yakıtı atomize hale getirmek,
- Yakıtı silindir içinde istenilen derinliğe püskürtmek,
- Yakıtı yanma odasının şekline uygun açıda püskürtmek
- Yüksek basınçlara karşı dirençli olmak,
- Yakıt sistemi ile yanma odası arasında sızdırmazlık sağlamak, (Anonim3, 2022)

Motor silindir kafasına doğrudan bağlanan enjektör, en iyi yanma için en uygun formda motora yakıtı püskürtmektedir. Bunu, yakıtı büyüklükleri 20 mikrondan 100 mikrona kadar değişiklik gösteren küçük damlacıklara ayırarak ve bu damlacıkları yanma odasına doğru püskürterek gerçekleştirmektedir (Şekil 2.13.).

Enjektör, enjektör memesi ve enjektör kütüğü olarak üzere iki temel parçadan oluşmaktadır. Enjektör memesi, kompresyon gazının püskürtme sona erdiğinde enjektörün içerisine girişini önlemek amacıyla hızlıca kapanmaktadır. Teknolojik olarak daha gelişmiş sistemlerde enjektör, motorin (yakıt) akış miktarını ölçen ve bu bilgiyi

elektronik olarak kontrol edilen pompaya gönderen bir sensör olarak görev yapmaktadır (Anonim3, 2022).



Şekil 2.13. *Bujiler (Anonim3, 2022)*

2.3. Kullanılan Malzeme Tipleri

Tek katmanlı yakıt hatları için üstün özellikleri nedeniyle Naylon 12, çok katmanlı bir borunun hem dış hem de iç katmanı için kullanılmaktadır. Bu nedenle, iyi bir tabaka yapışması elde etmek için (mümkünse yapışma arttırıcı olmadan) Naylon 12 ile birlikte ekstrüde edilebilen uygun bir bariyer tabakası malzemesinin bulunması gerekmektedir. Bu, ekstrüzyon malzemelerinin viskozitesinin ve işlem sıcaklığının Naylon 12'den çok fazla farklı olmaması gerektiği anlamına gelmektedir. Malzeme seçim sürecindeki ilk adım, çok katmanlı borularda kullanılabilecek farklı plastiklerin bariyer özelliklerini ve şişmesini belirlemektir. Her katman, belirli yakıt bileşenlerine göre farklı bariyer özelliklerine sahip olabilir ve bu nedenle, sonraki katman belirli yakıt bileşenlerine göre farklı bariyer özellikleriyle temas eder ve böylece sonraki katman, yakıtın farklı bir karışım oranıyla temas etmektedir. Bileşenler ayrıca, artan katman kalınlığı ile bariyer özelliği orantılı olarak artmaktadır (Ito ve ark., 2001).

Değişken boylardaki çift katmanlı yakıt boruların dış çapı ve et kalınlığı sırasıyla 8 ve 1 mm olacak şekilde kullanılmaktadır. Daha kalın bir dış PA12 katmanından ve daha ince bir iç ETFE katmanından oluşan iki katmanlı yapı mevcuttur. Kromatografi/kütle spektrometrisi ve kızılötesi spektroskopi analizi ile birleştirilmiş termogravimetriye göre, PA12 tabakası yaklaşık ağırlıkça %5 n-bütil benzensülfonamid (BBSA) plastikleştirici ve ağırlıkça %0.5 karbon siyahı; plastikleştiriciler, boruların esnekliğini ve düşük sıcaklıktaki darbe mukavemetini geliştirmek için yaygın olarak poliamidlere dahil edilmekte ve UV stabilizatörü ve pigment olarak az miktarda karbon siyahı kullanılmaktadır. İç ETFE katmanı ağırlıkça %20 karbon siyahı ile birleştirilmiş, bu da iç katmanı elektriksel olarak iletken hale getirerek yakıtta elektrostatik olarak başlatılan kıvılcım riskini azaltmıştır (Park 2006). PA12 katmanı boruya yüksek patlama mukavemeti, iyi esneklik ve yüksek ısı direnci gibi birincil özellikler sağlarken, ince iç ETFE katmanı iletken olmanın yanı sıra yüksek bir yakıt bariyeri sağlamaktadır (Wei ve ark., 2018).

2.3.1. Yakıt borularında kauçuk kullanımı

Polimer bazlı boruların ticarileştirilmesinden önce kauçuk, tüm borular için birincil kaynaktır. Kauçuk mükemmel esneklik ve iyi mekanik özellikler sağlamasına rağmen, zayıf kimyasal direnç ve daha da önemlisi geçirgenliğe karşı düşük direnç, otomotiv yakıt boruları olarak kauçuk kullanıldığında önemli risklere yol açtığı belirtilmiştir. Düşük geçirgenliğe sahip kauçuk boru, çeşitli teknikler kullanılarak geliştirilmiştir. Hortumun iç yüzeyine bir reçine tabakası (genellikle naylon) uygulamak veya farklı tipte kauçuklar kullanmak, yüksek geçirgenlik dirençli hortumlar geliştirmek için düşünülmüştür. Daha yüksek maliyetler ve naylon ve kauçuk arasındaki zayıf bağlanma, bu tür hortumların popüler olmamasına neden olduğu görülmüştür. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için reçine kaplı kauçuk borunun dış çevresine bir alüminyum, bakır şerit veya plastik bant tabakası sarılmıştır (Spurgat 1995). Tüp gibi imalatlar zor olup yakıtın reçineden nüfuz etmesi de gözlenmiştir. Kauçuk borunun daha da geliştirilmesinde, iç borunun dış yüzeyinde ince bir gümüş alaşımlı film kaplanmış olup daha sonra bir yapıştırıcı (izosiyanat, fenol reçinesi, klorlu kauçuk bazlı) kullanılarak bir kauçuk tabaka metal filme ısıyla kürlenmiştir (Yoshikawa ve ark., 1995). Metal film, önceki yaklaşımlardaki sarmadan farklı olarak kaplandığından, filmler geçirgenlik direncini kaybetmemiş ve

kauçuk boru, esnekliği ve mekanik özellikleri koruyabilmiştir. Na ve lamine kauçuk yapısı, mükemmel katmanlar arası bağlanma özellikleri sergileyen ve aynı zamanda ultra düşük geçirgenlik ve mükemmel bükülme özellikleri sağlayan florlu kauçuk katman üzerine bindirilmiş bir florlu kauçuk katmanı ve bir Teflon katmanı kullanılarak geliştirilmiştir (Plumley 1996). İç katman, bir floroviniliden ve heksafloropropilen kaplamasından oluşturulmuştur. İç katmana, iç katmanın bükülmesini veya dayanıklılığını etkilemeden floroelastomer ile mükemmel bir şekilde bağlanan bir Teflon kaplama (0,02–0,05 mm) eklenmiştir (Shifman 2007; Ries 1995). Teflon ve dış boru arasına başka bir bağlantı tabakası eklenmiştir (Smith ve ark., 2003). Dış boru sistemi, hibrit bir boruya giden naylon-12 gibi örgülü sentetik liflerden oluşan takviye edici tek veya çift katmandan oluşur. Borunun gelişimi anlatılsa da borunun özellikleri bildirilmemiştir (Jing ve ark., 2005).

2.3.2.Poliamidin yakıt borularında kullanımı

Poliamidler (PA), dengeli mekanik özellikleri ve hidrokarbonlara karşı engelleyici olabilmeleri nedeniyle yakıt hatlarında en yaygın kullanılan polimerlerdir (Wei ve ark., 2017). Ancak otomotiv yakıt sistemlerinde poliamid bazlı yakıt boruları ile dizel/biyodizel arasındaki uyumlulukla ilgili birtakım sorunlar mevcuttur (Wei ve ark., 2017; Kallio ve Hedeqvist. 2008; Kallio 2010; Kallio ve Nageye 2010). Yakıtlarla temas halinde, PA, hem boru esnekliğinde hem de düşük sıcaklıktaki darbe mukavemetinde azalmaya yol açan önemli plastikleştirici kaybı göstermektedir (Kallio ve ark., 2008). PA'nın monomerleri ve oligomerleri, yakıt nedeniyle çökelmeye ve nihayetinde enjektör/filtre tıkanmasına neden olabilmektedir (Kallio ve Nageye, 2010; Chernev ve Eder, 2013a; Chernev ve Eder, 2013b). PA ayrıca yüksek sıcaklıklarda dizel/biyodizele maruz kaldığında yoğun oksidasyona uğramakla birlikte borunun gevrekleşmesine neden olmaktadır (Wei ve ark., 2017; Nascimento ve Souza, 2016). Polimerin oksidasyonu, antioksidanların dahil edilmesiyle engellenmektedir. Antioksidanların yakıt tarafından ekstrakte edilebilmeleri nedeniyle bu strateji, yakıtla temas halindeki polimerler için her zaman işe yaramayabilir (Djouani ve ark., 2012; Richaud ve ark., 2015). Biyodizeldeki polar bileşiklerin (örneğin su, metanol ve formik asit gibi yakıt oksidasyon ürünleri) polimer tarafından kolayca emilmesi antioksidanların ekstraksiyonunu ve dolayısıyla oksidasyonu teşvik etmekte olup, bu durumda biyodizel içeren yakıtlara maruz kalan

PA'nın oksidasyonu daha da kötü olabilmektedir (Djouani ve ark., 2012; Richaud ve ark., 2015; Wei ve ark., 2018).

Flepp ve Hoffman (2003) patentlerinde, yakıt borusu uygulamaları için poliamidden yapılmış iç ve dış katmanlar ile etilen/vinil alkolden yapılmış bir ara katman kullanılarak, yakıtlardaki alkollere karşı özel olarak dirençli çok katmanlı bir termoplastik hibrit boru geliştirilmişlerdir. Poliamid boruya gerekli mekanik özellikleri sağlayabilse de, özellikle alkollü yakıtlara karşı zayıf geçirgenlik direnci, bir ara tabakaya sahip olmayı gerekli kılmıştır. Ara katman, poliamidlerden oluşan bir yapışmayı teşvik eden katman ve bir uyumlulaştırıcı kullanılarak dış ve iç katmanlara bağlanmıştır (Rajasekar ve ark., 2016).

Naylon 12 reçineleri, 25 yılı aşkın bir süredir otomobillerdeki sıvı yakıt hatları için kullanılmaktadır. Bu reçine, şasi ortamında ve normal yakıtlarla temas halinde tek duvarlı borularda uygunluğunu kanıtlamıştır. Yeni yakıtların (çoğunlukla alkol içerenler) geliştirilmesi ve çeşitli devlet kurumları tarafından yeni hidrokarbon emisyon standartlarının oluşturulması bunu değiştirmiştir. Değişen duruma yanıt olarak, başta geçirgenlik direnci olmak üzere naylon 12 borunun özelliklerini iyileştirmek için çok katmanlı boru sistemi geliştirilmiştir. Metal yakıt hatları ile karşılaştırıldığında, Naylon 12 boru sisteminin iki ana avantajı yüksek korozyon direnci ve düşük ağırlıklı olmasıdır. Naylon 12 hatlarının esnekliği de bu tür boruların taşınmasında ve montajı açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle yakıt sisteminin bir kısmı esnek olmalıdır. Bir yakıt sisteminde ortaya çıkabilecek hidrokarbon emisyonları için, metal hatların Naylon 12 boruya göre bir avantajı bulunmaktadır; hidrokarbonların çelik borunun duvarından geçme hızı sıfırdır. Naylon 12 boru duvarından az miktarda geçirgenlik olmakla beraber bu durumun, aynı zamanda bir yakıt sisteminin parçası olarak da kullanılabilen geleneksel elastomer borularda meydana gelebilecek geçirgenlik kayıplarından önemli ölçüde daha az olduğu belirtilmiştir (Hopf ve ark., 1994).

Naylon 12'nin sayısız özelliği, onu özellikle otomotiv boruları için uygun hale getirmektedir. Malzemenin, fiziksel özelliklerinin nemdeki değişikliklerle etkin bir şekilde sabit kalmasına izin veren düşük su emmesi vardır. Aşınma direnci, şasi altında oluşabilecek sürtünme ve sürtünmelere dayanmasına yardımcı olmakta ve düşük yoğunluğu, araç ağırlığının azalmasına katkıda bulunmaktadır. Naylon 12 ayrıca,

özellikle yakıt hatlarında önemli olan, sürünme altında yüksek mukavemet ve stres çatlama direnci sergilemektedir. Naylon 6, yakıt hatları için test edilmiştir, ancak galvanizli parçalarla temas ettiğinde veya yol tuzu çözeltisine maruz kaldığında gerilim çatlamasına maruz kalmaktadır. Naylon 12 bileşikleri ise bu koşullar altında stres çatlamasına karşı iyi bir dirence sahiptir. Naylon 12 ayrıca hava koşullarına ve sıcak havaya karşı mükemmel direnç, uygun düşük sıcaklıkta darbe dayanımı ve kimyasal direnç göstermektedir. Sentetik kauçuk borular, yakıt sistemleri için kullanıldığında ve bakır iyonlarının varlığında peroksit içeren yakıtlar tarafından yok edilebilir. Naylon 12'den yapılan borular, çeşitli otomobil üreticilerinin testlerinden geçmiştir ve şimdi bu alanda kullanılmaktadır (Anonim1, 2022).

Polimerik sistem kullanılarak yapılan tipik bir yakıt borusu, kullanılan polimer sisteme, yakıt borusunun açılacağı araç tipine ve üreticiye bağlı olarak üç ila yedi katmandan oluşmaktadır. Yakıt borularının daha yüksek basınçlarda çalışması için gerekli özel gereksinimleri olduğundan, çok katmanlı yakıt sistemleri esas olarak polibütilentereftalat (PBT), polibütilenaftalat (PBN), polivinilidenflorür (PVDF), etilenperfloroetilenpropen kopolimer (EFEP), etilentetrafloroetilenkopolimer (ETFE), polifenilen sülfür (PPS) ve etilen-vinilalkolkopolimer (EVOH) gibi bariyer malzemeleriyle PA 12 kullanılarak geliştirilmiştir. Ayrıca, statik birikimi azaltmak için iletken katmanlar olarak iletken PA12, EFFE ve EFEP kullanılmaktadır. Flor bazlı malzemeler iyi özellikler sağlamasına rağmen, bu malzemeler pahalı olmakla birlikte aracın ağırlığını artıran yüksek yoğunluğa sahiptir ve PA bazlı borularla kullanım için ideal değildir (Rajasekar ve ark., 2016).

Konnektörler – Naylon 12 yakıt hatları genellikle yakıt sisteminin başka bir parçasına, konnektör adı verilen, boruya çakılan kademeli veya çıkıntılı metal veya plastik bağlantı elemanları yerleştirilerek bağlanmaktadır. Takılan bileşenin tasarımı, bağlantının kalitesini belirlemede anahtar faktördür. Naylon 12, sürünme direnci ve tutma özellikleriyle bağlantının kalitesine katkıda bulunmaktadır. Naylon 12 reçineleri, uzun vadede eklenen bileşen üzerinde iyi bir tutuş sağlayabilmekte ve Naylon 12 tüp uzatıldığında çapı küçülmektedir. Bu, boruya çekme yönünde bir kuvvet uygulandığında, borunun uzadığı ve yerleştirilen elemana daha büyük bir kavrama kuvveti uyguladığı anlamına gelmektedir (Gray ve Hopf, 1988).

2.3.3. Fluoropolimerlerin kullanımı

Floropolimerler, iyi kimyasal ve termal dirençlere sahiptir (Drobny 2007; Hedenqvist ve ark., 2003). Ek olarak, bu ürünler yakıt için iyi engelleyiciler olup, bu nedenle poliviniliden florür (PVDF) ve polietilen-ko-tetrafloroetilen (ETFE) gibi floropolimerlerin bazı PA bazlı çok katmanlı yakıt borularında bariyer katmanları olarak kullanılmaktadır (Kallio ve Hedeqvist. 2008). Esasen düşük molar kütleli türlerden (örneğin, plastikleştiriciler ve monomerler/oligomerler) arındırılmışlardır ve bu, yakıtla doğrudan temas halinde kullanıldıklarında değişim süreçlerinde daha az sorun anlamına gelmektedir. Bu nedenle, floropolimerler dizel/biyodizel yakıt boru sistemlerinde iç bariyer tabakaları olarak potansiyel göstermektedir. Bununla birlikte, floropolimerler ve dizel/biyodizel yakıtı arasındaki etkileşimlerin detayları hala bilinmemektedir (Wei ve ark., 2018).

Polimerlerin düşük geçirgenliği ve yüksek mekanik özelliklerinden dolayı floropolimerlerin yakıt taşımada kullanım için ideal olduğu ileri sürülmektedir. Tipik olarak, çok katmanlı boruları geliştirmek için diğer malzemelerle birlikte birkaç ince floropolimer katmanı kullanılmaktadır. Bununla birlikte, floropolimerler kendi aralarında ve ayrıca diğer polimerlerle zayıf bir bağa sahiptir. Floropolimer bazlı hortumların özelliklerini geliştirmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Floropolimerler ve floropolimer olmayanların bir kombinasyonu, yüzeyin işlenmesi, diğer polimerlerle harmanlanması veya polar işlevsellik kazandırmak için floropolimerlerin aşılanması olası şanslar olarak incelenmiştir (Jing ve ark., 2005).

2.4.Yakıt Borularının Şekillendirilmesi

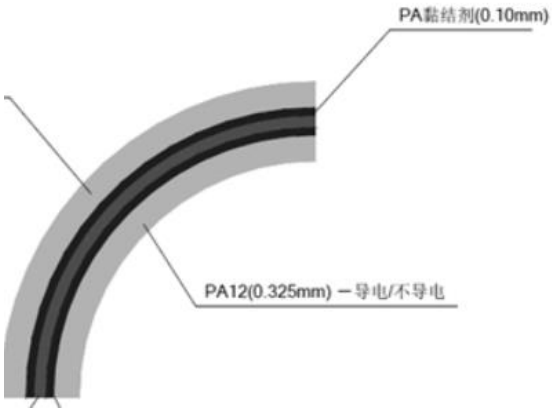
2.4.1. Yakıt borularının imalatı

Yakıt boruları tek katmanlı veya çok katmanlı olarak imal edilebilir. İmalat yöntemi genel olarak ekstrüzyon makinalarıdır. Son yıllarda otomotiv yakıt sistemlerinde PA malzemeleriyle çok katmanlı yakıt boruları tercih edilmektedir. Bu borular yüksek performansları ve emisyon salınımlarındaki verimlilikleri ile uluslararası alanda tercih sebebi olmaktadırlar (Şekil 2.14.).



Şekil 2.14. Ekstrüzyon hattı örneği (Anonim6, 2022)

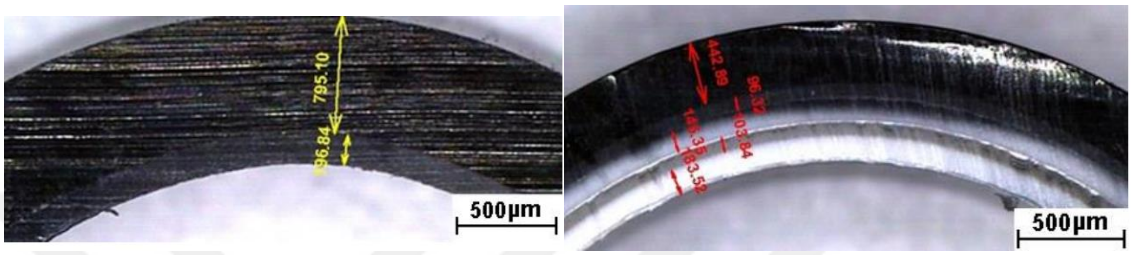
Çok katmanlı yakıt boruları 2, 3, 4 veya daha fazlı katmandan oluşabilirler ve boru dış çapı 6 mm, 8 mm, 10 mm veya istenen daha büyük çap değerinde imal edilebilirler. Katmanlar arası yapıştırıcı malzeme olarak PA6 kullanılabilmektedir (Şekil 2.15.).



Şekil 2.15. Çok katmanlı yakıt borusu ve PA ara yapıştırıcı (anonim7, 2022)

Aşağıdaki şekilde (Şekil 2.16.) 2 katmanlı PA12 borunun katman kalınları gösterilmektedir. Alt katmanda 0,2 mm kalınlığa sahip PA9T malzemesi, üst katmanda ise 0,8 mm kalınlığa sahip PA12 malzemesi mevcuttur. Yapılan üretim sonrası malzeme katlarının görüntüsü mikroskop altında incelenmiştir. Diğer bir örnek olarak, 5 katmanlı yakıt borusunda kullanılan malzemeler 0,2 mm kalınlığında PA612, 0,2 mm yapıştırıcı

ara kat PA6, 0,15 mm kalınlığında EVOH, 0,2 mm yapıştırıcı ara kat PA6 ve 0,45 mm kalınlığında PA12 kullanılmıştır. 2 katlı PA boru üretimi sırasında borunun alt katının ekstrüzyon sıcaklığı 300±30°C iken, borunun üst katının ekstrüzyon üretim sıcaklığı ise 200±20°C olacak şekilde uygulanmıştır. 5 katlı PA boru üretimi sırasında ise bütün katlardaki malzemeler için 200±40°C ekstrüzyon üretim sıcaklığı uygulanmıştır (Kurnaz 2019).



Şekil 2.16. İki katmanlı ve beş katmanlı yakıt borusu örnekleri

2.4.2. Sıcak hava fırınları

Düz haldeki yakıt boruları kalıcı form verme işlemi için kalıp gözlerine yerleştirilmekte ve ardından sıcak hava fırınına gönderilmektedir. Sıcak hava fırınlarında, rezistanslar yardımıyla ortam havası ısıtılır, ısıtma sonrası parçalar duşlama ile şoklanmakta ve form kalıcı hale gelmiş olmaktadır. Kullanılan malzemenin türü, boyu, çapı, katman sayısı, formu gibi etkenler, proses parametre ayarlarıyla optimum hale getirilmektedir. Bu parametreler maksimum ve minimum ortam sıcaklığı, ısıtma süresi, duşlama suyu sıcaklığı, duşlama süresi, parça sürme hızı şeklindedir.

2.5.Analiz ve Modelleme Programları

2.5.1. Sonlu elemanlar analizi (FEM)

Sonlu elemanlar yöntemi, çözümü zaman alan problemlerin, daha kolay ve az sürede çözülebilmesi için bu problemlere eşdeğer aynı zamanda daha basit hale getirilmiş problemlerle çözülmesi olarak tanımlanabilmektedir. Basitleştirmeye gidilmesi nedeniyle, tam olarak doğru sonuç yerine yaklaşık sonuçlar elde edilmektedir. Günümüz teknolojisiyle, sonlu elemanlar metotları bilgisayarlarda yer alan gelişmiş programlara entegre edilmiş olup, bunun sonunda hemen her problem için istenilen ölçüler arasında yaklaşık sonuçlar elde edilebilmektedir (Bedir 2007).

Bu yöntemin üç temel özelliği bulunmaktadır. İlk olarak, geometrik bakımından sabit olmayan çözüm alanları sonlu elemanlar yöntemiyle basit alt kısımlara ayrılmaktadır. Ardından her kısımdaki elemanın, sürekli fonksiyonları, cebirsel polinomları lineer kombinasyonu bakımından oluşturulabileceği varsayılmaktadır. Son olarak istenilen hassasiyette sonuçların bulunabilmesi için yeterli miktarda düğüm noktalarının oluşturulması gerekmektedir (Mamalis ve ark., 1997). Simülasyonların çözümünde önemli diğer bir etken ise gerçek geometrileri temsil eden elemanların boyutunun belirlenmesidir çünkü gerçek sistemi temsil için kullanılan eleman miktarının fazlalaşması çözülecek diferansiyel denklem miktarını da fazlalaştıracağından bu durum beraberinde çözüm süresinin de uzamasına yol açmaktadır. Yapılan çalışmalara bakıldığında eleman boyutunun azaltılması çözüm hassasiyeti bakımından çoğunlukla olumlu sonuçlar ortaya çıkarmaktadır (Parthasarathy ve Kodiyalam, 1991; Crawford ve ark., 2003; Arslan, 2021).

Sonlu elemanlar metodunda çözüm yapılacak eleman, sonlu miktarda ideal elemanlara ayrılmaktadır. Bu elemanların birbirleriyle arasındaki bağlantı düğüm noktaları vasıtasıyla sağlanmaktadır. Problemin çözümü mevcut olan düğümlerin kendi içerisinde tanımlanmaktadır. Sonlu miktarda oluşan bu eleman ve düğümler, ağ yapısı sistemini (mesh) oluşturmaktadır (Arslan 2021).

Sonlu elemanlarda kullanılan ağ yapısı, gerçek elamanın özelliklerinde bulunma ihtimali olan rijit (şekil değiştirmeyen) olmayı veya rijit olmama (şekil değiştiren) durumunu bizlere yansıtabilmektedir. Rijit özelliğe sahip olan elemanların ağ yapısı, olmayana göre farklılık göstermektedir. Rijit elemanın ağ yapısı, sadece malzemenin şekil özelliğini bize göstermektedir. Rijit olmayan elemanların ağ yapısı ise malzemenin yalnız şekli özelliğini değil bunun yanında malzeme özelliklerini de temsil etmektedir. Ağ yapısında bulunan her bir sonlu eleman ve düğümler birer fonksiyonu ifade ettiğinden bu fonksiyonların sonucu iterasyonlar yardımıyla bulunmaktadır. Ağ yapısında bulunan elemanların şekli ne ölçüde küçük yapılırsa eleman sayısı da bununla beraber artacaktır buda problemin bulunması için yapılan iterasyon sayısını artıracaktır. İterasyon sayısının artması da çözümün hassasiyetini artıracaktır. Fakat işlem süresini uzatmaktadır. Eğer ağ yapısında bulunan elemanların şekli büyütülürse ağ yapısında bulunan eleman sayısı da

azalmaktadır. Bu işlemenin sonucu olarak da problemin sonuçlanması için yapılması gereken iterasyon miktarı ve bulunan çözümün hassasiyeti azalmaktadır. İşlem süresi de iterasyon miktarıyla orantılı olduğu için bu sürede düşmektedir. Sonlu elemanlar metoduyla oluşturulan analizlerde ağ yapısında bulunan elemanların miktarı en uygun seviyede olması sağlanarak makul bir sürede ve iyi bir hassasiyete sahip veriler bulunmak istenmektedir (Yıldız, 2017; Arslan 2021).

Sonlu elemanlar analizinde hesaplama parametreleri bakımından önemli bir kriter de seçili elemanın plastik davranışı modellemeyi sağlayan plastisite modelinin seçimidir. Plastisite modellerinin çözüm basamakları birbirinden farklı olduğu için çözüm süresini etkilenmektedir. Plastisite modelleri çoğunlukla kendi içlerinde yapmış oldukları kabuller ölçüsünde gruplandırılmaktadırlar. Bu gruplar, izotropik malzeme-izotropik pekleşme, anizotropik malzeme-izotropik pekleşme ve anizotropik malzeme-kinematik pekleşme olarak isimlendirilmektedir. Yapılan çalışma kapsamında izotropik malzeme-izotropik pekleşme grubundan Holloman denklemi (Holloman, 1945). Anizotropik malzeme-izotropik pekleşme grubundan Hill-48 (Hill, 1948) ve Barlat-89 (Barlat ve Lian, 1989) plastisite modelleri ve anizotropik malzeme-kinematik pekleşme grubundan Yoshida-Uemori (Yoshida ve Uemori, 2002). Plastisite modelleri bulunmaktadır (Arslan 2021).

Sonlu elemanlar yönteminin temel prensibi, ilk olarak tek elemana ait sistem bilgilerini içeren denklemlerin çıkartılark bu denklemleri tüm sistemi temsil edecek biçimde oluşturulan bütün denklemlerle beraber birleştirilip tüm sisteme içinde barındıran lineer denklem takımı oluşturulmaktadır. Bir elemana ait denklemlerin çıkartılmasında farklı metotlar kullanılmaktadır. (Sarıkanat, 2007; Arslan 2021).

Sonlu elemanlar yönteminin kullanımındaki esas nedenler aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- Maliyeti azaltmak ve zamandan tasarruf etmek
- Hatasız ürün çıkarabilmek
- Prototip test miktarlarını minimize etmek
- Prototip aşamadaki uygun olmayan ürünlerin analizlerinin simülasyonu
- Ürün kalitesinin iyileştirilmesi ve mükemmelleştirilmesi
- Güvenilirliği artırmak (Liu, 2003; Saraç, 2021)

Sonlu elemanlar yönteminin mühendislikteki uygulama alanları şöyledir:

- Makine Mühendisliği
- Havacılık ve Uzay Mühendisliği
- Otomobil Mühendisliği
- İnşaat Mühendisliği
- Yapısal Analiz (Statik, dinamik, doğrusal ve doğrusal olmayan)
- Termal Analizler
- Akış Analizleri
- Elektromanyetik Analizler
- Jeomekanik Analizler
- Biyomekanik Analizler (Saraç, 2021)

2.5.2. Solidworks

SolidWorks yenilikçi, basit kullanıma sahip, Windows için hazırlanmış 3 boyutlu tasarım programıdır. Her türlü makine, tesis, ürün tasarımında Windows'un kolaylıklarını kullanarak hızlı bir biçimde çizim yapma olanağı sağlamaktadır.
SolidWorks Animator, SolidWorks'ün içinde çalışan bir animasyon programı olup, SolidWorks'e entegre edilmiştir. Dosya transferi ya da dosya dönüştürülmesine gerek yoktur. Hızlı ve kolay bir şekilde SolidWorks ortamında animasyonlar oluşturmaktadır. Bunlar; dinamik olarak montaj hareketi, montajları açma/kapama animasyonları, döndürülebilir animasyonlar olabilmektedir. Bu animasyonlar istenirse AVI formatında kaydedilebilmekte olup, böylece Windows yüklü her bilgisayarda seyredilebilmektedir.

SolidWorks ile tamamen uyumlu dizayn analiz yazılımıdır. Bu yazılım sayesinde parçaları, birleşik modelleri ve metal levha modelleri yapısal ve ısıl etkilere karşı kısa sürede analiz edilebilmektedir. Bu modül sayesinde Solidworks'te tasarlanan bir parça internet ya da intranet yoluyla başka şirketlerle, karşı tarafta Solidworks yazılımı olmadan, paylaşılabilmektedir (Anonim3, 2022).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tez kapsamında yakıt boruları için PA12 malzemeleri materyal olarak kullanılmış olup, Solidworks programı kullanılarak müşterinin paylaştığı yüzey datadan üç boyutlu model elde edilmiştir ve sonlu elemanlar yönetimiyle elde edilen modele termal ve statik analizler yapılmıştır. Elde edilen modellerin sıcak hava fırınları ile fiziki olarak üretilmiştir, proses sonrası ürün tersine mühendislik ile taranmıştır ve elde edilen datalar çakıştırılarak ürün doğrulaması yapılmıştır.

3.1. Sonlu Elemanlar Metodu

Bir mühendislik sistemini analiz etmek için bu sistemin matematiksel modelinin kurulması ve çözümlenmesi gerekmektedir. Çözümü basitleştirebilmek adına bazı kabuller yapılır, sınır şartlarına göre ve diferansiyel denklemlerden oluşan matematiksel model kurulmaktadır. Karşılaşılan karmaşık sistemlerin tanımlanmasında kullanılan ve çözülmesi hayli zor olan bu denklemlerin, yüksek performanslı bilgisayarlar yardımıyla çözülmesi mümkün hale gelmektedir (Varlık 2017).

Problemin çözülmesinde, iyi tanımlanmış sonlu sayıda eleman kullanarak yeterli bir model elde edilebilmektedir. Böyle problemler sonlu olarak adlandırılmaktadır. Bazı problemler matematiksel sonsuz küçük kurgusuyla tanımlanabilmektedir. Bu tanım diferansiyel denklemlere ya da sonsuz sayıda eleman kullanımına götürmektedir. Bu sistemler sürekli olarak vasıflandırılmaktadır. Gerçekte elastik sürekli ortamda elemanlar arası bağlantı noktalarının sayısı sonsuzdur.

Sonlu elemanlar yöntemiyle bu sonsuz sayıdaki bağlantı sonlu bir sayıya indirgenmekte olup, cisim sanki sadece bu noktalardan birbiriyle bağlanmış gibi düşünülmektedir. Sonlu sayıdaki bu bağlantı noktaları ne kadar çoğaltılırsa bu yöntem ile yapılan çözümdeki hata oranı o kadar küçülmektedir. Öte yandan bu sayının çok fazla artması da sayısal çözümlemede büyük zorluk meydana getirmektedir. Bilgisayarlar sayesinde bu zorluk bir miktar giderilmiştir.

Sonlu elemanlar yönteminin önemli bir özelliği, tüm problemi temsil etmek üzere elemanları toplamadan evvel, her bir eleman için ayrı formülün kullanılmasıdır. Eğer bir gerilme analizi problemi ile uğraşılıyor ise her bir elemana etki eden dış kuvvetler ile elemanın düğüm noktalarının, yer değiştirme bağıntıları bulunduğunda tüm sistem çözülmüş olup, bu şekilde kompleks bir problem oldukça basit bir probleme dönüştürülebilmektedir.

Kullanılan yaklaşım farketmeksizin sonlu eleman yöntemiyle problem çözülmesinde aşağıdaki yol izlenir;

a) Sürekli ortamın (cismin) hayali çizgilerle ya da yüzeylerle elemanlara bölünmesi ve elemanların geometrisi ortamın fiziki yapısına uygun seçilmelidir.

b) Komşu elemanlar birbirleriyle belli sayıda düğüm noktaları ile bağlanmış kabul edilir. Bu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri basit yapıların analizinde olduğu gibi problemin bilinmeyen ana parametreleridir.

c) Her bir sonlu elemanın yer değiştirmesini tanımlamak için düğüm noktalarının yer değiştirmeleri cinsinden fonksiyonlar seçilir (genelde bir polinomdur). Polinomun derecesi elemana konulan düğüm sayısına bağlıdır.

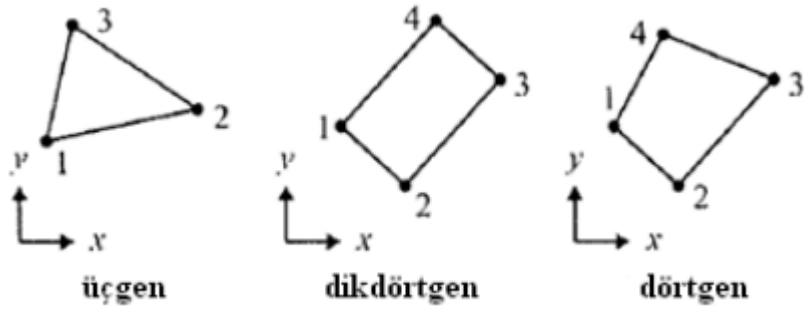
d) Elemanlar ve yer değiştirme fonksiyonları seçildikten sonra her bir elemanın özelliklerini ifade eden matris denklemleri teşkil edilebilir. Bunun için yukarıda anlatılan dört yaklaşımdan biri kullanılmaktadır (Dilli 2006).

Problemi elemanlara bölerken dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da problemin fiziğine uygun elaman tipi seçmektir. Bu elemanlar bir boyutlu çizgisel elemanlar (Şekil 3.1.), iki boyutlu yüzeysel elemanlar (Şekil 3.2.), üç boyutlu hacimsel elemanlar (Şekil 3.3.) şeklinde olabilirler. Bu eleman tiplerinden yaygın olarak kullanılanları aşağıda gösterilmiştir (Varlık, 2017).

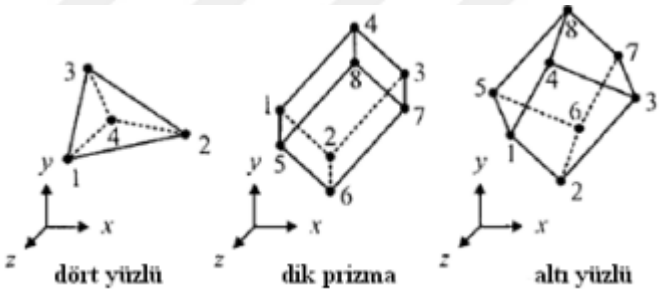
Daha önce de belirtildiği üzere, elemanların sınırlarında bulunan ve ona komşu elemanla ortak olarak kullandıkları noktalara düğüm noktaları denir. Düğüm noktaları, uzayda sistemin koordinatlarını tanımlarlar. Eleman denklemlerinden oluşan matris sisteminde düğüm noktalarındaki bilinmeyenler alan değişkenlerini temsil eder. Düğüm noktasındaki alan değişkenleri elemanın serbestlik derecesi (Şekil 3.4.) olarak da tanımlanır (Varlık, 2017).



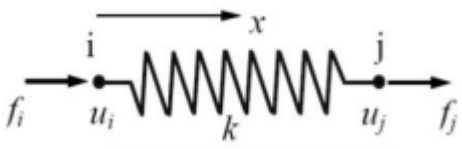
Şekil 3.1. Çizgi elemanlar (Varlık 2017)



Şekil 3.2. Yüzey elemanlar (Varlık 2017)



Şekil 3.3. Hacim elemanlar (Varlık 2017)



Şekil 3.4. Doğrusal yayın serbest cisim diyagramı (Tursun 2019)

Burada kuvvet yer değiştirme ilişkisi aşağıdaki denklemle verilmiştir. (Denklem 3.1,3.2,3.3,3.4).

$$F = k.\ \Delta u \tag{3.1}$$

F: kuvvet

$\Delta u = ui - uj$: yer değiştirme

K: Global direngenlik matrisi

u: Bilinmeyen vektörü

$$fi = -F = -k\ (\ uj - ui\ ) = k.ui - k.\ uj \tag{3.2}$$

$$fj = F = k\ (\ uj - ui\ ) = -\ k.\ ui + k.uj \tag{3.3}$$

$$Ku = F \tag{3.4}$$

Katı cisimler mekaniği kapsamında, birim alana etkiyen kuvvet gerilme olarak tanımlanır. Kuvvet kesite dik ise ve boy değişimlerine yol açıyor ise normal gerilme, açısal değişimlere yol açıyor ise kayma gerilmesi olarak isimlendirilir. Pozitif işaretli normal gerilme çekme, negatif işaretli normal gerilme ise basma gerilmesidir (Varlık 2017).

Gerilmenin birden fazla tanımı vardır;

- Mühendislik gerilmesi; deformasyona uğramamış şekildeki birim alana düşen kuvvet.
- Gerçek gerilme; deformasyona uğramış şekildeki, yani kuvvetin o andaki kesit alanına bölünerek elde edilen gerilme değeri.

Sadece küçük şekil değiştirmelerin olduğu problemlerde mühendislik eğrisi ve gerçek eğri birbirine çok yakın olduğundan mühendislik gerilmesi ve gerinmesi değerleri ile çalışmak yeterlidir (Denklem 3.5, 3.6, 3.7). Fakat büyük şekil değiştirmelerin olduğu, genel anlamda form verme problemlerinin analizinde gerçek gerilme ve gerinme değerleri önem kazanmaktadır (Varlık, 2017).

Mühendislik gerilmesi;

$$\sigma = F\ /\ A_0 \tag{3.5}$$

Gerçek gerilme;

$$A_0\ l_0 = A.l\ ,\quad A = A_0\ .\ l_0\ /\ l \tag{3.6}$$

$$\sigma_g = F / A = F.l / A_0 l_0 = \sigma.(1+\varepsilon) \quad (3.7)$$

Yük altındaki bir malzemenin, yük uygulanmadan önceki durumuna kıyasla şekil değiştirme durumuna gerinme (strain) denir. Gerinmenin matematiksel olarak aşağıdaki gibi iki tanımı vardır;

- Mühendislik gerinmesi; malzemenin boyundaki değişimin ilk boyuna oranıdır (Denklem 3.8).
- Gerçek gerinme; logaritmik gerinme değeridir. Deformasyon süresince değişen gerinme değerlerinin integrali alınarak bulunur (Denklem 3.9).

Mühendislik gerinmesi;

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 = (l - l_0) / l_0 = (l / l_0) - 1 \quad (3.8.)$$

Gerçek gerinme;

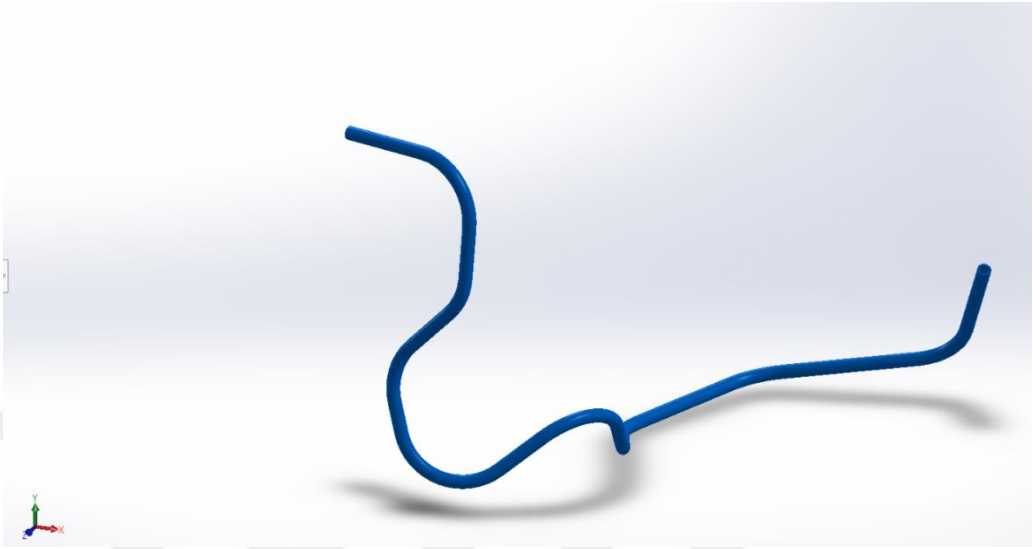
$$d\varepsilon_g = dl / l , \quad \varepsilon_g = \ln (l / l_0) = \ln(\varepsilon + 1) \quad (3.9)$$

3.2. CAD Modelin Oluşturulması

Modeli oluşturulan yakıt borusu PA12 malzemesine sahip olmakla birlikte, her katmanında aynı PA12 malzemesinin bulunduğu farklı kalınlıklardaki 3 katmandan oluşmaktadır. Boru iletken değildir. Dış çapı 8mm ve boru et kalınlığı 1 mm şeklindedir. Teorik boru boy uzunluğu 813 mm'dir.

Tez kapsamında kullanılan yakıt borusunun datası iki farklı aşama ile ortaya konmuştur. Birincisi, mevcut OEM müşterisi tarafından dış çapı belli ve yüzey data olacak şekilde paylaşılmıştır. Bu dataya göre, boru et kalınlığı verilerek analizlerin yapıldığı data elde edilmiştir. Diğer data ise, üretimde kullanılan sıcak hava prosesi sonrası yakıt borusu taratılarak 3 boyutlu model datası elde edilmiştir (Şekil 3.5., Şekil 3.6., Şekil 3.7. Şekil 3.8., Şekil 3.9., Şekil 3.10.).

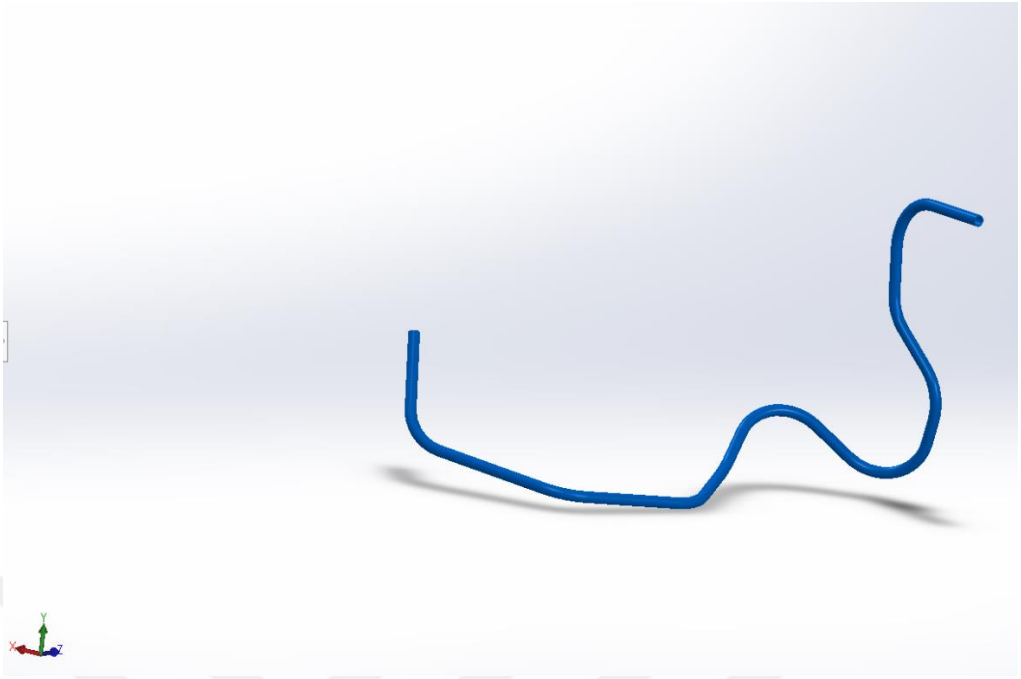
Teorik data sonucu analizlerde kullanılmış data ve tersine mühendislik ile elde edilmiş olan data çakıştırılmıştır (Şekil 3.11., Şekil 3.12.). Böylece yapılan analizlerin fiziki olarak doğrulanması hedeflenmiştir.



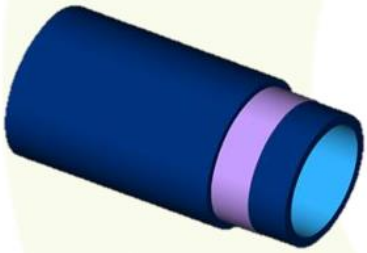
Şekil 3.5. Yakıt borusu üç boyutlu modeli-1



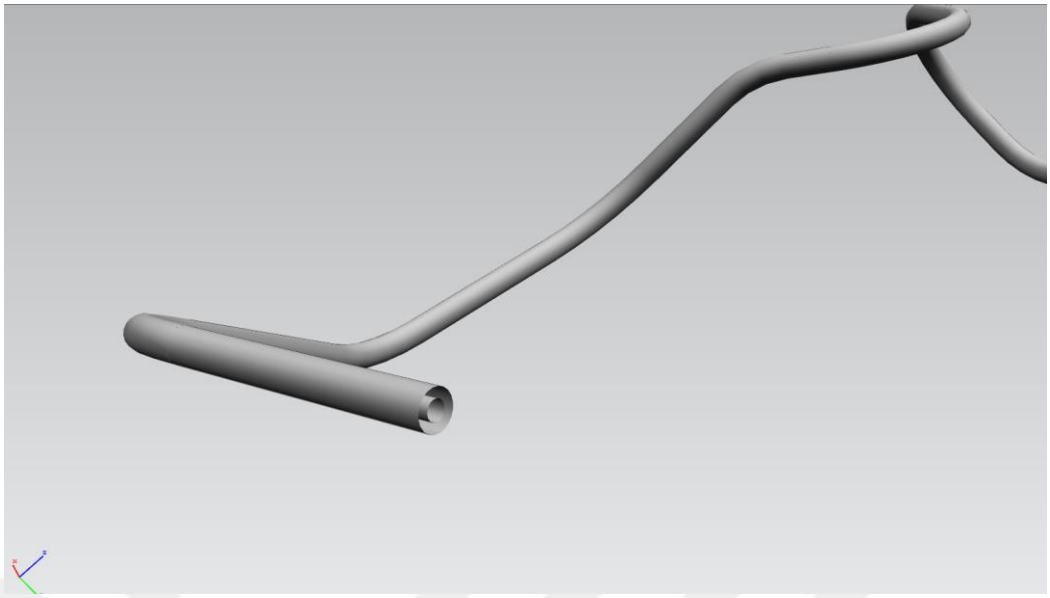
Şekil 3.6. Yakıt borusu üç boyutlu modeli-2



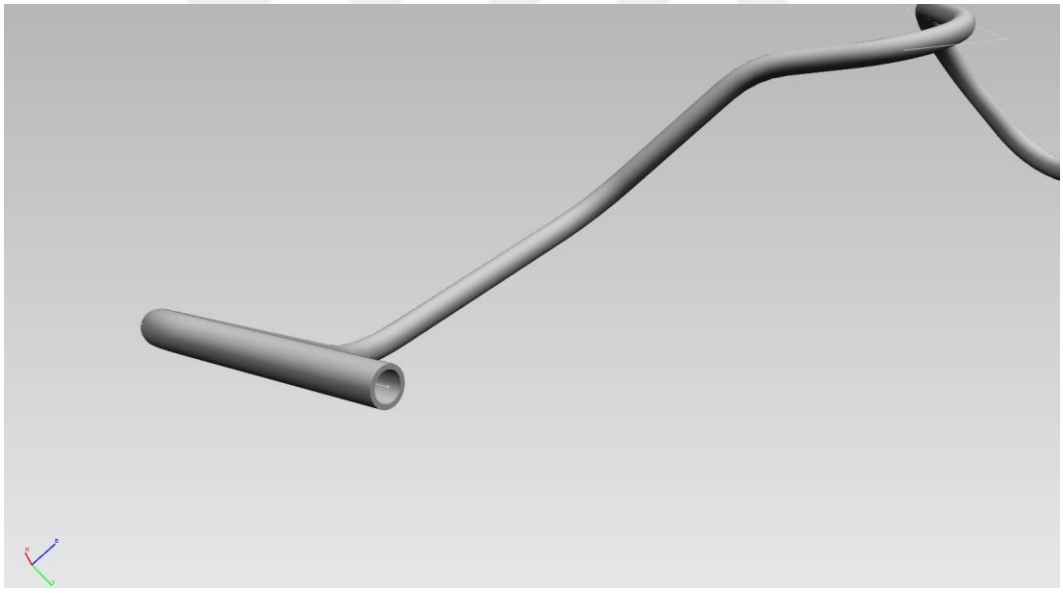
Şekil 3.7. Yakıt borusu üç boyutlu modeli-3



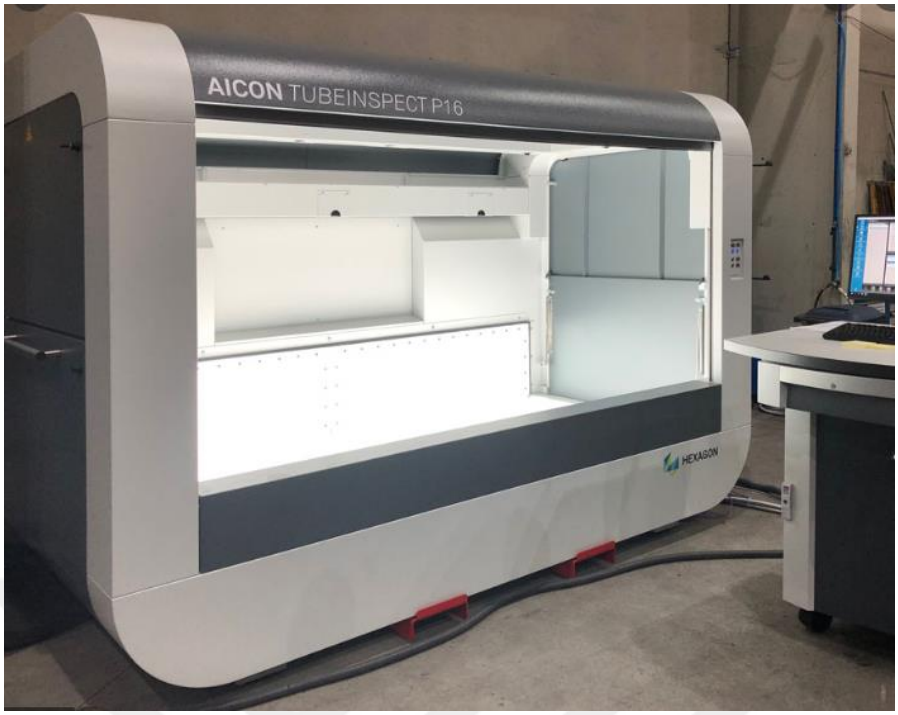
Şekil 3.8. Üç katmanlı yakıt borusu örneği



Şekil 3.9. Müşteriye ait dış ve iç çap ölçülerinin yer aldığı yüzey data



Şekil 3.10. Yüzey dataya kalınlık verilerek elde edilen üç boyutlu boru datası



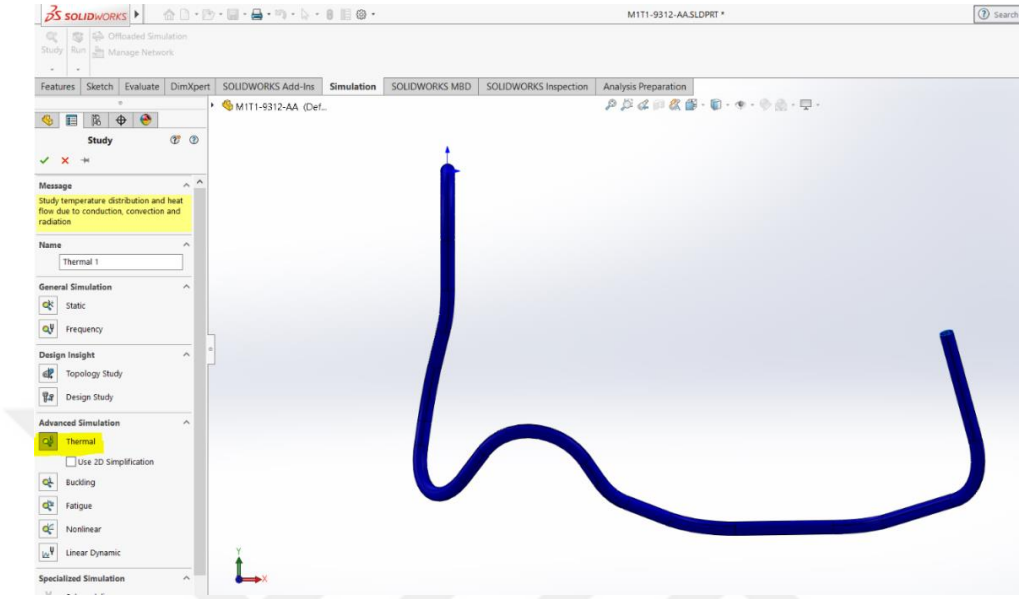
Şekil 3.11. Tersine mühendislik ile taramanın yapıldığı AICON makinesi-1 (Anonim4, 2022)



Şekil 3.12. Tersine mühendislik ile taramanın yapıldığı AICON makinesi-2 (Anonim5, 2022)

3.3. Oluşturulan Modelin Sonlu Elemanlar Metodu ile Analiz Edilmesi

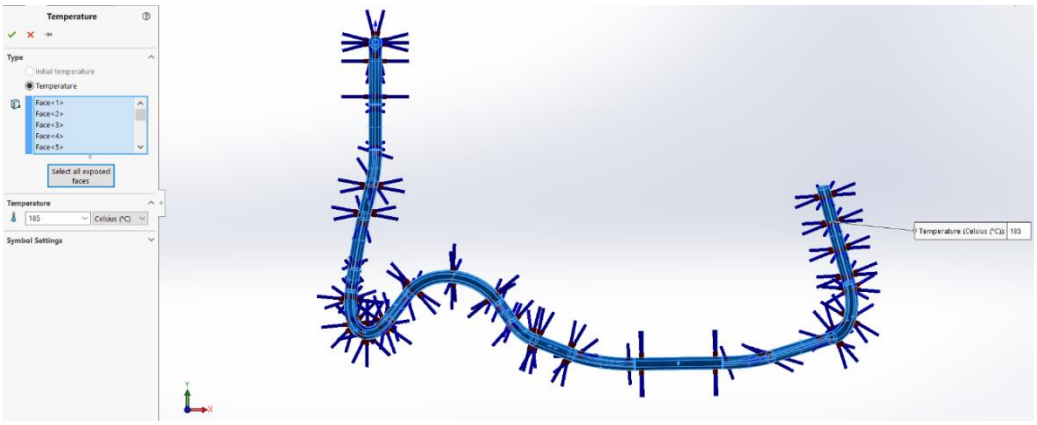
İlk olarak simülasyon için yeni çalışma başlatılır ve termal analiz yöntemi seçilir (Şekil 3.13.).



Şekil 3.13. Termal analiz simülasyonu

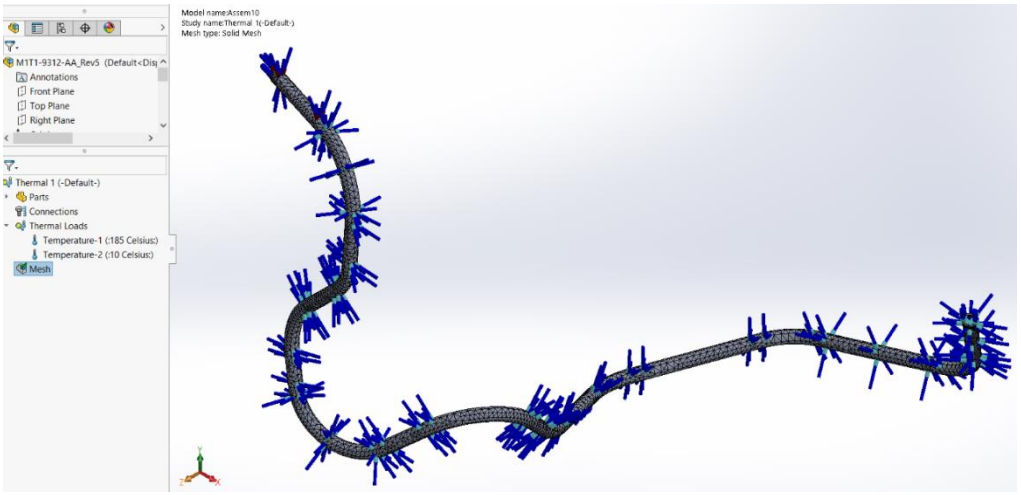
Sonrasında, "Termal Yükler" kısmından sıcaklık girdisi seçilir. Ortalama ortam sıcaklığı olan 185°C girilerek, sıcaklık etki alanı olarak "Tüm Dış Yüzeyler Boyunca" kısmı seçilir. Duşlama suyu sıcaklığı etkisi için 10°C olarak bir sıcaklık girdisi daha eklenir.

Şekil 3.14.'te görülen oklar, eşit aralıklarla tüm boru dış yüzeyi boyunca 6 farklı doğrultudan etki eden 185ºC'lik sıcaklığı ifade etmektedir.



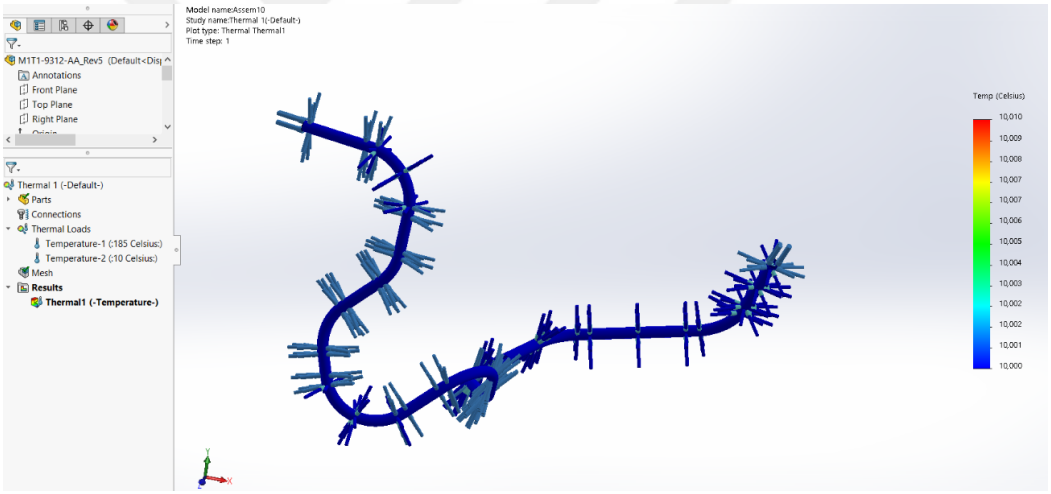
Şekil 3.14. Sıcaklık girdisinin gösterimi

Parçaya otomatik komutu seçilerek mesh verilmiş olur (Şekil 3.15.).



Şekil 3.15. Analizin başlatılması

Nihai olarak yakıt borusu materyali PA12 olarak seçilerek analiz başlatılır (Şekil 3.16.).



Şekil 3.16. Termal analiz sonucu

Statik analizlerde ise konnektör bağlantılarından ve sıcak hava fırın kalıplarındaki mesnet noktalarından yakıt borusu sabitlenerek analiz yapılmış olur.

3.4. Oluşturulan Modelin Fiziki Olarak Doğrulanması

Oluşturulan üç boyutlu modele ve sonlu elemanlar metodu analizlerine göre elde edilen sonuçlar (yeşil ile belirtilen model), fiziki olarak üretilen ve daha sonrasında tersine mühendislik ile elde edilen model (mor ile belirtilen) ile çakıştırılmıştır.

3.4.1. Çalışma parametrelerinin belirlenmesi

Çalışma kapsamında seçilen farklı kalınlıklardan oluşan 3 katmanlı PA12'den oluşan yakıt borusu (Şekil 3.17.) -40 ile 120ºC çalışma aralığına sahiptir. Otomotiv sektöründe yer alan başlıca otomobil üreticilerinin gerekliliklerine sahip olan yakıt borusu DIN 73378 şartlarını da sağlamaktadır.

Yakıt borularının şekillendirilmesinde kullanılan yöntemlerinden biri sıcak hava fırınlarıdır. Parçaya formu verecek şekilde imal edilen sarım kalıpları ve aynı anda birden fazla parça üretilmesini sağlayan kalıp gözleri prosesin en önemli araçlarıdır. Bununla birlikte minimum ve maksimum ortam hava sıcaklığı, ortalama ortam sıcaklığı, bant sürme hızı, duşlama suyu sıcaklığı ve duşlama süresi de prosesi oluşturulan diğer parametrelerdir.



Şekil 3.17. Fırın prosesi öncesi düz haldeki yakıt borusu

Fırın prosesi öncesinde, düz halde olan yakıt boruları yaklaşık 40ºC'lık ön ısıtma işlemine tabii tutulur. Ön ısıtma işleminin uygulanmasındaki amaç, yakıt borularının fırın kalıplarına daha kolay sarılmasını sağlamaktır.



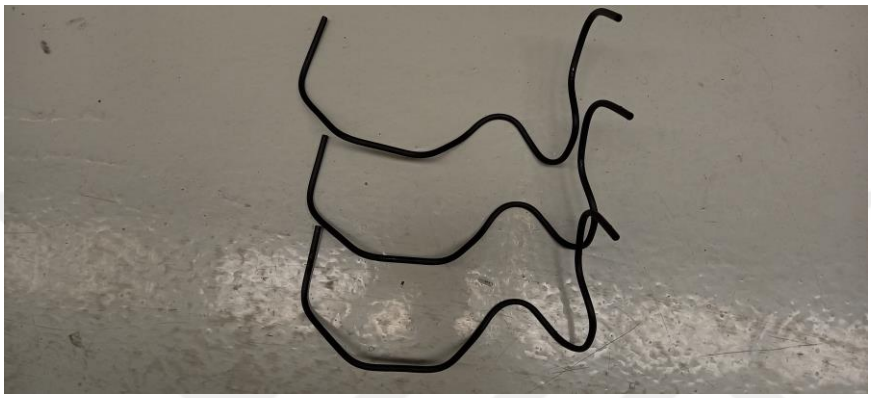
Şekil 3.18. Fırın prosesine girmek üzere kalıp gözlerine yerleştirilen yakıt boruları

Fırın kalıp gözelerine sarılan yakıt borularının her iki tarafından, esnek yaylar geçirilir (Şekil 3.18.). Yayların amacı büküm bölgelerindeki deformasyonları ve yüzeyde yaşanabilecek bozulmaları engellemektir.

Proses esnasında, minimum ve maksimum ortam sıcaklığı, proses hızı ve duşlama süresi ile alakalı deneme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında uygun veya uyguna en yakın sıcaklığın tespit edilebilmesi için, proses hızı ve duşlama süresi sabit tutularak, fırın ortam sıcaklığının parça üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Tez kapsamında yakıt boruları için PA12 malzemeleri materyal olarak kullanılmış olup, Solidworks programı kullanılarak müşterinin paylaştığı yüzey datadan üç boyutlu model elde edilmiştir ve sonlu elemanlar yönetimiyle elde edilen modele termal ve statik analizler yapılmıştır. Elde edilen modeller sıcak hava fırınları ile fiziki olarak üretilmiştir (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Fırın prosesi tamamlanan ve şekil verilen yakıt boruları

Analiz sonucuna göre elde edilen datanın fırın prosesi sonrası tersine mühendislik ile taranan data ile çakıştırılması gerçekleştirilerek ürün doğrulaması yapılmıştır (Şekil 4.2., Şekil 4.3.).

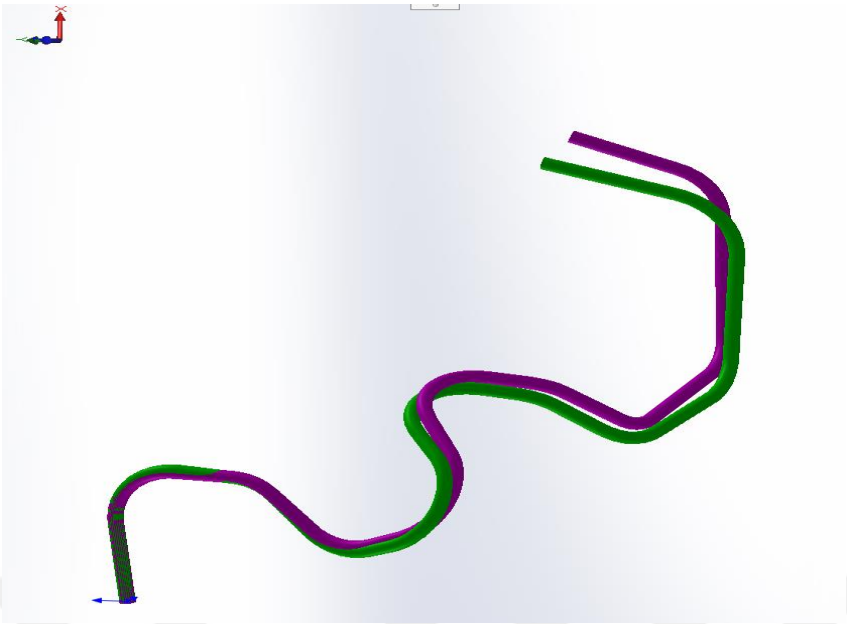


Şekil 4.2. Analiz sonucuna göre elde edilen datanın fırın prosesi sonrası taranan data ile çakıştırılması-1

Farklı sıcaklıklara ait çalışma sonuçları Çizelge 4.1.'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklara ait deneme sonuçları

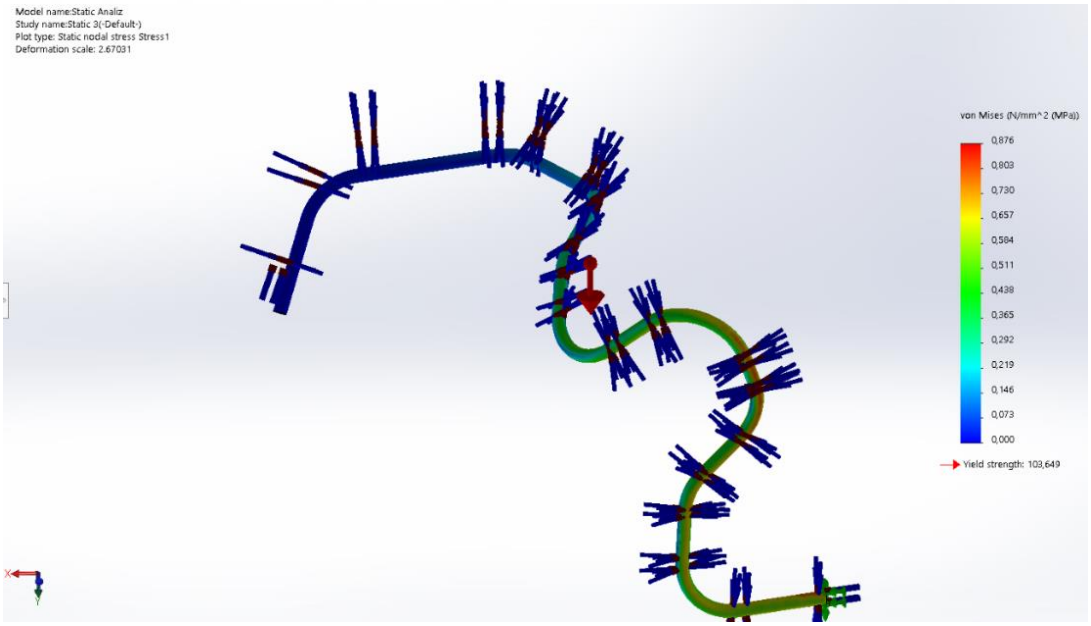
Deneme Numarası	Boru Ölçüsü	Üst Sıcaklık [°C]	Alt Sıcaklık [°C]	Ortalama Sıcaklık [°C]	Frekans [hz]	Soğutma süresi [sec]	Sonuç
1	8X1	185	175	180	26	150	NOK
2	8X1	185	175	180	26	120	NOK
3	8X1	185	175	180	26	150	NOK
4	8X1	190	180	185	26	150	OK
5	8x1	185	170	175	32	150	NOK
6	8x1	185	170	175	26	150	NOK



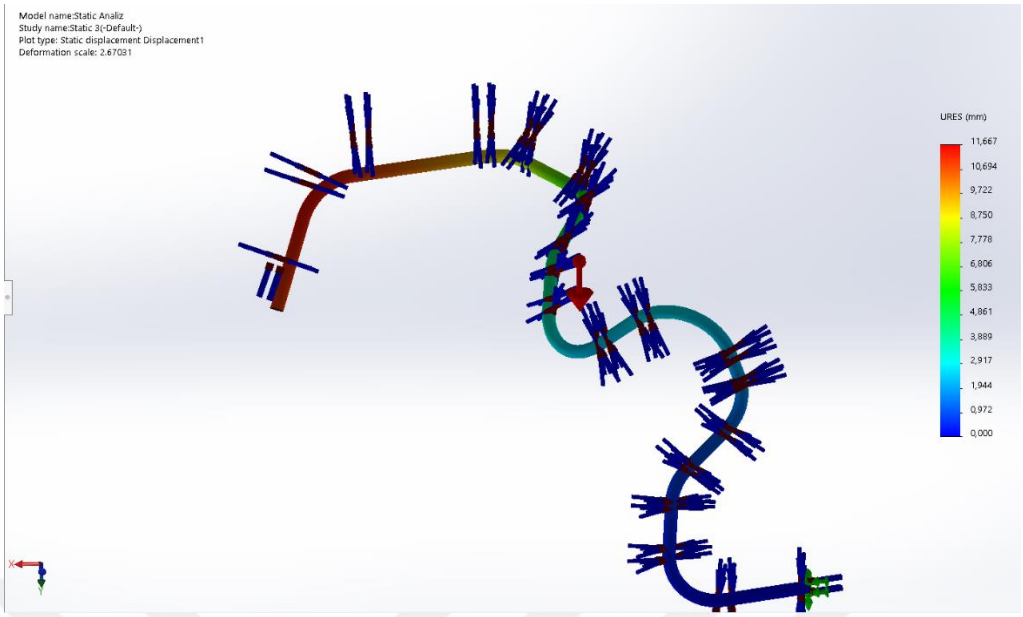
Şekil 4.3. Analiz sonucuna göre elde edilen datanın fırın prosesi sonrası taranan data ile çakıştırılması-2

4.1. Yakıt borusunun kalıpta sabitleme bölgelerine göre analiz sonuçları

İlk olarak yakıt borusu fırın kalıbındaki konumuna göre en sağ kısımdan sabitlenerek analiz yapılmıştır (Şekil 4.4., Şekil 4.5.).

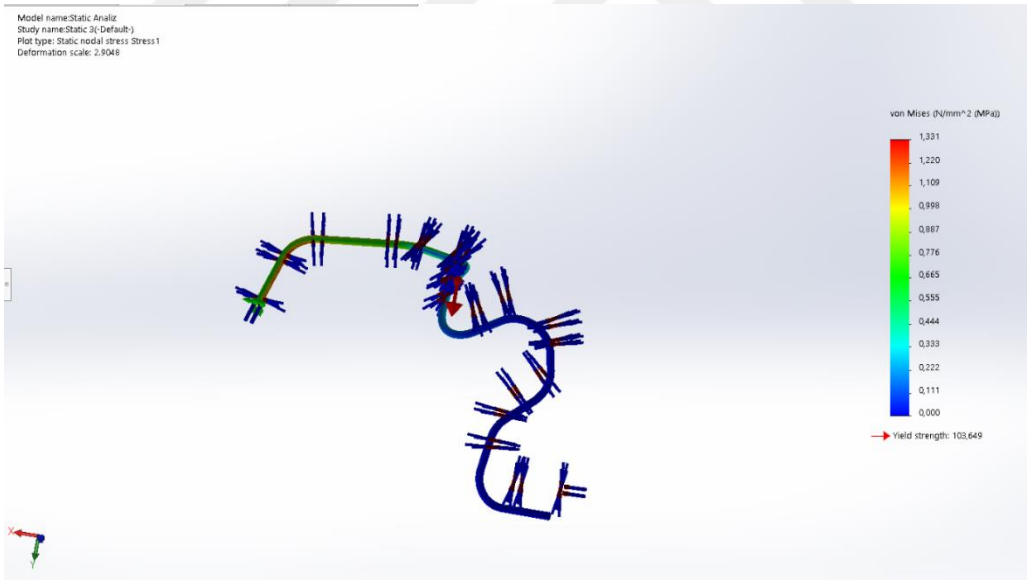


Şekil 4.4.. Gerilme analiz sonuçları-1

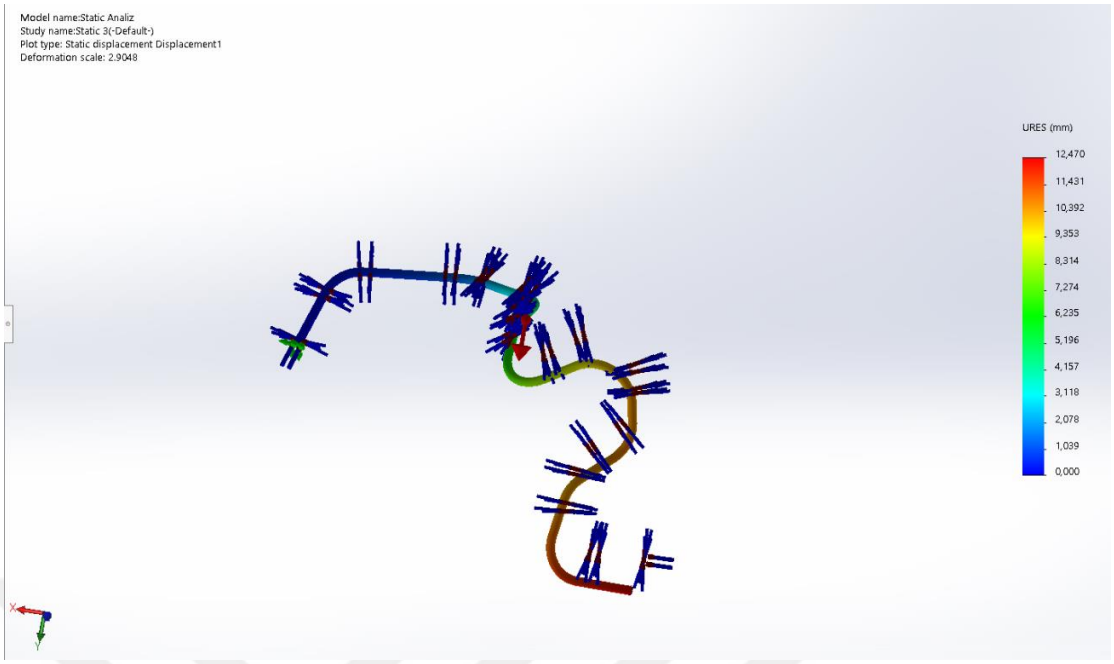


Şekil 4.5. Yer değiştirme analiz sonuçları-1

Daha sonra yakıt borusu fırın kalıbındaki konumuna göre en sol kısımdan sabitlenerek analiz yapılmıştır (Şekil 4.6., Şekil 4.7.).

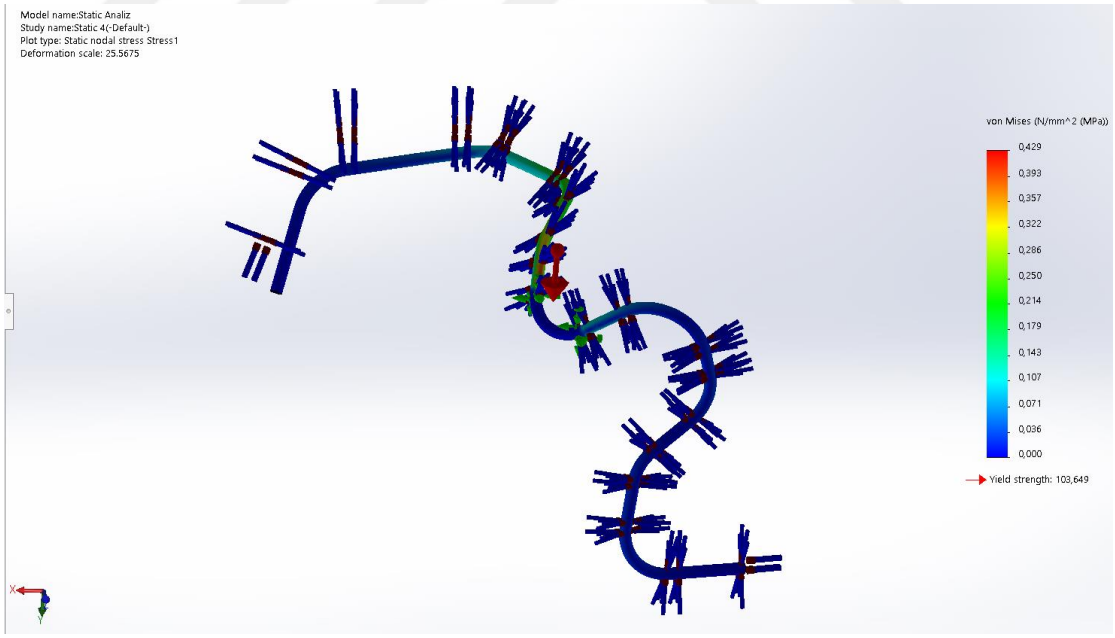


Şekil 4.6. Gerilme analiz sonuçları-2

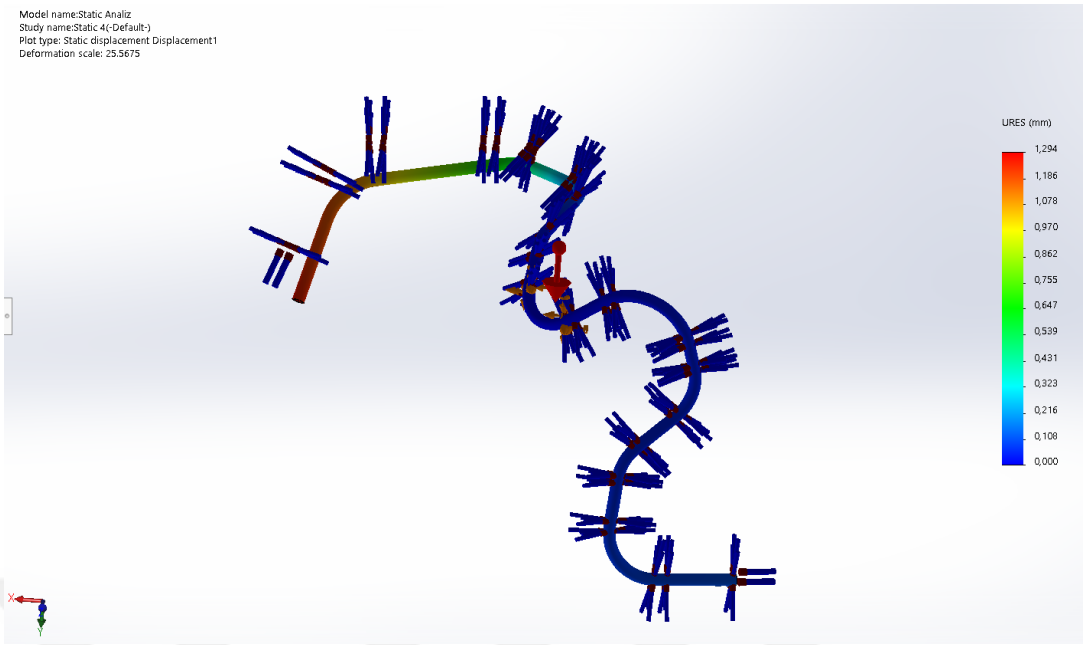


Şekil 4.7. Yer değiştirme analiz sonuçları-2

Üçüncü varyasyonda yakıt borusu fırın kalıbındaki konumuna göre ilk büküm bölgesinden sabitlenerek analiz yapılmıştır (Şekil 4.8., Şekil 4.9.).

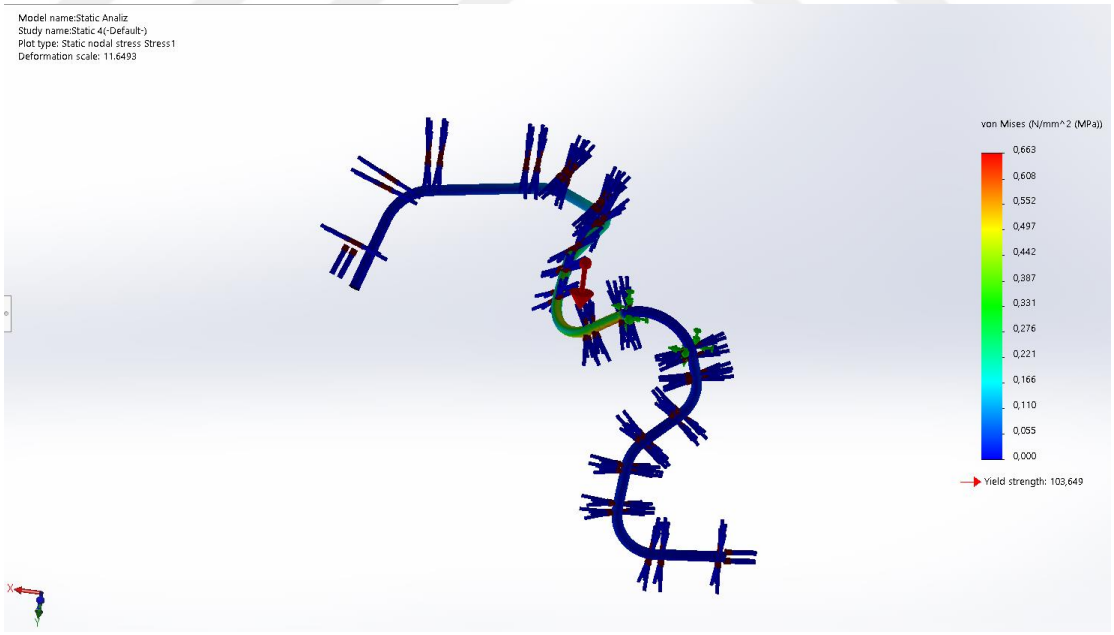


Şekil 4.8. Gerilme analiz sonuçları-3

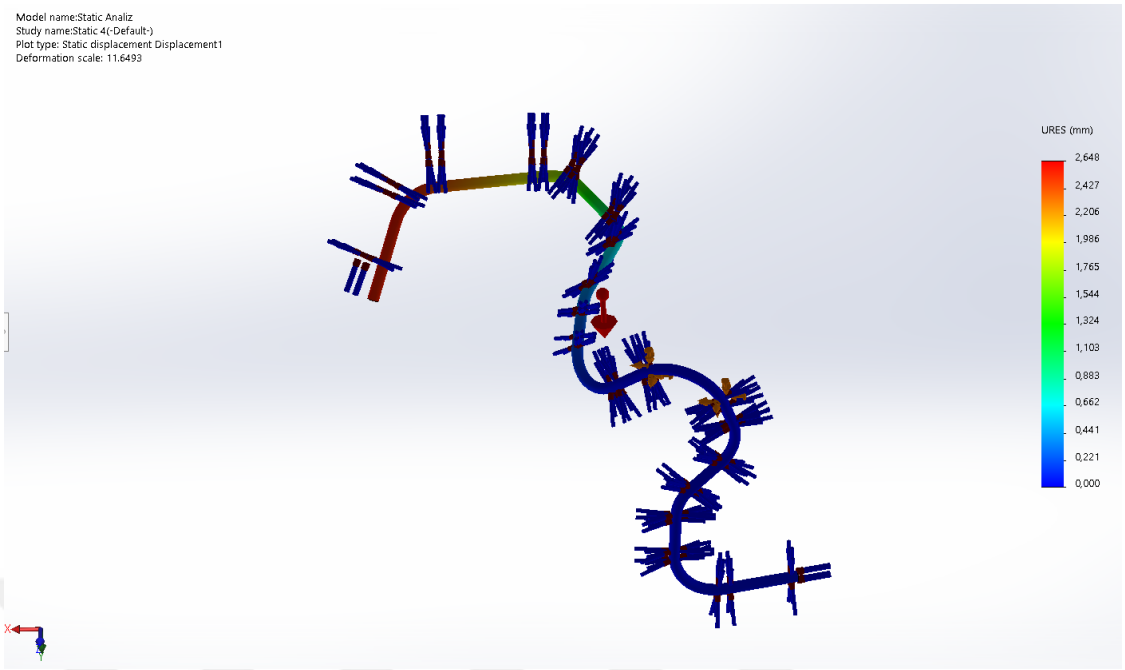


Şekil 4.9. Yer değiştirme analiz sonuçları-3

Son olarak yakıt borusu fırın kalıbındaki konumuna göre ikinci büküm bölgesinde sabitlenerek analiz yapılmıştır (Şekil 4.10., Şekil 4.11.).



Şekil 4.10. Gerilme analiz sonuçları-4



Şekil 4.11. Yer değiştirme analiz sonuçları-4

Tez kapsamında kullanılan yakıt borusu, 2 eksenli olmayıp, farklı eksenlerde düz ve kıvrımlı bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla iki datanın hangi nokta veya noktalardan çakıştırılarak farklılıkların gözlemlendiği önem arz etmektedir. Parçanın aşağıda verilen şekle göre en sol tarafındaki konnektör bağlantısından sabitlendiğinde, şekle göre en sağ kısımdaki konnektör bağlantısının bulunduğu bölgenin deplasmanı 10 mm dolaylarına kadar çıkmaktadır. Yine aynı şekilde, en sağ kısımdan sabitlenerek, en sol kısımdaki deplasman gözlemlenmeye çalışıldığında bu fark 10mm civarında olmaktadır.

Fakat 3. ve 4. Sabitleme noktaları olan parçanın orta kısmına daha yakın bükümlerden sabitleme yapıldığında, deplasman farkı 1,5-2,5 mm civarında olduğu görülmektedir. Parçanın sahip olması beklenen genel konum toleransının ±3 mm olduğu göz önüne alındığında, kabul edilebilir ve uygun seviyede olduğu söylenebilir.

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, 3 katmanlı yakıt borusunun modellenmesi, sonlu elemanlar metoduyla analiz edilmesi ve yapılan analiz sonuçlarının, sıcak hava fırınıyla üretildikten sonra tersine mühendislik ile taranarak datası elde edilen fiziki parça ile doğrulanması yönünde çalışmalar yapılmıştır.

Modelleme ve sonlu elemanlar metodunun uygulanmasında SolidWorks programından yararlanılmıştır. Fiziki olarak üretilen parçanın taranmasında AICON makinesinden yararlanılmıştır.

Sıcak hava fırınında üretim yapılırken; fırın alt sıcaklığı, fırın üst sıcaklığı, ortalama fırın sıcaklığı, proses frekansı, duşlama süresi, duşlama sıcaklığı gibi farklı parametreler belirlenmiştir. Ortalama fırın sıcaklığının etkisini gözlemleyebilmek adına, diğer parametreler optimum çalışma şartlarında sabitlenmiştir ve değişken olarak ele alınmamıştır.

Fiziki üretimler sırasında optimum şartların belirlenmesinde deneme-yanılma yöntemi ile başlangıç parametreleri seçilmiştir. Çalışma kapsamında belirlenen amaçlardan biri de, deneme-yanılma sayısını mümkün olduğunca en aza indirmek ve ortadan kaldırmaktır.
Sıcak hava fırın prosesi sonrası parça kontrolleri için kontrol fikstüründen yararlanılmaktadır. Parçanın sahip olması beklenen genel konum toleransına göre düz ve bükümlü kısımların uygunluğuna karar verilmektedir.

Fırın prosesi sonrası elde edilen data ile analiz sonucu ortaya çıkan nominal data arasında fark görülmektedir. Ancak bu fark, parçanın her iki ucunda yer alacak ve montaj prosesinde kullanılacak konnektör bağlantılarından çakıştırıldığında ortaya çıkmaktadır. Parçanın sahip olduğu üç boyutlu form ve üzerindeki farklı yönlerdeki bükümler düşünüldüğünde, en uçta yaşanan farklılık kabul edilebilir seviyededir. Parçanın orta kısımlarına yakın bölgede yer alan bükümlerden yapılan çakıştırmalarda, aradaki deplasman farkının 1,5mm-2,5mm seviyelerinde olması, parçanın sahip olduğu genel konum toleransı göz önüne alındığında, uygundur.

Ortalama fırın sıcaklığı, parçanın görsel uygunluğuna da doğrudan etki etmektedir. Parça üzerinde gözle görülebilecek deformasyonlar veya uygunsuzluklar mevcut ise parametreler değiştirilerek görsel olarak da uygun hale getirilmektedir.

KAYNAKLAR

Anonim1, https://www.thefreelibrary.com/Multilayer+nylon+tubing+for+automotive+fuel+lines.-a020146452 (Erişim Tarihi:05.01.2022)

Anonim2, http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/hicriyavuz@hititedutr100220179U6G8Q9S.pdf (Erişim Tarihi: 01.05.2022)

Anonim3, http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Dizel%20Motorlar%C4%B1%20Yak%C4%B1t%20Sistemleri%20(Motorlu%20Ara%C3%A7lar).pdf (Erişim Tarihi: 02.05.2022).

Anonim4, https://www.leku- ona.com/en/aicon-nueva-maquina-medicion-optica-tubos/ (Erişim Tarihi: 02.05.2022).

Anonim 5, https://metrology.news/measuring-system-part-of-continuous-improvement-for-tube fabricator/ (Erişim Tarihi: 02.05.2022).

Anonim 6, http://www.baodie.cn/en/productsh.aspx?Id=31d2b87e-c12c-4547-b550-f894c381c3cc (Erişim tarihi: 19.06.2022)

Anonim 7, http://www.baodie.cn/en/productsh.aspx?Id=31d2b87e-c12c-4547-b550-f894c381c3cc (Erişim tarihi: 19.06.2022)

Arslan, V. (2021). Paslanmaz Çelik Sacların Derin Çekilebilirlik Kabiliyetlerinin Sonlu Elemanlar Analizi İle İncelenmesi. BŞEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik.

Barlat, F., & Lian, J. (1989). Plastic behaviour and stretchability of sheet metals (Part I): A yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions. *International Journal of Plasticity*, 5:51–56.

Bedir, S.(2007). Çift Yönlü Asansör Fren Bloklarının Modellenmesi Ve Sonlu Elemanların Analizi. İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Brahmi, A., Wolf, R. (1999). A Comparison of Vapor and Liquid Fuel Permeation of Fuel Systems Polymers. *SAE Transactions, Journal Of Materıals & Manufacturıng*, 108(5): 451-456.

B.S. Chernev, G.C. Eder. (2013). Side effects in the application of polyamide 6 barrier materials for fuel tanks. *Journal of Applied Polymer Science*, 127(1), 230-236.

B.S. Chernev, G.C. Eder. (2013). Polyamide in Fuel Tanks. *ATZ worldwide*, 115(7-8), 44-47.

Crawford, R. P., Rosenberg, W. S., & Keaveny, T. M. (2003). Quantitative computed tomography-based finite element models of the human lumbar vertebral body: effect of element size on stiffness, damage,
and fracture strength predictions. *Journal of biomechanical engineering*, 125(4), 434-438.

Dilli, A. (2006). Catıa V5 Programı İle İzotropik Ve Anizotropik Malzemeden Yapılmış Makina Elemanlarında Gerilme Analizi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, YL Tezi, 68s, Elazığ.

E, Park (2006). *Fuel hose with a fluoropolymer inner layer*. US Patent US20060099368A1.

E. Richaud, F. Djouani, B. Fayolle, J. Verdu, B. Flaconneche. (2015). New insights in polymer-biofuels interaction. *Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles,* 70(2): 317-333.

F. Djouani, B. Patel, E. Richaud, B. Fayolle, J. Verdu. (2012). Antioxidants loss kinetics in polyethylene exposed to model ethanol based biofuels. *Fuel*, 93:502-509.

Flepp A, Hoffman M. (2003). Thermoplastic multilayer composites. United States Patent # 6555243.

Gray, E. ve Hopf, G., "Otomotiv Yakıt Sistemi Ortamında Naylon 12", SAE Teknik Belgesi 880684, 1988, https://doi.org/10.4271/880684 .

Holloman, J. H. (1945). Tensile Deformation, Transactions of the American Institue of Mining and Metallalurgical Engineers, 162:268-290.

Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proc. Roy. Soc. London, 281-297.

Hopf, G., Hans, R., Edward, K.G. (1994). Development of Multilayer Thermoplastic Fuel Lines With Improved Barrier Properties, SAE Transactions. *Journal Of Materıals & Manufacturıng*, 103(5):64-80

Ito, H., Lio, S., Ishida, Y. (2001). *Corrugated Fueltube And A Process For Manufacturıng The Same.* United States Patent #0031330.

Jing, N., Fukushi, T., Molnar, A., Bilbrey, D,B., Muggli, M,W., Hine, A,M., Spurgeon, K,M., Christopher, A, H. (2005). *Fluoropolymer blends and multilayer articles.* United States Patent # 6849314.

J.G. Drobny. (2007). Fluoropolymers in automotive applications. *Polymers for Advanced Technologies*, 18(2):117-121. https://doi.org/10.1002/pat.5732

X.-F. Wei, S. Akhlaghi, K.J. Kallio, S. Bruder, M. Bellander, U.W. Gedde, M.S. Hedenqvist. (2017). Long-term performance of polyamide-based multilayer (bio) diesel fuel lines aged under "in-vehicle" conditions. *Polymer Degradation Stabiliy*, 144, 100-109.

K.J. Kallio, M.S. Hedenqvist, (2008). Ageing properties of polyamide-12 pipes exposed to fuels with and without ethanol. *Polymer Degradation Stabiliy*, 93(10), 1846-1854.

K.J. Kallio (2010). The Ageing of Fuel Lines Based on Polyamide-12, KTH Royal Institute of Technology, Ph.D Thesis.

K.J. Kallio, A.S. Nageye, M.S. Hedenqvist. (2010). Ageing properties of car fuel-lines; accelerated testing in "close-to-real" service conditions. *Polymer Testing*, 29(1), 41-48.

Kurnaz, U. (2019). Çok Katlı Poliamid Kompozit Borunun Extrüzyon İle Üretiminde Alev Uygulamasının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya

Liu, Y. (2003). Finite element method lecture notes, Mechanical Engineering Department, University of Cincinati.

M.S. Hedenqvist, J. Ritums, M. Condé-Brana, G. Bergman. (2003). Sorption and desorption of tetrachloroethylene in fluoropolymers: Effects of the chemical structure and crystallinity. *Journal of Applied Polymer Science*, 87(9): 1474-1483.

Molnar, A., Baker, J., Tuckner, P., Bilbrey, D. (2002). Comparison of Fuel Hose SHED Test Results and Predicted Values Using Fundamental Material Barrier Properties. *SAE Transactions, Journal Of Materıals Andmanufacturıng,* 111 (5): 373-385.

Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., & Baldoukas, A. K. (1997). "Simulation of Sheet Metal Forming Using Explicit Finite-Element Techniques: Effect of Material And Forming Characteristics, Part 1. Deep-Drawing of Cylindrical Cups". *Journal of Materials Processing Technology,* Volume 72, P: 48-60.

Parthasarathy, V. N., & Kodiyalam, S. (1991). A constrained optimization approach to finite element mesh smoothing. *Finite Elements in Analysis and Design*, 9(4), 309-320.

Plumley, S. (1996). *Hose for an automotive fuel line*. United States Patent # 5507320.

R.A. Nascimento, A.M.C. de Souza. (2016). Mechanical properties of polyamide 12 after exposed to biodiesel, Proceedıngs Of The Regıonal Conference Graz 2015–Polymer Processıng Socıety Pps: Conference Papers, AIP Publishing, p. 070010.

Rajasekar, R., Sasi Kumar, K.S.K., Sathish Kumar, P. (2016). Multi Layer Pipes. In: Kim, J., Thomas, S., Saha, P. (eds) Multicomponent Polymeric Materials. Springer Series in Materials Science, vol 223. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7324-9_10.

Sarıkanat, M. (2007). Trabeküler Kemiğin Üç Boyutlu Anizotropik Modellenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.

Saraç, Ş. (2021). Çelik Dirsek Boruların Üretim Prosesinin Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi İle Modellenmesi Ve Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Shifman, J. (2007*). Flexible hose having reduced fuel vapor permeability and method of manufacturing such hose*. United States Patent # 7228877.

Smith, C,W., Shifman, J., Duke, J. (2003). *Low permeation nylon tube with aluminum barrier layer*. United States Patent # 6652939.

Spurgat, J,C. (1995). *Low permeation fuel hose*. United States Patent # 5398729.

Varlık, T. (2017). Dönel Takımlar Kullanılarak Yapılan Dış Çap Tornalama İşlemlerinin Sonlu Elemanlar Analizi, B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, YL Tezi, 81 s, Bursa.

Wei, Xin-Feng; Kallio, Kai J.; Bruder, Stefan; Bellander, Martin; Gedde, Ulf W.; Hedenqvist, Mikael S. (2018). Long-term performance of a polyamide-12-based fuel line with a thin poly(ethylene-co-tetrafluoroethylene) (ETFE) inner layer exposed to bio- and petroleum diesel. *Polymer Degradation and Stability*, (), S0141391018302830–. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2018.09.003

Yoshikawa, M., Hideyuki, K., Fukuura, Y., Naito, K. (1995). *Low permeable rubber hose.* United States Patent # 5476121

Yıldız, B. (2017). Derin Çekme İşleminde Kalıp Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Yoshida, F., & Uemori, T. (2002). A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation. *International Journal of Plasticity*, 18(5-6), 661-686.