

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ELASTİK MALZEMEDEN ÜRETİLEN HAVA HORTUMLARININ ISIL
GENLEŞME ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aslıhan ÇAKIR

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ELASTİK MALZEMEDEN ÜRETİLEN HAVA HORTUMLARININ
ISIL GENLEŞME ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ashhan ÇAKIR
(161080110)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN

TEMMUZ 2019

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 161080110 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Aslıhan ÇAKIR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "FARKLI ELASTİK MALZEMEDEN ÜRETİLEN HAVA HORTUMLARININ ISIL GENLEŞME ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan Sökmen**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri :

Savunma Tarihi : **Temmuz,2019**

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi

.....
...../...../.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Aslıhan ÇAKIR

İmzası :

X X X X

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimime başladığım günden itibaren bana yol gösteren, tecrübeleri ile beni aydınlatan, akademik ve kişisel kariyerim konusunda desteğini ve rehberliğini benden esirgemeyen, sevgili danışmanım Dr. Öğr. Üyesi. Kemal Furkan SÖKMEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda yer alan deneysel testler kısmında bana destek veren Elatek Kauçuk ARGE Merkezi çalışanlarına ve yönetimine, çalışmamın mekanik testleri kısmında yardımlarını benden esirgemeyen Arş. Gör. Safa ŞENAYSOY ve Arş. Gör. Ali Osman GÜNEY'e teşekkür ederim.

Hem lisans hem de yüksek lisans yapma fırsatı bulduğum, hayatımın önemli noktalarına şahitlik eden Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde görev yapan saygı değer hocalarıma, bana vermiş oldukları destek ve emekler için teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü desteğini yakinen hissettiğim ve tezim için beni cesaretlendiren sevgili aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Temmuz 2019

Aslıhan Çakır

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	vii
SEMBOLLER	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Kavramlar, Tanımlamalar ve Temel Bilgiler	1
1.2.1 Termal genleşme	1
1.2.2 Kauçuk	5
1.2.3 FSI analizi	6
1.3 Literatür Araştırması	7
2. MATERYAL METOT	12
2.1 CFD Analizi	12
2.2 FEA Analizi.....	15
2.3 FSI Analizi	20
3. DENEYSEL METOT	23
3.1 Hortumların Üretimi.....	24
3.2 Hortumların Test Edilmesi	28
4. ANALİZLER	33
4.1 Geometrinin Tanımlanması.....	33
4.2 Malzeme Özelliklerinin Saptanması- Çekme Testi.....	35
4.3 CFD Analizi	44
4.4 Ansys- Yapısal Analiz.....	51
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
5.1 CFD Analizi ve Test Sonuçlarının Karşılaştırılması	53
5.2 FEA Analizi ve Çap Genişleme Test Sonuçlarının Karşılaştırılması	57
5.3 Çalışmanın Uygulama Alanları	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	68

KISALTMALAR

AEM	: Etilen Akrilat Kopolimer
ASM	: American Society for Metals
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CSM	: Klorosülfonatlı Polietilen
DOF	: Sistem serbestlik derecesi
ECO	: Epiklorohidrin
EGR	: Exhaust gas recirculation (egzozun gaz devridaimi)
EPDM	: Etilen propilen dien monomer
FEM	: Finite Element Method
FSI	: Fluid-structure interaction
NBR	: Akrilonitril Bütadien
RANS	: Reynolds-Ortalama Navier-Stokes
TMA	: Termal Mekanik Analizör

SEMBOLLER

α	: Termal genleşme katsayısı [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
A	: Alan [mm^2]
A_i	: İlk alan [mm^2]
E	: Elastisite modülü
ϵ	: Gerinim
H	: Son yükseklik [mm]
H_i	: İlk yükseklik [mm]
L	: Son boy [mm]
L_i	: İlk boy [mm]
p	: Basınç [Pa ya da bar]
T	: Sıcaklık [$^{\circ}\text{C}$]
u	: Hız [m/s]
u	: Yer değiştirme [mm]
V	: Hacim [mm^3]
V_i	: İlk genişlik [mm^3]
W	: Son genişlik [mm]
W_i	: İlk genişlik [mm]
x, y, z	: Koordinat sistemi
γ	: Kayma gerilmesi (shear stress)
ΔL	: Boydaki değişim miktarı [mm]
ΔT	: Sıcaklıktaki değişim miktarı [$^{\circ}\text{C}$]
ρ	: Yoğunluk [g/cm^3]
σ	: Gerilme [N/mm^2]

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: Çekme testinde 0-3 saniye aralığında elde edilen değerler.	40
Çizelge 4.1: Çekme testinde 0-3 saniye aralığında elde edilen değerler.	41
Çizelge 4.2: Kauçuk türüne göre elastisite modülü.	44
Çizelge 4.3: 100°C’de yapılan analizin başlangıç koşulları.	45
Çizelge 4.4: 100°C’de yapılan analizin düğüm ve elaman sayısı.	48
Çizelge 4.5: 140°C’de yapılan analizin başlangıç koşulları.	50
Çizelge 5.1: Çap genişleme testi ve CFD analizi sonuçları karşılaştırma çizelgesi. .	56
Çizelge 5.2: 100°C’de Çap genişleme testi ve termal genleşme analizi sonuçları. ...	62
Çizelge 5.3: 140°C’de Çap genişleme testi ve termal genleşme analizi sonuçları. ...	62

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Parçacıkların genişmesi ve büzülmesi.	2
Şekil 2.1: CFD işlemindeki iş akışı.	13
Şekil 2.2: Örnek bir yapının sonlu elemanlara bölünmesi (Langen ve Sigbjornsson, 1986).	17
Şekil 2.3: İki yönlü bir bağlantı şemasının şematik çizimi (Bereznitski, 2002).	21
Şekil 3.1: Hortumların, araç üzerinde kullanıldığı konum.	23
Şekil 3.2: Ekstruder makinesi.	25
Şekil 3.3: Hortum örgü katmanı.	26
Şekil 3.4: (a) Pişmemiş kauçuk hamuru ve (b) hortum kalıbı.	27
Şekil 3.5: Prosesler sonucunda üretilen hortumlar.	28
Şekil 3.6: Çap genişleme test cihazı.	29
Şekil 3.7: Vidalı kelepçe ile monte edilmiş tapalı hortum.	29
Şekil 3.8: Çap genişleme testi öncesi hortumun ilk çapını belirlemek amacıyla yapılan proses.	30
Şekil 3.9: Test sırasında kabin içerisine bağlanan hortum.	31
Şekil 3.10: Cihaz kontrol ara yüzü.	32
Şekil 4.1: Hortumun geometrik modeli.	34
Şekil 4.2: Hortum kalıbının geometrisi.	34
Şekil 4.3: Ek operasyonlar sonrası hortumun geometrik modeli.	35
Şekil 4.4: Hortum üzerinden kesilen çekme numuneleri.	36
Şekil 4.5: Test için kullanılan çekme numunesinin boyutları.	36
Şekil 4.6: BTÜ Makine Laboratuvarında yer alan çekme testi cihazı.	37
Şekil 4.7: (a) Numune üzerinde işaretlenmiş beyaz alanlar ve (b) bilgisayarda kameralı sistem ile bu alanların takibi.	38
Şekil 4.8: Cihaz üzerindeki numunenin uzama ve kopma anı.	39
Şekil 4.9: Çekme testi sonucunda kopan numuneler.	39
Şekil 4.10: EPDM Kauçuk türüne ait gerilme-gerinim grafiği.	41
Şekil 4.11: AEM Kauçuk türüne ait gerilme-gerinim grafiği.	42
Şekil 4.12: ECO Kauçuk türüne ait gerilme-gerinim grafiği.	42
Şekil 4.13: NBR / CSM Kauçuk türüne ait gerilme-gerinim grafiği.	43
Şekil 4.14: Hortumun giriş ve çıkış tarafındaki başlangıç koşulları.	45
Şekil 4.15: Mesh parametreleri [(a) temel ayarlar ve (b) katı-sıvı ara yüz ayarları].	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 4.16: Mesh parametreleri [(c) ince mesh ve (d) dar kanal ayarları]. ...	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 4.17: 100°C’de yapılan analizin mesh durum bilgisi.	48
Şekil 4.18: 100°C’de analiz hedefleri yakınsama grafikleri.	49
Şekil 4.19: 140°C’de analiz hedefleri yakınsama grafikleri.	50
Şekil 5.1: 100°C’de elde edilen basınç analizi.	53
Şekil 5.2: 140°C’de elde edilen basınç analizi.	54
Şekil 5.3: 100°C’de elde edilen sıcaklık dağılımı.	55
Şekil 5.4: 140°C’de elde edilen sıcaklık dağılımı.	55

Şekil 5.5: 140°C'de yapılan çap genişleme testi sonuç raporu.	56
Şekil 5.6: EPDM kauçuğundan üretilen hortumun toplam deformasyonu.....	57
Şekil 5.7: EPDM kauçuğundan üretilen hortumun stress değerleri.....	58
Şekil 5.8: ECO kauçuğundan üretilen hortumun toplam deformasyonu.	58
Şekil 5.9: ECO kauçuğundan üretilen hortumun stress değerleri.....	59
Şekil 5.10: AEM kauçuğundan üretilen hortumun toplam deformasyonu.	59
Şekil 5.11: AEM kauçuğundan üretilen hortumun stress değerleri.....	60
Şekil 5.12: NBR\CSM kauçuğundan üretilen hortumun toplam deformasyonu.	60
Şekil 5.13: NBR\CSM kauçuğundan üretilen hortumun stress değerleri.....	61
Şekil 5.14: 100°C'de gerçekleştirilen EPDM kauçuk hortum çap genişleme testinin, excel sonuç raporunda yer alan test verileri ve basınç-zaman grafiği.	62



FARKLI ELASTİK MALZEMEDEN ÜRETİLEN HAVA HORTUMLARININ ISIL GENLEŞME ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışma; farklı hammaddeye sahip kauçuk türlerinden üretilen, aynı geometrik şekle ve boyutlara sahip, dört farklı hortumun ısıl genleşme analizini (termal analizini) incelemek amacıyla yazılmıştır. Termal analizler, katı-akışkan etkileşimli (FSI) analizlerdir. FloEFD programında, CFD analizi aracılığı ile hortum geometrisinin basınç değeri ve dağılımı tespit edilmiştir. Bu basınç dağılımı, Ansys programına aktarılarak, basınç kuvvetlerinin hortum üzerinde yarattıkları deformasyon incelenmiştir.

Hortumlar EPDM, ECO, AEM ve NBR/CSM kauçuk hamurlarından üretilmiştir. İmalat ve çap genişleme test süreci Bursa Demirtaş Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren Elatek Kauçuk Sanayi Ticaret AŞ’de gerçekleştirilmiştir. Kauçuk hamuru üretimi firma bünyesinde yer alan karışım laboratuvarında, kauçuk hamurları ilgili şartnamelere göre hazırlanmaktadır. Üretilen hamur gerekli malzeme testlerine tabi tutularak, şartname referans değerlerine uygunluğu onaylandıktan sonra, sırasıyla, ekstrüzyon işlemi ve vulkanizasyon işlemine tabi tutulmaktadır.

Üretilen hortumlar firma bünyesinde yer alan performans testi laboratuvarında, özel üretilmiş bir cihaz yardımıyla çap genişleme testine tabi tutulmaktadır. Test, 100°C ve 140°C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Cihaz kabineine bağlanan hortumların içerisinden bu iki sıcaklıkta, test şartnamelerinde belirtilen basınç değerlerinde sıvı geçirilmiştir. Test sonucunda, ilk ve son çap arasındaki fark ifade edilmiştir. Bu işlem dört farklı kauçuk türü için, iki farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın analiz kısmı iki bölümden oluşmaktadır: FloEFD programında yapılan CFD analizi ve Ansys programında yapılan FEA analizi. Hortum geometrisi, FloEFD programına aktarılarak uygun sınır koşulları belirtilir. Geometri için optimum mesh yapısı oluşturularak analiz başlatılır. Çıkan sonuçlar; test sonucunda elde edilen basınç kaybı ile karşılaştırılarak oluşturulan modelin doğruluğu teyit edilmiş olur. Ayrıca, bu sonuçlar, FEA analizi için girdi niteliğinde olmaktadır.

Ansys programında malzeme bilgilerini doğru aktarabilmek amacıyla kauçuğun elastisite değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Ancak, kauçuklar standart malzemeler değildir. Bu sebeple, kauçuğun malzeme özelliklerini saptamak amacıyla çekme testi yapılmıştır. Dört farklı kauçuk türünden üretilen hortumların üzerinden çekme numunesi kesilmiştir. BTÜ Makine Mühendisliği Laboratuvarında yer alan çekme testi cihaz ile test edilen hortumlara ait stress-strain grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen elastisite modülü ile malzemenin mekanik özellikleri Ansys programına başarı ile aktarılmıştır.

Analiz sonucuna göre tüm hortum türlerinde ortalama 1 mm ile 2 mm arasında genişleme mevcuttur. 100°C’de yapılan çap genişleme test sonucu ve analiz sonucu karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Tahmin edildiği üzere 140°C’de çap genişleme testinden elde edilen genişme miktarı 100°C’de elde edilen sonuçlara göre daha fazladır. Bu durum: ‘‘Sıcaklık ile genişme miktarı arasındaki ilişki doğrusaldır.’’ teorisini kanıtlamaktadır. Ancak 140°C’de yapılan CFD analiz sonuçları ile 100°C’de elde edilen sonuçlar hemen hemen aynı değerlerdedir. Bu nedenle, 140°C’de yapılan çap genişleme test sonucu ve analiz sonucu karşılaştırıldığında elde edilen fark, 100°C’de elde edilen farka göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Kauçuk hortumların dayanabildiği maksimum sıcaklık 150-180°C’dir. Ancak yapılan çalışma göstermiştir ki, bu değerlerden dşuk sıcaklıklarda da kauçuğun yapısında bir miktar deformasyon görülmektedir. Bu nedenle, kauçuk hortumların analizlerde katı cisimmiş gibi modellenmesi, analiz sonuçlarının ve buna bağlı olarak sistemin çalışma koşullarının yanlış yorumlanmasına sebep olmaktadır. En iyi yorumlamayı yapabilmek ve kauçuk hortumların kullanıldığı sistemlerde en iyi performansı elde edebilmek amacıyla deforme olmuş hortuma göre analiz gerçekleştirmek bizi en kötü duruma hazırlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Hortum, kauçuk, FSI, CFD, termal, genişme

THERMAL EXPANSION ANALYSIS OF AIR HOSES PRODUCED FROM DIFFERENT ELASTIC MATERIALS

SUMMARY

This paper was written to examine the thermal expansion analysis of four different hoses of the same geometric shape and dimensions, produced from rubber types with different raw materials. Thermal analyzes are solid-liquid interactive (FSI) analyzes. In the FloEFD program, the pressure value and distribution of the hose geometry were determined. This pressure distribution was transferred to Ansys program and the deformation created by the pressure forces on the hose was examined.

Hoses are made of EPDM, ECO, AEM and NBR/CSM rubber pulps. Manufacturing and test process was carried out in Elatek Rubber which is operating in Bursa Dosab. The dough produced is subjected to the necessary material tests and the dough is subjected to extrusion and vulcanization, after the confirmation.

Produced hoses are subjected to diameter expansion test in the performance test laboratory. Fluid was passed through the hoses at 100°C and 140°C, at the pressure values specified in the test specifications. At the end of the test, the difference between the first and last diameter was expressed. This process was carried out for all hoses.

The hose geometry is transferred to the FloEFD to specify the appropriate boundary conditions and the optimum mesh structure. The results are compared with the pressure loss obtained in the test and thus the accuracy of the model is confirmed. These results are input for FEA analysis.

Rubbers are not standard materials. Therefore, tensile test was performed to determine the material properties of rubber. The tensile specimen was cut over the hoses made of four different rubber types. Stress-strain graphs of the hoses tested with tensile test device were obtained. The mechanical properties of the material were successfully transferred to Ansys with the elasticity module obtained from these graphs.

According to the results of the analysis, there is an average expansion of 1-2 mm in all hose types. When the diameter expansion test and analysis results at 100°C are compared, it is seen that the results obtained are compatible with each other. As expected, the amount of expansion obtained from the diameter expansion test at 140°C is higher than the results obtained at 100°C. This proves the theory that the relationship between temperature and the amount of expansion is linear. CFD analysis results at 140°C and the results obtained at 100°C are almost the same. Therefore, When the diameter expansion test at 140°C and the analysis result are compared, the difference is higher than the difference at 100°C.

The maximum temperature that rubber hoses can withstand is 150-180 ° C. However, the study has shown that some of the deformation of the rubber structure can be seen at lower temperatures. Therefore, the modeling of rubber hoses as solids in the

analysis leads to the misinterpretation of the analysis results and consequently the operating conditions of the system. Performing analysis according to the deformed hose will prepare us for the worst case in order to achieve the best interpretation and to obtain the best performance in systems using rubber hoses.

Keywords: Hose, rubber, FSI, CFD, thermal, expansion



1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışma, farklı kauçuk türlerinin termal (ısı) genleşmelerinin incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmanın test kısımları Elatek Kauçuk Sanayi Ticaret A.Ş. firması ile yürütülmüştür. Hortum üretimi için dört farklı kauçuk hammadde ve hortumların aynı geometriye sahip olması amacıyla tek bir kalıp kullanılmıştır. Üretim tamamlandıktan sonra, hortumlar iki farklı sıcaklıkta firma laboratuvarında çap genişleme testine tabi tutulmuştur. Aynı hortum geometrisinin FloEFD programı ile boru içi akış analizi gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar, Ansys programına aktarılmış ve geometride meydana gelen deformasyon incelenmiştir. Çalışma sonucunda iki çıktıya odaklanabilmek mümkündür: Aynı sıcaklıkta dört farklı kauçuk hortumunun çap genişleme miktarlarının karşılaştırılması ve aynı kauçuk türünden üretilen iki hortumun farklı sıcaklıklarda çap genişleme miktarının karşılaştırılması.

1.2 Kavramlar, Tanımlamalar ve Temel Bilgiler

1.2.1 Termal genleşme

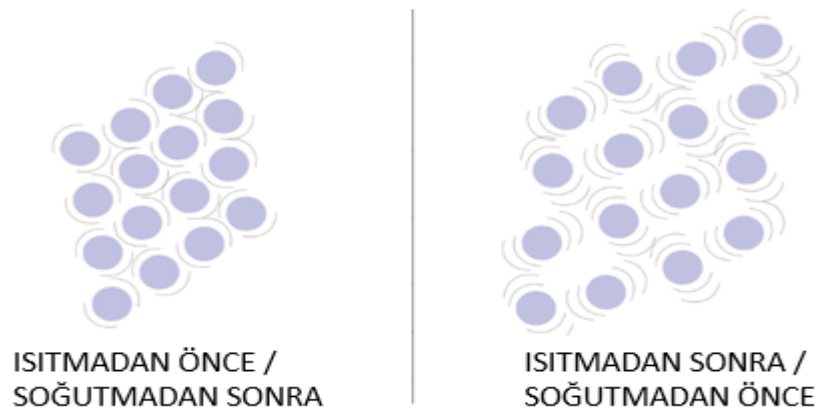
Cisimler veya maddeler ısıya maruz kaldığında hacimlerinde değişiklikler gözlemlenir. Bu durum, cisimlerin veya maddelerin karakteristik özelliklerindedir. Termal genleşme bir cismin sıcaklık değişimi altında, hacminde meydana gelen değişme eğilimidir.

Termal genleşmenin günlük hayatımızda birçok örneği mevcuttur. Örneğin, ev hanımları çok sıkı şekilde kapatılmış metal kavanoz kapaklarını açabilmek için kavanozları sıcak su altında bekletmektedirler. Bekleyen metal kapaklar genişleyerek gevşerler ve kolayca açılırlar. Yıllardır uygulanan bu yöntem metalden üretilen kavanoz kapağının sıcaklığa maruz kalıp hacminin genişlemesine yönelik en basit örneklerden biridir. Durumu incelediğimizde, sıcaklık metal kavanoz kapağı ile kavanoz camının dişleri arasındaki boşluğu arttırmaktadır, böylelikle kapağın

açılması daha kolay hale gelmektedir (The Phenomenon of Thermal Expansion, 2019). Alkollü veya cıvalı termometrenin çalışma prensibi de belirli sıcaklık altında sıvı genişmesine verilebilecek temel örneklerden biridir (Thermal Expansion of Solids and Liquids, 2019).

Demiryolu raylarında ve köprülerde değişen mevsim koşulları sebebiyle genişmeler ve büzülme gözlemlenmektedir. Bu yapılarda oluşabilecek kırılma ya da zarar görme durumunu engellemek amacıyla genişleme derzleri kullanılmaktadır. Genleşme derzleri, sıcaklık karşısında hacim değişikliklerinin serbestçe gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu derzler, yapıların üzerine gelen titreşimi emmek, belirli parçaları bir arada tutmak, zemin yerleşimi veya depremler nedeniyle oluşan harekete izin vermek için tasarlanmış bir ekipmandır (Expansion joints, 2019).

Genleşme mekanizması, molekül aktivitesi ve atomlar arası bağlar ile ilişkilidir. Bir cisim ısıtıldığında her bir atomun kinetik enerjisinde bir artış meydana gelmektedir. Bu durum cismin moleküler aktivitesini arttırmakta ve atomlar arasındaki bağlarda depolanan enerjide artış gözlemlenmektedir. Bu enerji artışı moleküller bağların uzunluğunun artmasına sebep olmaktadır. Bir katı cisim gaz ve sıvı cisimlere göre, daha yakın dizilimde atomlar veya moleküllerden oluşmuştur. Cisim atomlarında meydana gelen ısı karşısında artan kinetik enerjiyi; küçük, hızlı titreşimler formunda komşu atomlara veya moleküllere iletmektedir. Bu durum Şekil 1.1'de gösterildiği gibi atomlar arasında mesafenin artmasına neden olmaktadır. Sıradan şartlar altındaki çoğu madde için, tercih edilen bir yön yoktur ve sıcaklıkta meydana gelen bir artış, katının boyutunu homojen olmayan bir oranda artıracaktır (Thermal Expansion of Solids and Liquids, 2019).



Şekil 1.1: Parçacıkların genişmesi ve büzülmesi.

Katı cisimlerde genleşme boyutsal, alansal ve hacimsel olarak incelenebilir. Sıvı halde bulunan cisimlerde ise genişleme hacimseldir (Thermal Expansion, 2019). Sadece boyutsal değişim göz önüne alındığında genleşme cismin lineer genleşme katsayısına, soğuk haldeki cisim boyuna ve sıcaklık değişimine bağlıdır. Hacim göz önüne alındığında ise termal genleşme malzemeye bağlı hacimsel genleşme katsayısı, ilk hacim ve sıcaklık farkı ile ilişkilidir (Clancy, 2017).

Termal genişleme katsayısı, bir malzemenin ısıtıldığında ne kadar genişlediğini gösteren bir malzeme özelliğidir. Her malzeme, aynı sıcaklık altında farklı miktarlarda genişlemektedir. Küçük sıcaklık aralıklarında, homojen yapıda olan malzemelerin termal genleşmesi, sıcaklık değişimi ile doğru orantılıdır (ASM International, 2002).

Genleşme ve sıcaklıktaki değişim oranı, malzemenin termal genleşme katsayısı olarak bilinmektedir. Termal genleşme hem sıcaklık değerine hem de malzemenin türüne bağlı olan bir özelliktir. Örneğin; bir termometrede alkolün genişlemesi, onu içeren camın genişlemesinden çok daha büyüktür. Cisimlerin termal genleşme katsayılarının, genellikle büyük değişiklikler göstermeyen sabit bir değerde olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte; doğru bir analiz için ilgili tüm sıcaklık ve basınç aralıklarında termal genleşmenin ölçümünün yapılması gerekmektedir. Termal genleşme, değişken sıcaklıktaki ortamlarda bulunan makine parçaları veya yapısal bileşenler için dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Bir makine parçası genişlerse, diğer yapısal parçalar üzerinde baskı yaratarak gerilmelere neden olabilmekte ve muhtemelen arızaya sebebiyet verebilmektedir. Herhangi bir nesnenin deformasyonu, cismin geometrisine ve cisim malzemesinin ısıl genleşme sabitine bağlıdır (Painting, 2017).

Bir termal genleşme olayında bir nesnenin boyutunda meydana gelen değişimin, nesnenin sıcaklığında meydana gelen değişim ile doğrusal orantılı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, sıcaklık değişiminin çok büyük boyutlarda olmadığı durumlarda geçerlidir. Bu doğrusal ilişki denklem 1’de ifade edilmiştir (Thermal Physics: A Macroscopic View, 2019).

$$\Delta L = L_i \alpha \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Genleşmeye uğrayan cismin son boyu; Denklem 1.2’de yer aldığı gibi cismin ilk boyu ve boy değişiminin toplanmasıdır (Thermal Physics: A Macroscopic View, 2019).

$$L=L_i+\Delta L=L_i+L_i\alpha.\Delta T=L_i(1+\alpha.\Delta T) \quad (1.2)$$

Burada;

L= Son boy [mm]

L_i = İlk boy [mm]

α = Termal genleşme katsayısı [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

ΔL = Boydaki değişim miktarı [mm]

ΔT = Sıcaklıktaki değişim miktarı [$^{\circ}\text{C}$]

Eğer cisim belirli bir genişliğe (W) ve yüksekliğe (H) sahip ise cismin alanında meydana gelen değişim ve yeni alan şu şekilde ifade edilebilmektedir;

$$A=H.W=H_i.(1+\alpha.\Delta T). W_i.(1+\alpha.\Delta T) = H_i.W_i.(1+\alpha.\Delta T).(1+\alpha.\Delta T) = A_i.[1+2\alpha.\Delta T+(\alpha.\Delta T)^2]$$

Termal genleşme katsayısının oldukça küçük olduğu malzemeler için $\alpha.\Delta T$ değeri 1’den önemli ölçüde azalmaktadır, dolayısıyla $(\alpha.\Delta T)^2$ terimi, $2\alpha.\Delta T$ terimine kıyasla ihmal edilebilmektedir. Alansal değişim, denklem 1.3’de ifade edildiği gibidir (Thermal Physics: A Macroscopic View, 2019):

$$A=A_i.[1+2.\alpha.\Delta T] \quad (1.3)$$

Hacimsel genleşme miktarı, alansal genleşmeye benzer bir şekilde elde edilebilmektedir. Bu değişim, denklem 1.4’de belirtilmiştir (Thermal Physics: A Macroscopic View, 2019):

$$V=V_i.[1+3.\alpha.\Delta T] \quad (1.4)$$

Belirli sıcaklık değişimine maruz kalan cisimlerin genleşmesi ile ilgili bazı özel durumlar mevcuttur. Çoğu malzeme maruz kaldığı sıcaklığa bağlı olarak doğrusal olarak genişlemekte ve daralmaktadır. Ancak, su 4°C 'nin altında beklenmedik şekilde davranmaktadır. Su soğutulduğu durumlarda 4°C ile 0°C arasında genişlemekte; ısıtıldığı durumlarda ise 0°C ile 4°C arasında büzülme yani hacimsel olarak bir miktar azalmaktadır. Bunun nedeni buz olarak adlandırılan katı

suyun, sıvı sudan daha büyük bir hacme sahip olmasıdır. Bazı malzemelerin belirli bir sıcaklık aralığında ısıtıldığında büzülmesi durumuna negatif termal genişleme denmektedir (Clancy, 2017).

1.2.2 Kauçuk

Kauçuk üzerine kuvvet uygulanıp kaldırıldıktan sonra orijinal haline dönme kabiliyetine sahip olan bir malzeme türüdür. Kullanım alanı olarak; lastikler, kablolar, hortumlar ve giysiler gibi birçok ürün örnek verilebilmektedir. 2017 yılında yayınlanan bir raporda; dünya genelinde toplam kauçuk tüketiminin, 2016 yılında bir önceki yıla göre %1,8 artarak 27,2 milyon tona yükseldiği belirtilmiştir (Rubber Asia, 2017).

En yaygın kullanılan kauçuklara; cis-poliizopren (doğal kauçuk, NR), etilen propilen dien monomer (EPDM), akrilonitril bütadien kauçuk (NBR), Etilen akrilat kopolimerler (AEM), silikon kauçuk (SR), Epiklorohidrin kauçuk (ECO), Klorosülfonatlı Polietilen (CSM) ve kloropren kauçuğu (CR) örnek verilebilmektedir. Sentetik olmayan tek kauçuk türü NR'dir. NR, dünyanın belirli bölgelerinde, özellikle Brezilya, Tayland, Endonezya, Malezya ve Hindistan'da yetişen *Hevea brasiliensis* ağacından elde edilmektedir. Doğal kauçuk olarak adlandırılan bu tür, yüksek aşınma ve yıpranma direncine, elektriksel dirence, asit veya alkalilere ve alkollere karşı kimyasal dirence sahiptir. Ancak ozon, ışık, nem, radyasyon ve ısı gibi çevresel faktörlere karşı hassastır. Günlük hayatta; taşıma bantları, hortum, ayakkabı tabanları, kablo, otomotiv parçaları (contalar, üfleyciler, ön cam silecekleri, paspaslar), ses ve amortisör, zemin kaplamaları, eldiven, balon ve biberon meme ucu üretiminde kullanılmaktadır (Kodal ve diğ., 2019).

EPDM sentetik bir kauçuk türüdür. Yüksek elektrik direnci, mükemmel ısıl yaşlanma ve yüksek ozon direncine sahiptir. Asitlere, alkalilere, ketonlara ve alkollere karşı yüksek direnç göstermektedir. Genellikle hortum, kablo, kayış ve spor malzemeleri imalatında kullanılmaktadır. Ancak EPDM kauçuğu benzin, kerosen ve aromatik ve alifatik hidrokarbonlar gibi çoğu yağlarla uyumsuzluk içerisindedir. EPDM kauçuğunun otomotiv endüstrisindeki çok yönlü uygulamalarını kısıtlayan kutupsuzluğu da diğer dezavantajlarından biridir. NBR kauçuk, genellikle mükemmel yağ direncinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılan bir polar kauçuktur (Kodal ve diğ., 2019).

ECO, epiklorohidrin homopolimeri ve etilen oksitli bir kopolimer içermektedir. Bu kauçuğun uygulama alanları genellikle; yakıt hortumları, hava kanalları, emisyon boruları, elektro-statik dağıtıcı rulolar, düşük sıcaklıkta yakıt taşıma boşaltma hortumu, diyaframlar, contalar, O-ringler, titreşim amortisörleri, toz botları, kapalı hücreli sünger, kumaş kaplamalar ve kayışlardır. AEM kauçuğunun ise güçlü özellikleri; yüksek sıcaklık dayanımı, servis yağlarına karşı gösterdiği yağ direnci, mükemmel su direnci, düşük sıcaklıkta sahip olduğu esneklik, güçlü ozon ve hava direnci, iyi mekanik dayanım, iyi sıkıştırma seti direnci, iyi esneklik direnci, titreşim sönümlenme tutarlılığı, renklendirilebilirlik ve halojen olmayan, düşük duman emisyonudur (McKeen, 2019).

Kauçuk ürünlerinin özellikleri sadece kauçuğun hammaddesinin özelliklerine bağlı değildir. Sentetik kauçuklarda, bir kauçuk bileşimini oluşturmak için hammaddeye karıştırılan çeşitli katkı maddelerine ve bileşenler mevcuttur. Bu kimyasal maddeler, bağlayıcılar, karbon siyahı gibi malzemeler kauçuğun mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla kauçuğa eklenmektedir. Dolayısıyla kauçuğun özelliklerini doğrudan etkilemektedirler. Hammaddelerin özelliklerini geliştirmek için katkı maddelerinin seçimi ve kauçuğa dahil edilmesi kauçuğun kullanılacağı sektöre, kullanım yerine ve kullanım şartlarına bağlıdır (Abitha, 2019).

1.2.3 FSI analizi

FSI (Fluid-structure interaction); akışkan-yapı etkileşimi simülasyonları olarak ifade edilebilmektedir. Bu simülasyonlarda; CFD (Computational Fluid Dynamics) ve FEM (Finite Element Method) analizleri birlikte incelenmektedir. FSI, doğruluğu CFD sonuçlarına büyük ölçüde bağlıdır. Çünkü yapısal analiz için akışkanın yüzey basıncı bilgisi CFD analizinin bir sonucudur (Lee, 2017).

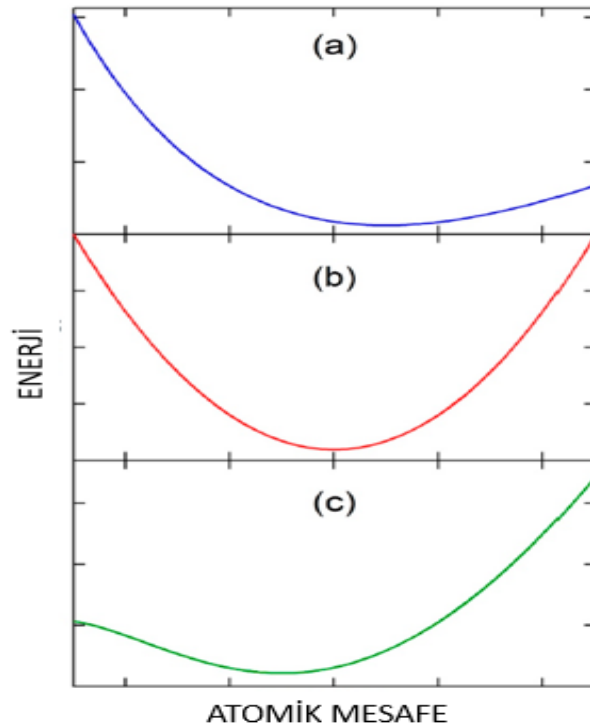
FSI, deforme olabilen bir yapı ile bir iç veya çevre akışkan akışı arasındaki karşılıklı etkileşimdir. Yapının maruz kaldığı akışkan, yapıya deforme olmasına neden olan bir basınç yükü uygulamaktadır. FSI; otomotiv ve havacılık sektörlerinde (kapı contaları, kanatlar), biyomekanik uygulamalarda (kalp kapakçıklarının tasarımı), inşaat sektöründe (yapıların rüzgar yüklemesi) vb. endüstriyel uygulamalarda kullanılan oldukça önemli bir analiz türüdür (Ezkurra ve diğ., 2018).

FSI analizinin yürütme yöntemleri; direkt birleşimli, bir yönlü ve iki yönlü olarak sınıflandırılabilir. Direkt birleşimli FSI yöntemi, aynı anda akış ve yapısal

deformasyon analizlerini hesaplanmaktadır. Tek yönlü bir FSI yönteminde, bir akış analizinin sonucu, yapısal analizin yükleme koşulu olarak uygulanır, sınırdaki etkileşim yalnızca bir kez gerçekleştirilir ve etkileşimli yükleme hesaplamaları yapılmamaktadır. İki yönlü bir FSI yöntemi, büyük ölçüde akışkan kuvvetine bağlıdır ve yapısal deformasyon akışkanlığı etkilemektedir (Bak ve Yoo, 2019).

1.3 Literatür Araştırması

Lui ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada termal genişleme, özellikle belirli sıcaklık altında hacimsel azalma gözlemlendiği durumlarda, teorik tahmini zor olan bir olay olarak tanımlanmıştır. Hacimsel azalma, termal büzülme veya yüksek sıcaklıklarda negatif termal genişleme olarak adlandırılmaktadır. Çalışmada termal genişleme mekanizması şu şekilde ifade edilmektedir; sıcaklık arttığında, atomların kinetik enerjisi artar, atomlar titrer ve hareket eder. Sonuç olarak atomların daha büyük bir ortalama ayrılması gerçekleşir. Bu ayrılma atomun orijininden sapma gibi düşünülebilmektedir. Aşağıda yer alan Şekil 1.2’de atom mesafesinin potansiyel enerji ile ilişkisi (a) termal genişleme, (b) sıfır termal genişleme, (c) termal büzülme veya negatif termal genişleme durumları için verilmiştir (Lui ve diğ, 2017).



Şekil 1.2: Çeşitli durumlardaki atom mesafesi-potansiyel enerji ilişkisi.

[(a) termal genişleme, (b) sıfır termal genişleme, (c) termal büzülme veya negatif termal genişleme durumları]

Termal genleşme olayı otomotiv, havacılık, ulaşım, savunma, gıda makineleri, elektronik gibi birçok alanda önemli bir olgudur. Wong ve Bollampally (1999), elektronik paketleme için seramik parçacıklarla dolu polimer kompozitlerin ısı iletkenliği, elastik modül ve termal genleşme katsayısı üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada silika, alümina ve alüminyum nitrür gibi seramik dolgulu epoksi reçinelerin termal iletkenlik, elastik modül ve termal genleşme katsayısı belirlenmiştir. Numunelerin termal genleşme katsayısı, bir genleşme probu kullanılarak bir Termal Mekanik Analizörde (TMA) (TA Instruments, Model 2940) yapılmıştır. Çalışma sonucu göstermiştir ki, termal genleşme katsayıları arasındaki ilişki büyükten küçüğe sırasıyla alümina, alüminyum nitrür ve silika'dır (Wong ve Bollampally, 1999).

ASM (American Society for Metals) International (2002) yayınladığı bir çalışmada, termal katsayısının belirlenme yöntemlerinden bahsetmiştir. Termal genleşme katsayısını belirlemek için termal bir çevrim geçiren bir numune üzerinde, yer değiştirme ve sıcaklık değerleri ölçülmelidir. Çalışmada yöntemler şu şekilde sıralanmıştır; dilatometre, interferometri ve termomekanik analiz. Bunun yanı sıra optik görüntüleme yöntemi ile, yüksek sıcaklıklarda, X ışını kırınımı, kafes parametresindeki değişiklikleri incelemek için kullanılabilir. Dilatometre; mekanik bir tekniktir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknikte, belirli bir örnek bir fırında ısıtılmakta ve numunenin uçlarının yer değiştirmesi, itme çubukları vasıtasıyla bir sensor yardımıyla saptanmaktadır. Bu yöntemin kesinliği interferometriye yöntemine göre daha düşüktür. İnterferometri tekniğinde ise ölçüm optik girişim teknikleri yardımıyla, örnek uçlarının yer değiştirmesi, tek renk ışığın dalga boyları cinsinden ölçülmektedir. Hassasiyet, dilatometreye göre önemli ölçüde daha yüksektir, ancak teknik, numune yüzeyinin optik yansıtmasına dayandığından, 700°C'nin üzerinde çok kullanılmamaktadır. Termomekanik analiz ölçümleri, bir numune tutucudan oluşan bir termomekanik analizör ve bir prob ile gerçekleştirilmektedir. Bu prob, uzunluktaki değişiklikleri diğer bir deyişle probun hareketlerini elektrik sinyaline çeviren bir dönüştürücüye iletir. Cihaz aynı zamanda homojen ısıtma için bir fırın, bir sıcaklık algılama elemanı, kaliperler ve bir sonuç kayıt aracı içerir. Bu yöntem; doğruluk ve kesinlik ile düşük veya negatif genleşme seviyelerinde kullanılabilir. Uygulanabilir sıcaklık aralığı -120°C ile 600°C arasındadır (ASM International, 2002).

Sleight (1995) tarafından yapılan bir çalışmada ısı karşısında anizotropik malzemelerin davranışları incelenmiştir ve ulaşılan sonuç şu şekilde ifade edilmiştir; neredeyse tüm malzemelerin ısıtıldıkça genişlemesi beklenen bir durumdur, çünkü iki bağlı atom arasındaki interatomik mesafe genellikle artan sıcaklıkla artar. Çalışmada bu genişlemenin nedeni; bağlı atomların birbirine yaklaşması için gereken enerjinin, birbirlerini itmek için kullanması gereken enerjiye göre, daha fazla olması şeklinde ifade edilmiştir. Bu nedenle, termal olarak uyarılmış atomların titreşimleri, daha az enerji gerektiren hareketi gerçekleştirme eğilimindedirler. Dolayısıyla sıcaklığa maruz kamış durumlarda atomlar arası mesafelerde ortalama bir artış gözlemlenmektedir (Sleight, 1995).

Termal genişleme diğer endüstrilerde olduğu gibi açık deniz, petrol ve gaz endüstrisinde de önemli bir kavramdır. Yapılan bir çalışmada, petrol ve gaz endüstrisinde kullanılan boru içi boru ve boru demeti sistemlerinin ısı genleşmesi için kapsamlı bir matematiksel model gerçekleştirilmiştir. Boru içi boru kavramı; eş merkezli yalıtımlı iç boru veya akış hattı ve koruyucu dış borudan oluşan yapılardır. Çalışmada analitik yöntemler, üstel sıcaklık gradyanlarının hem iç hem de dış borular boyunca etkileri, boru uzunluğu, bağlantı makarası, iç boru ağırlığı, deniz yatağı ve ara parçası sürtünmesi, iç ve dış boruların ısı genleşme özellikleri üzerindeki bağıl eksenel sertliği gibi terimleri incelemek için genişletilmiştir. Çalışma sonucunda, basit analitik formüllerinin dış boru sıcaklığı sabit olduğu durumlarda termal genleşme özelliklerini tanımlayabildiği ifade edilmektedir (Bokaiian, 2004).

Sim ve diğ. (2005) tarafından yapılan bir çalışmada; termal olarak iletken, ancak elektriksel olarak yalıtkan Al_2O_3 veya ZnO dolgu maddeleri ile doldurulmuş silikon kauçuğun, bir termal ara yüz malzemesi sınıfı olan elastomerik termal pedler olarak kullanılması araştırılmıştır. Al_2O_3 veya ZnO dolgu maddelerinin silikon kauçuğunun termal iletkenliği ve termal genleşme katsayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Al_2O_3 veya ZnO dolgu maddelerinin artmasıyla birlikte, termal pedlerin termal iletkenliğinin arttığı ve ısı genleşme katsayısının azaldığı ifade edilmektedir (Sim ve diğ., 2005).

Solorio (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, metalik ve termoplastik boru malzemelerini etkileyen doğrusal genleşme ve büzülme kavramları incelenmiştir. Boru sistemlerinin tasarım sürecinde termal genleşme hesaba katılmadıysa, boru

boyalarında dalgalanmaların gözlemlendiği ifade edilmektedir. Eğer sistemde kullanılan boru hattı, her iki ucundan kısıtlanırsa, boyutsal genişleme nedeniyle malzeme üzerinde basınca neden olmaktadır. Bu basınç malzeme üzerinde tolere edilebilen gerilimi aştığında, boruya ve potansiyel olarak braketlere, bağlantı parçalarına ve valflere zarar vermektedir. Bu hasarın kapsamına bağlı olarak, tesislere sık sık onarım yapılmalı, bu süreçte işletimleri kapatılmalı veya zarar görme ihtimali düşünülen boru sistemlerindeki parçalar sık sık değiştirilmelidir. Bu durumlara bir önlem alınmaz ise oluşan maliyet tahmin edilenden oldukça yüksek olabilmektedir. Ortaya çıkan sorunlar, doğru tasarım yöntemleri ile kolayca çözülebilmektedir. Çalışma sonucunda tasarımı etkileyen faktörler lineer genişleme miktarı, çalışma gerilimi, elastikiyet modülü, borunun dış çapı olarak ifade edilmiştir (Solorio, 2018).

Zhau ve diğ. (2007) tarafından yayımlanan bir çalışmada, elastomerik termal ped olarak kullanılan silikon kauçuk, iletken dolgu maddesi olarak bor nitrür tozu ile geliştirilmiştir. Bu dolgu maddesinin içeriği ve partikül boyutunun, silikon kauçuğunun termal özelliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İdeal bir elastomerik termal ped, yüksek termal iletkenliğe ve düşük termal genişleme katsayısına sahip olmalıdır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler göstermektedir ki; bor nitrür dolgu maddesi içeriği arttıkça termal genişleme katsayısında bir azalma gözlenmektedir. Bunun nedeni; dolgu maddesi ile silikon kauçuk matrisi arasındaki mekanik etkileşim olabileceği öngörülmüştür, bu etkileşim matrisin genişlemesini engellemektedir. Çalışma sonucu şu şekilde ifade edilebilir; dolgulu silikon kauçuğu, düşük termal genişleme katsayısı nedeniyle daha uygundur (Zhau ve diğ., 2007).

Zhau ve diğ (2008) tarafından yapılan diğer bir çalışma ise yalnız silikon nitrür (Si_3N_4) partikülleri veya silikon karbür kıllar (SiC_w) ile güçlendirilmiş vinil uçlu polimetilsiloksanın termal özelliklerine odaklanmıştır. Çalışmada termal genişleme katsayısı ölçümü, Standart GB1036-89'a göre lineer genişleme aparatı (Kullanılan aparatın modeli AXT200, Yingkou Instrument Co., Yingkou, Çin) kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular şu şekilde ifade edilebilmektedir: Si_3N_4 / SiC_w dolgulu kauçuk, sinerjik etki nedeniyle, sadece aynı toplam dolgu içeriğinde olan Si_3N_4 partikülleriyle doldurulmuş silikon kauçuktan daha düşük termal genişleme katsayısı değeri göstermektedir. Bu sonuçlara ek olarak çalışmada yüzey işleme faktörünün termal genişleme katsayısına etkisi incelenmiş

olup Şu Şekilde ifade edilmiştir; Si_3N_4 / SiC_w dolgu maddelerinin yzey işleminden sonra, termal genleşme katsayısı, işlem gormemiŐ dolgu maddelerine oranla daha dŐŐktur. unkü yzey işleme, kauçuk malzemede daha iyi bir dolgu dağılımına neden olmaktadır (Zhou ve diğ, 2008).



2. MATERYAL METOT

Yapılan çalışmada, analizler iki ayrı bölümde yürütülmüş ve sonuçları incelenmiştir. Hortum geometrisi data tasarım programları yardımıyla oluşturulup, basınç kayıplarını incelemek amacıyla FloEFD programına aktarılmıştır. Bu program yardımıyla başlangıç koşulları, mesh yapısı gibi özellikler hortum geometrisi üzerinde belirtilmiştir. Analiz sonucu olarak, akışkanın geometri üzerinde oluşturduğu basınç kuvvetleri ve dağılımı tespit edilmiştir. Bu basınç dağılımı Ansys programına aktararak, hortum geometrisinden geçen akışkanın, hortumun yapısındaki genişlemeye diğer bir ifade ile oluşan deformasyona etkisi incelenmiştir. Hortum geometrisinin CFD kısmı FloEFD programında, FEA kısmı Ansys programında yapılarak FSI analizi tamamlanmaktadır.

2.1 CFD Analizi

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD), viskoz akışkan-dinamik denklemini çözmek için kullanılan sayısal bir çözüm tekniğidir. Günümüzün bilgi işlem gücü, CFD kullanarak çok çeşitli problemleri çözebilmektedir. CFD tasarım sürecinin bir parçası olarak geometrideki değişiklikleri hızlı keşfetmek, değişikliklerin direnç ve itme özelliklerini nasıl etkilediğini görmek için kullanılmaktadır. CFD'nin tasarım çalışmalarında uygulanması, daha kısa hesaplama süresine sahip oluşu, daha uygun maliyetli oluşu ve tasarım üzerinde daha fazla deneme yapma fırsatı nedeniyle firmalar için oldukça önemlidir (Handeland, 2015). Sayısal çözüm tekniklerinin ve akışkan dinamiğinin geliştirilmesi, CFD'ye olan ilginin artmasında ve Reynolds-Ortalama Navier-Stokes Denkleminin (RANS) gelişiminde önemli bir faktör olmuştur (Gorski, 2001).

CFD, Navier-Stokes denklemini sayısal olarak çözmeye işlemi tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Akışkan dinamiğinin üç temel varsayımı vardır:

- Kütle korunur
- Enerji korunur
- Momentum korunur

Bu varsayımlar, akışkan akışı için gerekli denklemleri ifade etmektedir: Süreklilik denklemi, Momentum denklemi ve Enerji denklemi. Viskoz akışkan akışı için temel denklem Navier-Stokes denklemidir. Bu denklem, hız gradyanı ve basınç terimi nedeniyle akışkanda gerilme olduğu varsayımı altında, akışkan hareketine Newton'un ikinci yasası uygulanarak elde edilmektedir. Bu denklemin çözümü akışkanın hızı, basıncı, yoğunluğu ve sıcaklığı ile ilişkilidir:

$$u = [u(x, y, z, t), v(x, y, z, t), w(x, y, z, t)]$$

$$p(x, y, z, t)$$

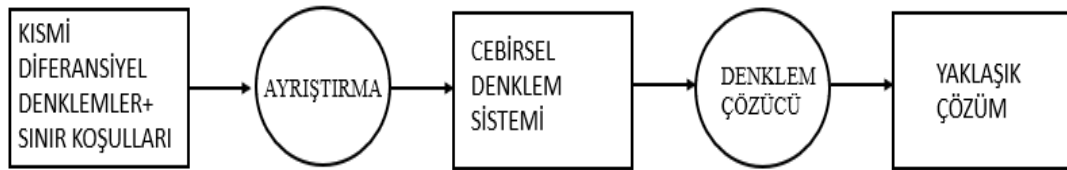
$$\rho(x, y, z, t)$$

$$T(x, y, z, t) \text{ (Handeland, 2015).}$$

Navier-Stokes denklemi, birkaç biçimde yazılabilen bir dizi doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemdir. Denklem, Çengel'den (2010) tarafından ifade edilen sıkıştırılmaz versiyonu şu şekildedir (Çengel, 2010);

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}p + \rho \vec{g} + \mu \cdot \nabla^2 \cdot \vec{V} \quad (2.1)$$

Johannessen (2012) yaptığı bir çalışmada, Navier Stokes (NS) denkleminin iyi bir çözümünü elde edebilmek için akışkanlar mekaniği, matematik, bilgisayar bilimleri, geometrik modelleme ve meshing disiplinleri hakkında bilgi sahibi olunması gerektiğini ifade etmiştir. Çalışmada, işlenen CFD işlemindeki iş akışı Şekil 2.1'de verilmiştir (Johannessen, 2012):



Şekil 2.1: CFD işlemindeki iş akışı.

Denklem çözümünde etki alanını, hesaplamalı bir etki alanı olarak ele alabilmek için alan farklılaştırma uygulanmalıdır. Bu konuda birkaç yöntem mevcuttur, ancak CFD'de en yaygın olarak kullanılan yöntem, Sonlu Hacim Yöntemidir. Bu yöntem sayesinde ilk koşul ve sınır koşullarıyla birlikte, bir bilgisayarın çözebileceği ayrı cebirsel denklemler oluşturulmaktadır. Oluşturulan cebirsel denklem kümesi şu şekilde ifade edilebilmektedir (Handeland, 2015):

$$a_{11}u_1 + a_{12}u_2 + \cdots a_{1n}u_n = b_1$$

$$a_{21}u_1 + a_{22}u_2 + \cdots a_{2n}u_n = b_2$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$a_{n1}u_1 + a_{n2}u_2 + \cdots a_{nn}u_n = b_n$$

Matris hali verilen denklem, $Au = b$ biçiminde bir denklem sistemidir. A katsayı olan bir matris olduğunda, u bilinmeyen değerlerdir ve b (kuvvet, kütle gibi) bilinen değerlerdir. Denklem çözümünde; doğrudan çözümler ve yinelemeli çözümler olarak iki tür çözümler mevcuttur. Doğrudan çözümler, A 'yı tersine çevirerek sistemi doğrudan çözer, ancak bu normal büyüklükteki sistemler için çok yavaştır ve maliyet yüksektir. Çözüm için en iyi yaklaşım, yaklaşık çözüme yinelenen, yinelemeli bir çözümler kullanmaktır (Handeland, 2015).

Sayısal bir metot veya yazılımın başarılı olduğunun kanıtlanabilmesi için, bu metot veya yazılımın bilinen örneklerin doğru çözümünü başarıyla hesaplaması gerekmektedir. Bu hesaplamalarda çözüm doğru, istikrarlı, yakınsak, tutarlı ve korumalı olmalıdır. Eğer sayısallaştırma sıfıra düşme eğilimindeyse ve yaklaşık çözüm kesin çözüme yaklaşırsa; incelenen yöntem, tutarlı bir sayısal yöntem olarak tanımlanabilmektedir. İstikrar ise şu şekilde ifade edilebilmektedir; eğer bir çözümler, ayrıklaştırma nedeniyle ortaya çıkabilecek bir hatayı çoğaltmazsa, bu sayısal çözüm algoritması kararlıdır. Eğer cebirsel denklemlerin çözümü, ağ boyutu sıfıra doğru giderken kesin çözümlerine yöneliyorsa, çözüm yakınsaktır. Koruma terimi ise, denklem çözümlerinin kütle, momentum ve enerji korunma denklemlerine uygunluğunu temsil etmektedir. Doğruluk, çözüm algoritması ve kodunda uygulanan ve sınır koşulları koyarken uygulanan hatalara bağlıdır. Bu bağlamda, dört tür hata ifade edilebilmektedir;

- Modelleme hatası: Gerçek dünya geometrisi ile hesaplama geometrisi arasında bir fark olduğunda veya basitleştirmeler, varsayımlar yapıldığında ortaya çıkar.
- Ayrıklaştırma hatası: Bir teki alanının, hesaplamalı bir etki alanına dönüştürüldüğünde oluşan elemanların veya kontrol hacimlerinin sınırlamalarından kaynaklı hata türüdür.
- İterasyon hatası: Çözüm algoritmasında (ayrık denklemleri çözen işlem) oluşabilecek hatalardan kaynaklanmaktadır.

- Yuvarlama hatası: Donanım ve yazılımın kısıtlamaları nedeniyle karşılaşılmaktadır. Makinenin değerleri saklama ve aktarma kabiliyetinin bir sonucudur.

2.2 FEA Analizi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) yapılar üzerinde hesaplamalar yapmak ve yapısal problemlere odaklanmak amacıyla yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Temelinde sonlu elemanlar analizine (Finite Element Analysis-FEA) dayanmaktadır ve güç hesaplamaları için mükemmel sonuçlar veren oldukça verimli bir metottür. Ancak analiz sonuçlarının, gerçek sonuçlarla mümkün olduğu kadar tutarlı olabilmesi için yapılan analizlere özen gösterilmelidir. Bilgisayar bilimindeki gelişmeler ve modern bilgisayarların kapasitesi nedeniyle, FEM sağlamlığı, kanıtlanmış yetenekleri ve doğruluğu nedeniyle her kesimden insan tarafından yaygın olarak kullanılsa da konuya yönelik olan deneyim ve bilgi, nihai sonucu doğrulamak için oldukça önem taşımaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, kısmi bir diferansiyel denklemin sınır değer problemine yaklaşımını çözmek için kullanılan sayısal bir çözüm tekniğidir. Yöntem yapıyı sınırlı sayıda elemana ayırır ve kalan (residual) denilen bir hata fonksiyonunu en aza indirmeyi amaçlar (Handeland, 2015).

Yapısal problemler için sonlu elemanlar yöntemi çeşitli varsayımlara dayanmaktadır:

- Deformasyonlar küçüktür.
- Yapı, doğrusal ve elastik bir davranış sergilemektedir.
- Katı deformasyonu sırasında boşluk veya örtüşme olmaz (Fish ve Belytschko, 2007).

Fish ve Belytschko (2007) yaptığı çalışmada gerilmeleri; yapıdaki yer değiştirmelere (u) bağlı olarak ifade etmektedir. İfade, hangi tip eleman ve formülasyonlar kullanıldığına göre değişmektedir. Bir boyutlu bar elemanda ilişki şu şekildedir:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial X} \quad (2.2)$$

Burada;

U_x = x yönünde yer değiştirme

ϵ_{xx} = x yönündeki gerinim

İki boyutlu yapılarda matris formu;

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \nabla_s \cdot \mathbf{u} = \nabla_s \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Burada;

γ_{xy} = kayma gerilmesi

$$\nabla_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Bir yapının tüm bölümlerinde bir dengede söz konusudur. Sonlu bir elementin iç kuvvetlere (gerilmelere) ve dış kuvvetlere göre dengesine dayanarak şu ifade incelenebilmektedir:

$$\nabla_s^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \quad (2.5)$$

Burada;

∇_s^T = Transpoz matrisi

\mathbf{b} = Kuvvetler vektörü

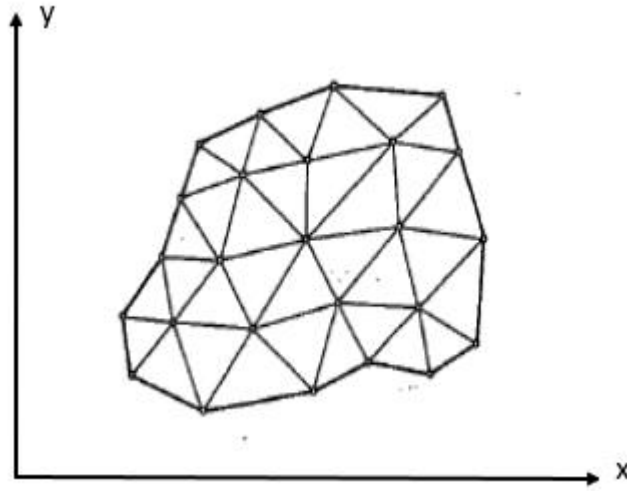
$\boldsymbol{\sigma}$ = gerilim (stress) (Fish ve Belytschko, 2007)

Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) kabaca dört basamağa bölünebilir.

1. Ayrıklaştırma
2. Eleman analizi
3. Sistem analizi
4. Dinamik sistem çözümü

Ayrıklaştırma, yapıyı veya sistemi sınırlı sayıda elemana bölme süreci ile ilgilidir. Bu elemanlar, eleman sınırlarında bulunan düğümlerle birbirine bağlanır. Bu süreçte, hangi tip elemanların kullanılacağına ve gereken doğruluk derecesine karar verilmesi gerekmektedir. Analizi doğru yönetebilmek amacıyla, yüksek kaliteli bir ağ yapısı (mesh) oluşturmalıdır. Bu sebeple, yapının davranışı hakkında bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Yüksek kaliteli bir ağ yapısı oluşturma işlemi kullanıcıdan bilgi

gerektirir ve oldukça zaman alabilir. Bu nedenle, yapının çalışma şekli, maruz kalacağı kuvvetler konusunda sahip olunan deneyim ve bilgi, problemin çözümü sürecinde oldukça önemli bir faktördür. Bilinmeyenlerin sayısı, oluşturulan ağ yapısından tespit edilebilmektedir. Yapısal analizde bu bilinmeyenler; düğüm, yer değiştirmeleri ve rotasyonlar ile temsil edilmektedirler ve sistemin serbestlik derecelerini (DOF'ler) ortaya çıkarmaktadırlar. Örnek bir yapının, ağ yapısı aşağıda verilmiştir (Langen ve Sigbjörnsson, 1986).



Şekil 2.2: Örnek bir yapının sonlu elemanlara bölünmesi (Langen ve Sigbjörnsson, 1986).

Eleman Analizi, bir eleman içerisindeki yer değiştirme, düğüm yer değiştirmesi ve bir enterpolasyon işlevi seti vasıtasıyla tanımlanabilir.

$$U(x, y) = N \cdot v \quad (2.6)$$

Burada;

u= yer değiştirme

v= düğüm yer değiştirmelerini içeren bir vektör

N= enterpolasyon işlevine sahip bir matris

Bu enterpolasyon fonksiyonları, düğüm yer değiştirme ile ifade edilen element içindeki yer değiştirmeyi tarif etmeyi mümkün kılmaktadır.

$$U = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix} = N \cdot v = [N_1 N_2 \dots N_n] \cdot v \quad (2.7)$$

Burada;

$$N = \begin{bmatrix} N_i^1(x, y, z) & 0 & 0 \\ 0 & N_i^2(x, y, z) & 0 \\ 0 & 0 & N_i^3(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

İnterpolasyon fonksiyonları farklı düzen ve özelliklere sahip olabilir. Denklem 1.7'den gerinim ve yer değiştirme arası ilişki dikkate alındığında şu şekilde ifade edilebilmektedir:

$$\varepsilon = f(u) = f(Nv) = f(N)v = Bv \quad (2.9)$$

Hooke yasasında; açıklanan gerilme-gerinme ilişkisinden elemandaki gerilmeleri elde edebiliriz:

$$\sigma = D \varepsilon = DBv \quad (2.10)$$

ε , B , σ ve D vektörlerinin ve matrislerinin büyüklüğü ve içeriği, uygulayacağımız teori veya modele göre değişmektedir. Plaka, kabuk, kiriş veya çubuk elemanları arasında büyük farklılıklar mevcuttur. Bu durum, farklı problem tipleri için farklı enterpolasyon fonksiyonları ve DOF'ler kullandığımız anlamına gelmektedir. Hangi eleman tiplerini kullanmamız gerektiğine karar vermek için, yapının ve beklenen yanıtın temel bir anlayışı çok önemlidir. Virtüel iş prensibine dayalı her elemanın dinamik dengesi şu şekilde kurulabilmektedir:

$$\int_V \delta u^T X dV + \int_S \delta u^T T dS + \delta r^T Q + \delta v^T S - \int_V \delta u^T \rho \ddot{u} dV = \int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV \quad (2.11)$$

Burada S , düğüm yer değiştirmelerine karşılık gelen düğüm kuvvetleri olan bir vektördür.

$$\delta u = N \delta v \quad (2.12)$$

Denklem 2.7, 2.9, 2.10 ve 2.12; denklem 2.11'de yerine yazılırsa:

$$\delta v^T (S + \int_V N^T X dV + \int_S N^T T dS - \int_V \rho N^T N dV \ddot{v} - \int_V B^T D B dV v) = 0 \quad (2.13)$$

$$S = kv + m\ddot{v} + P \quad (2.14)$$

Burada;

$$k = \int_V B^T D B dV \quad (2.15)$$

$$m = \int_V \rho N^T N dV \quad (2.16)$$

$$P = -\int_V N^T X dV - \int_S N^T T dS \quad (2.17)$$

Sistem Analizi, yapıdaki her eleman için rijitlik, kütle ve yük matrislerinin hesaplanıp, toplam yapı üzerindeki etkilerini anlayabilmek için elemanların bir araya getirildiği bir süreçtir. Sınır koşulları da bu adımda uygulanmaktadır. Bu, her eleman düğümündeki DOF'ler arasındaki uyumluluk talep edilerek yapılır. Birkaç eleman arasında paylaşılan bir düğüm için, düğüm yer değişimi eşit olmalıdır. Daha sonra her bir düğümdeki denge sağlanır. Bu uyumluluk şu şekilde ifade edilebilir:

$$v_i = a_i \cdot r \quad (2.18)$$

Burada;

v_i = her elemandaki DOF

r = tüm sistemdeki DOF

a_i = bağlantı matrisi

Her düğümdeki denge;

$$Q = \sum_i A_i^T \cdot S_i \quad (2.19)$$

Denklem 2.14 ve 2.18'den;

$$M \cdot \ddot{r} + K \cdot r = Q \quad (2.20)$$

Burada K, M ve Q sırasıyla sistemin sertliği, kütle matrisi ve yük vektörüdür. Gerilme, denklem 1.22'de yer alan ilişkiden şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$\sigma(x,y,z) = DB(x,y,z) \cdot v \quad (2.21)$$

Dinamik sistem çözümü, sistemin öz frekanslarının bulunması ve yapısal dinamikte sönümleme modelinin kullanılması gibi çeşitli yöntemler ile çözülebilmektedir. Çözümün doğruluğu FEM'in bir araya getirilmesi ile ilgilidir. Bu durum somutlaştırmanın daha hassas ve daha iyi hale geldiğini ve tam çözüme yaklaştığımız anlamına gelmektedir. Elementler şu gereklilikleri yerine getirebiliyorsa yakınsama sağlanır:

1. Uyumluluk

- Yer değiştirme alanı eleman içerisinde sürekli olmalıdır.
- İki eleman arasındaki sınırın üzerindeki gerinim sonlu olmalıdır.

2. Tamlık

- Yer değiştirme modeli (enterpolasyon fonksiyonları) katı cisim hareketini tanımlayabilmelidir.
- Yer değiştirme modeli, eleman içindeki sabit gerilimi tanımlayabilmelidir.

3. Değişmezlik

- Bir elemanın tepkisi, küresel koordinat sistemindeki konumla ilgili olarak bağımsız olmalıdır.

Analiz sürecinde karşılaşılabilecek hatalar üç grup altında toplanabilmektedir:

- Modelleme hatası: Matematiksel denklemlerin ve varsayımların seçimi nedeniyle ortaya çıkan hatalardır. Bu varsayımlar eleman tipi (ince levha, kalın levha, kiriş, kabuk, katı), elastik model, doğrusal olmayan veya sönümleme modelinin kullanımı ile ilişkilidir.
- Ayırıklaştırma hatası: Yapıyı elementlere böldüğümüzde, doğru bir çözüm elde etmek için yeterince ince bir ağ yapısına ihtiyacımız vardır. Bu hata, ağ yapısı incelidikçe sifira yaklaşmaktadır.
- Bilgisayar hatası: Bu tür hatalar, bilgisayarların depolama kapasitesi ve yalnızca sınırlı sayıda basamak depolayabilmesi nedeniyle ortaya çıkar. Bu hata türleri, ağ yapısı küçüldüğünde önem kazanmaktadır (Handeland, 2015).

2.3 FSI Analizi

Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI), bir sıvı-katı sınır ile bir gaz-katı sınır arasında karşılıklı bir etkileşim olduğu durumlarda kullanılan analiz yöntemidir. Bu analiz türünde, iki alan arasında bir eşleşme mevcuttur ve tatmin edici sonuçlar elde etmek için, problemin etkileşimde olan alanların eşleşmiş şekil ile çözülmesi gerekmektedir. Akışkan, yapıyı basınç kuvvetleri vasıtasıyla etkilemektedir ve yapı, akışkanı yapısal deformasyonlar yoluyla etkilemektedir. Akışkan-yapı etkileşimi analizi çeşitli problemlere uygulanabilmektedir. Bu uygulamaların başlıca örnekleri; otomotiv sektörü, inşaat sektörü, ulaşım sektörü, sağlık sektörü (yapay kalp kapakçıkları), paraşütle atlama veya rüzgar türbinlerinin analizidir (Zienkiewicz ve diğ., 2013).

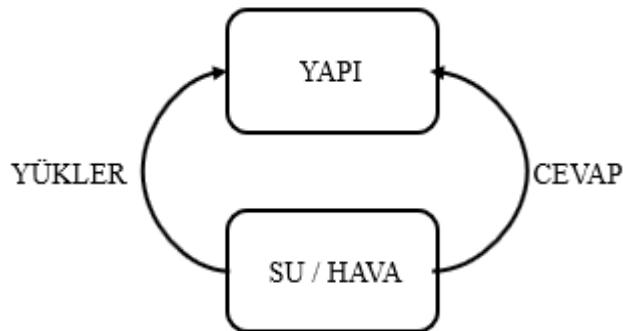
Genel bir FSI analizinde, akışkanın davranışı CFD hesaplamaları ile, katının davranışı FEA hesaplamaları ile çözülmektedir. Bu iki çözüm alanı, sayısal akışkan-yapı etkileşimi analizi için temel oluşturmaktadır (Handeland, 2015).

FSI problemleri üç ana başlık altında incelenebilmektedir:

- Tek Yönlü Etkileşim
- İki Yönlü Etkileşim
- Dinamik Mesh Gelişimi

Tek yönlü etkileşim, akışkan ve katı arasında küçük bir etkileşim olduğu durumlarda gözlemlenmektedir. Bu durum, akışkanın yapıya bir miktar tepki verebileceği anlamına gelmektedir. Ancak akışın bu tepkiye cevap olarak gösterdiği tepki, akışını değiştirecek kadar önemli büyüklükte değildir. Klasik bir örnek olarak, içten yanmalı bir motordaki bir pistonun analizi verilebilir. Piston, motordaki akış üzerinde büyük bir etkiye sahiptir, ancak akışkan pistonu deforme etmez. Tek yönlü bir etkileşim algoritma olarak, yalnızca bir koddan diğerine bilgi gönderdiğimiz anlamına gelir (Zienkiewicz ve diğ., 2013).

İki yönlü etkileşimde akışkan basıncı ve kayma kuvvetlerinin, katıda (veya katı cisim hareketinde) bir deformasyona neden olduğu ve bu deformasyonun akışkan akışında bir değişikliğe yol açtığı gözlemlenmektedir. Bu durum, tatmin edici bir çözüm elde etmek için çözümü yinelememiz gerektiği anlamına gelmektedir. Bereznitski yaptığı bir çalışmada (2002), iki yönlü etkileşimi iki kod arasında bilgi gönderen bir çevrim olarak Şekil 2.3’de ifade etmiştir:



Şekil 2.3: İki yönlü bir bağlantı şemasının şematik çizimi (Bereznitski, 2002).

Dinamik Mesh Gelişiminde; oluşturulan ağ dokusunun deformasyonu gerekmektedir. Bu, ağ yapısını, yapının hareketine uygun şekilde uyarlamak için bazı teknikler

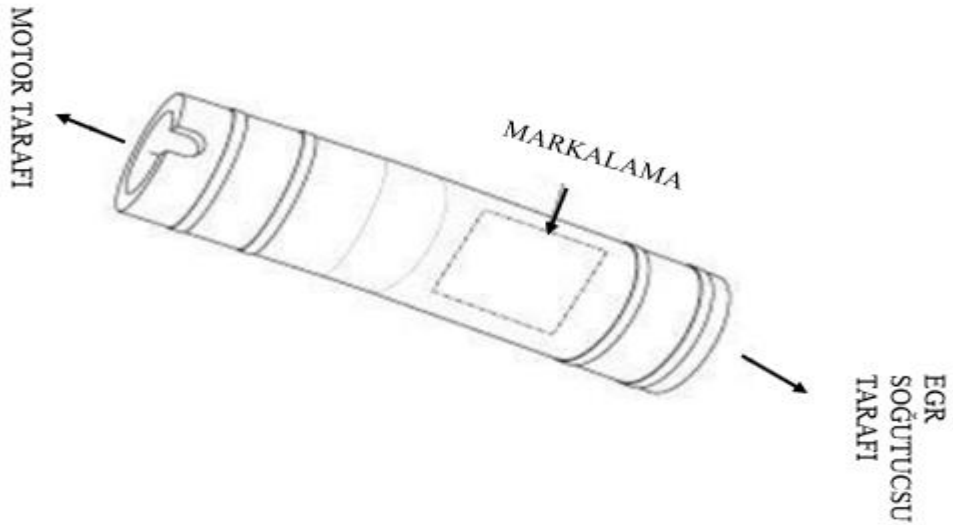
uygulanması gerekmektedir. Bilinen en yaygın teknik, morphing (kesintisiz dönüşüm) tekniğidir. Bu teknik, belirli sayıda modu içe aktarmanıza izin vererek, modelin CFD altında elastik olarak deforme olma yeteneğini ifade etmektedir (Ansys Fluent, 2018).



3. DENEYSEL METOT

Yapılan çalışmada; farklı kauçuk türlerinin termal genişmesinin doğru saptanabilmesi ve bu değerlerin doğru şekilde karşılaştırılabilmesi amacıyla, tek bir kalıp kullanılarak hortumların geometrisinin aynı olması sağlanmıştır. Ayrıca, hortum üretiminde kullanılan tüm hamurlar aynı laboratuvarında, aynı çevre koşulları altında imal edilmiştir. Hortum üretimi tamamlanana kadar gerçekleştirilen tüm üretim prosesleri aynı parametreler ile gerçekleştirilmiştir. Üretim ve test işlemleri Elatek Kauçuk Sanayi Ticaret A.Ş. firma bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yer alan “Firma” ifadesi Elatek Kauçuk Sanayi Ticaret AŞ’yi temsil etmektedir.

Çalışmada incelenen hortumlar, Fiat araçlarında yet alan, motor ile EGR soğutucusunun arasında konumlandırılmış gerçek koşullarda kullanılan hortumlardır. EGR soğutucusu; içten yanmalı motorlarda, egzoz gazı devridaimi olarak kullanılmaktadır ve amacı motorlarda kullanılan azot oksit (NOx) emisyonlarını azaltmaktır. EGR, bir motorun egzoz gazının bir kısmını motor silindirlerine geri döndürerek çalışır. Hortumlar, hava hortumudur ve bir sistem parçasıdır. Hortumların araç üzerindeki, yeri orijinal teknik resim üzerindeki Şekil 3.1’deki gibi verilmiştir:



Şekil 3.1: Hortumların, araç üzerinde kullanıldığı konum.

Çalışmada incelenecek kauçuk hamuru, firma bünyesinde en yaygın olarak talep alan ve kullanılan dört farklı kauçuk tipi baz alınarak seçilmiştir. Bu kauçuk hamur türleri; EPDM, ECO, AEM ve NBR/CSM'dir. Çap genişleme testinden daha iyi sonuçlar elde edebilmek amacıyla, hortum iki radyüslü düz alanlı bir kalıba bağlanmıştır. Üretilen hortumlar, FIAT araçlarında kullanılan hortumlarıdır. Bu sebeple hortumların çap genişleme testlerinde uygulanacak metot FIAT şartnamesi baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu hortumlar, firma bünyesinde özel olarak yaptırılan çap genişleme, basınç düşümü saptama test cihazı ile test edilmiştir. Bu cihaz sıvı tahriklidir. Bu sebeple, hortumların içerisinden geçen akışkan su olarak belirlenmiş, testler ve analizler bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir.

3.1 Hortumların Üretimi

Elatek firmasında hortum üretimi, kauçuk hamurunun üretimi ile başlamaktadır. Kauçuk hamurları, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren ana sanayi veya yan sanayi olarak nitelendirilebilen firmaların istekleri, proje gereklilikleri ve aracın çalışma koşullarına uygun olarak hazırlanan reçetelere göre üretilmektedir. Bu reçeteler her proje, araç tipi veya çalışma koşulu için farklılık göstermektedir. Kauçuk hamuru, kauçuk ham maddesinin, çeşitli kimyasal karışımların ve bağlayıcı malzemelerin otomasyon sistemi ile belirli oranlarda karıştırılması sonucu oluşturulmaktadır. Çalışmada kullanılan kauçuk hamurunun reçetesi, firma gizliliği nedeniyle açıklanamamaktadır. Kek hamurunu anımsatan karışım homojen olması amacıyla mikser görevi gören büyük karıştırıcılardan geçerek ince şeritler haline getirilmektedir. Bu şeritlerden belirli standartlarda alınan numuneler firma bünyesinde yer alan malzeme laboratuvarında; çekme, kopma, yoğunluk, ozon dayanımı, kat yapışma, soğuk esneklik, yüksek gerilimli ani şok direnci deneyi gibi birçok deneye tabi tutulmaktadır. Test sonuçlarına göre uygun değerlere sahip olduğu onaylanan kauçuk hamuru bir sonraki işlem için ekstrüzyon hattına gönderilmektedir.

Kauçuk ekstrüzyon bir üretim yöntemidir ve kauçuk hamuru karışımının bir kalıptan belirli bir basınç altında akması veya şekil değiştirmesi olarak tanımlanabilmektedir. Firmada, Şekil 3.2'de yer alan, üç istasyonlu ekstruder olarak adlandırılan bir makine ekstrüzyon prosesinde kullanılmaktadır. Kauçuk hamuru bu makinenin ilk istasyonunda, uygun çaptaki kalıplar yardımıyla dairesel profilde uzun şeritler haline

getirilmektedir. Çalışmada kullanılan NBR/CSM hortum tipinde sadece, ilk istasyonda iki ayrı hamur besleme yapılarak iki katlı bir şerit oluşturulmaktadır.



Şekil 3.2: Ekstruder makinesi.

İlk istasyon çıkışında bir kat kauçuktan oluşan dairesel kesitli hamur şeridi, ekstruderin ikinci istasyonunda Şekil 3.3'te gösterildiği gibi bir kat örgü işlemine maruz kalmaktadır. Bu örgü işleminde kullanılan iplikler, bobinler halinde dışarıdan satın alınan aramid ipliklerdir. Hortumun çapına ve çalışma koşullarına göre iplik kalınlığı değişmektedir. Bu işlem hortumun, çalışma koşullarında maruz kalacağı basınç altında daha yüksek dayanıma sahip olması amacıyla gerçekleştirilmektedir. Örgü işleminin ardından ekstruderin üçüncü istasyonunda, birinci kat gibi kauçuk hamuru dairesel uzun şeritler halinde üzerine kaplanmaktadır. Bu katman, hortumun dış katmanıdır. Üretilen hortum pişmemiş halde düz silindirik borular şeklinde, bir sonraki operasyon olan vulkanizasyon operasyonunun yapılacağı alana kasalar ile gönderilmektedir. Hemen operasyona alınmayan hortumlar soğuk bekleme odası adı verilen bir oda da geçici olarak depolanabilmektedir.



Şekil 3.3: Hortum örgü katmanı.

Ekstrüzyon işlemi sonucunda oluşan uzun şeritler uygun boylarda kesilerek kasalara konulup vulkanizasyon işlemi için kazanlara gönderilmektedir. Her kauçuğun çekme payı, kauçuğun hamuruna ve hortum geometrisine bağlıdır, çekme miktarı birkaç deneme sonucunda belirlenmektedir. Vulkanizasyon işlemi; kauçuğun, kükürt veya diğer eşdeğer kürleyicilerin ilavesiyle daha dayanıklı malzemelere dönüştürülmesi için kullanılan kimyasal işlemdir. Bu proste düz silindir halindeki pişmemiş hortumlar, nihai hortum geometrisine uygun kalıplara takılarak, büyük boyutlu kazanlarda, belirli bir basınç ve sıcaklık altında pişirilmektedirler. Pişmemiş hortumlar oldukça mukavemetsiz bir yapıdadırlar. Bu sebeple, pişmemiş haldeki bu hortumların kalıplara takılma işlemi fazla güç gerektirmeden operatör tarafından kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. İşlem sonrası pişen hamurun kalıba yapışmasını önlemek amacıyla özel bir yağ ile kalıplar her operasyon öncesi yağlanmaktadır. Kullanılan yağ, sıcaklığa ve basınca karşı yüksek dirençli bir yapıdadır ve kauçuğun cinsine göre farklılık göstermektedir. Pişme operasyonu sırasında ayarlanan tüm parametreler, basınç, sıcaklık ve işlem süreleri, bir bilgisayar programı yardımı ile kontrol altında tutulmaktadır. Parametrelerde dış kaynaklı bir değişiklik yaşandığında ya da parametreler belirlenen tolerans aralığından saptığında, sistem uyarı vermektedir. Firma gizliliği sebebiyle bu parametreler açıklanamamaktadır. Yapılan çalışmada kullanılan pişirilmemiş düz silindir halindeki hortumlar (a) ve nihai hortum geometrisini oluşturan kalıplar (b) Şekil 3.4'te yer almaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3.4: (a) Pişmemiş kauçuk hamuru ve (b) hortum kalıbı.

Vulkanizasyon işlemi sonrasında şekil alan kauçuk hortumlar, yıkama işleminden geçirilerek üzerlerindeki fazla yağdan veya kirden arındırılmaktadır. Montajsız hortumlarda en son işlem tanımlama markalamasıdır. Standartlara ve özel isteklere göre belirlenen tanımlama yazısı inkjet boya makineleri ile hortumların üzerine uygulanmaktadır. Çalışmada kullanılmak amacıyla üretilen dört farklı hortuma, karışmaması için malzeme cinsine göre tanımlama markalaması yapılmıştır. Şekil 3.5'te ekstrüzyon, vulkanizasyon ve markalama işlemi sonucu üretilen hortumlar yer almaktadır. Her yeni projede üretilen hortumlar çap genişleme, basınç düşüşü, uzun ömür testi, vakum testi, patlatma testi gibi aracın çalışma koşullarını simüle eden bir takım performans testlerine tabi tutulmak amacıyla firma bünyesinde yer alan performans laboratuvarına gönderilmektedir. Test sonuçlarının uygun olması durumunda hortumlar sevkiyat için lojistik departmanına gönderilmektedir. Böylelikle, üretim süreci tamamlanmaktadır.



Şekil 3.5: Prosesler sonucunda üretilen hortumlar.

3.2 Hortumların Test Edilmesi

Üretilen hortumlar, test edilebilmeleri amacıyla firma bünyesinde yer alan performans laboratuvarına gönderilmektedir. Laboratuvarda yer alan test cihazı firma ihtiyaçlarına uygun olarak, test cihazları ve makineleri imal eden bir firma tarafından üretilmiştir. Test cihazı; çap genişleme ve basınç düşüşü ölçümü başta olmak üzere, vakum, patlatma ve tapan atma testlerini de gerçekleştirmektedir. 2010 yılında imal edilen cihazın çalışma aralığı, basınç parametresi için 0-40 bar ve sıcaklık parametresi için 0-150°C'dır. Cihaz hassasiyeti $\pm 0,01$ bar ve $\pm 0,1^\circ\text{C}$ 'dir. Cihaz, iki ana bölmeden oluşmaktadır. Bölmelerden biri hortumların bağlandığı kabindir. Oldukça geniş olan kabin, firmada üretilen her hortum boyutuna uygundur. Üstten açılan bir cam kapağı sayesinde test sırasında hortumlar görülebilmektedir. Kapakta yer alan sensor sistemi, kapağın tam kapatılmadan testin başlamasına engel olmaktadır. Cihazın diğer bölümü ise, cihazın çalışmasını sağlayan motorların, pompaların ve kabloların yer aldığı bölümdür. Ayrıca cihazda ilerlemeyi takip edip, sonuçları görebileceğimiz bir bilgisayar sistemi yer almaktadır. Cihazın fotoğrafı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6: Çap genişleme test cihazı.

Test, dört farklı tür kauçuk hortumu için iki farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Birinci grup olarak adlandırılan birer adet EPDM, ECO, AEM ve NBR/CSM hortumları 100°C derecede test edilirken, ikinci gurubu oluşturan birer adet EPDM, ECO, AEM ve NBR/CSM hortumları 140°C derecede test edilmiştir. Bu durum, aynı sıcaklık değerinde farklı kauçuk hortumların çap genişlemesini ve aynı kauçuk türünün farklı iki sıcaklıktaki çap genişlemesini incelememize olanak sağlamaktadır.

Hortumları, cihaza bağlamadan önce kabin 100°C'ye ısıtılmıştır. Bunun amacı, hortumun iç ve dış sıcaklığını aynı seviyeye getirerek, kabin ve hortum arasında meydana gelebilecek bir ısı transferini engellemektir. Hortuma; iki ucundan da vidalı kelepçe ile iki adet tapa monte edilmektedir. Bu tapalar, hortumu cihaza bağlarken, sıvı aktarımının sızıntısız olmasını sağlamaktadır.

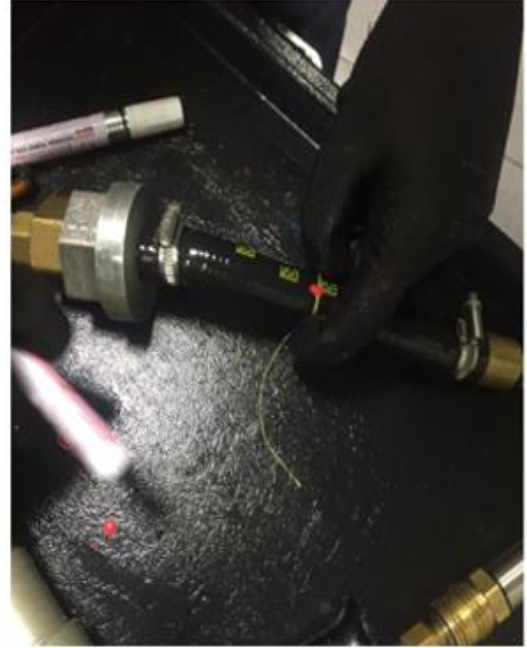


Şekil 3.7: Vidalı kelepçe ile monte edilmiş tapalı hortum.

Test başlamadan önce üretilen hortumun ilk çapının ölçülmesi gerekmektedir. Bir iplik yardımıyla hortumun dış çevresi ölçülüp, kaydedilmektedir. Bu yöntem, FIAT şartnamelerinde tanımlanmış olup, pratik ve uygun maliyetli olduğu için firma tarafından tercih edilmektedir. Bu yöntemde iplik hortumun dışarısına tek kat olarak bağlanıp ve ipliklerin birleşme noktaları işaretlenmektedir. Daha sonra bu işaretlerin arası ölçülmektedir. Böylece ısıl genişleme öncesi hortumun çevresi buna bağlı olarak da ilk çapı tespit edilmektedir. Bu proses, Şekil 3.8’de ifade edildiği gibidir:



(a)



(b)

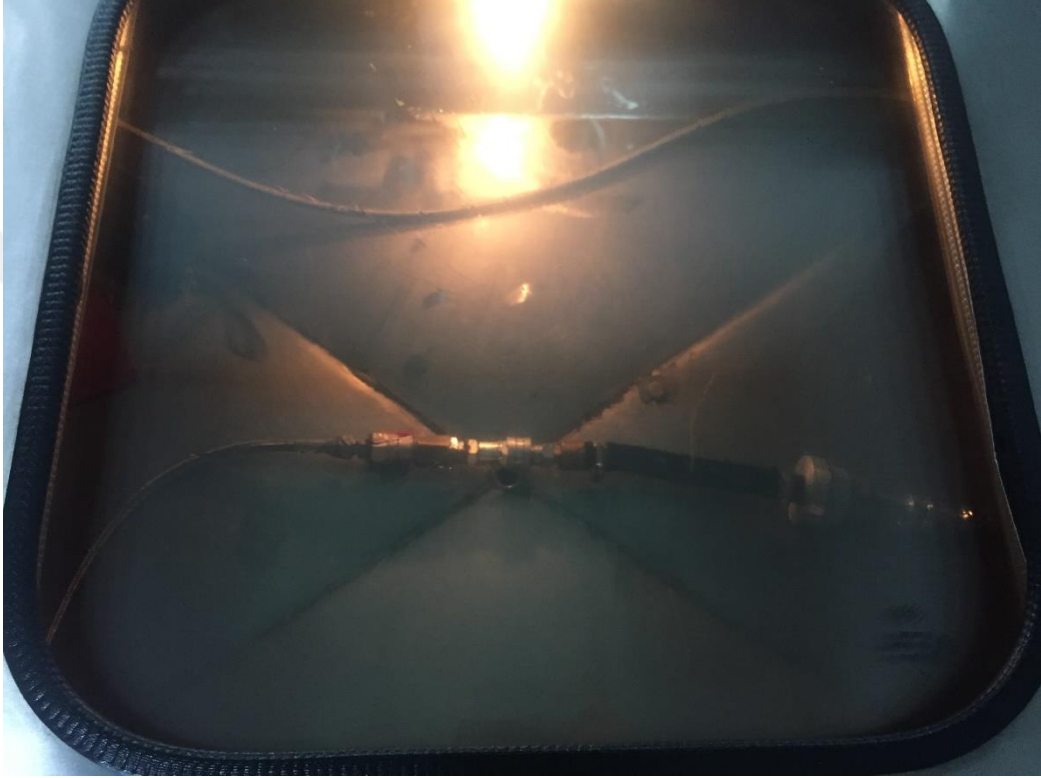


(c)

Şekil 3.8: Çap genişleme testi öncesi hortumun ilk çapını belirlemek amacıyla yapılan proses.

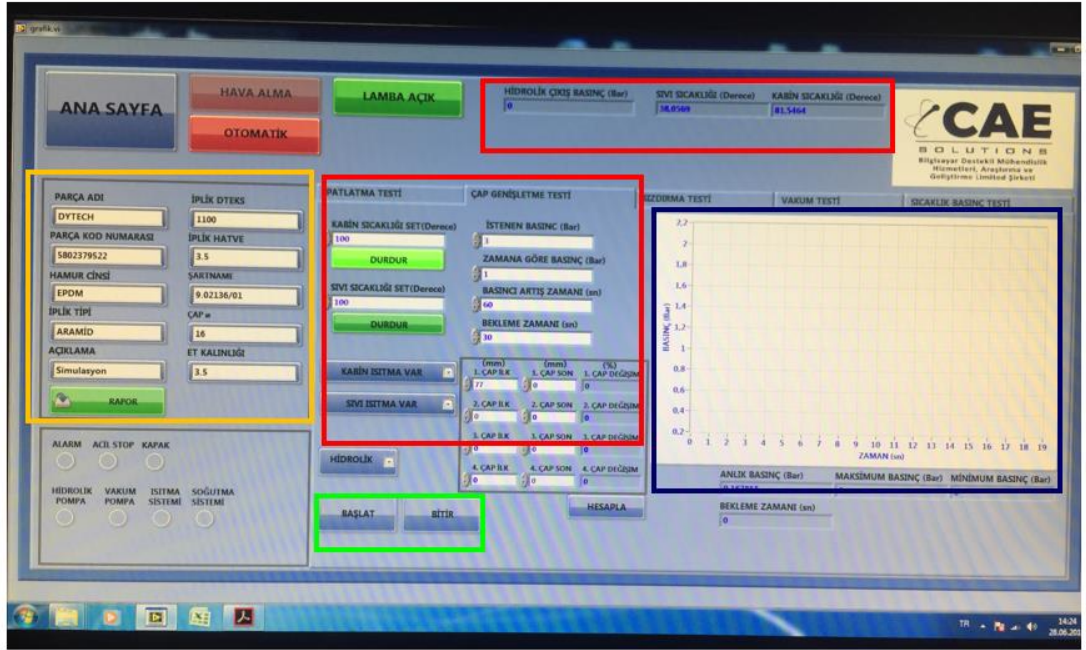
[(a) Hortumun çapını ölçmek amacıyla bir ip hortumun çevresine bağlanır (b) İpin birleştiği alan renkli kalem ile işaretlenir (c) İp açıldığında iki işaretli nokta arası hortumun çevre uzunluğu olur ve cetvel yardımıyla bu noktalar arası mesafe ölçülür.]

İlk çapı not edilen hortum, termal genişleme işlemi için çap genişleme test cihazına bağlanmaktadır. Gerekli parametreler, ilgili FIAT şartnamesi ile belirlenmektedir. Şartnameye göre; hortum basıncı 3 bara kadar dakikada 1 bar arttırılmaktadır. Hortum ölçülmeden önce maksimum basınçta (3 barda) 30 saniye bekletilmektedir. Şekil 3.9'da kabin içerisinde cihaza bağlanan hortum yer almaktadır. Bu parametreler cihaza bilgisayar yardımıyla aktarılmaktadır.



Şekil 3.9: Test sırasında kabin içerisine bağlanan hortum.

Test, cihaza bağlı bilgisayar ekranından başlatılabilmekte, herhangi bir acil durumda ise yine cihaz ara yüzü üzerinde yer alan “Bitir” butonuyla durdurulabilmektedir. Ayrıca test süresince, ilerleme ve sonuçlar bu ara yüz sayesinde izlenebilmektedir. Bekleme süresi tamamlandıktan sonra cihaz, “Bekleme süresi tamamlanmıştır. Ölçüm yapabilirsiniz.” şeklinde bilgilendirme mesajı vermektedir. Ara yüz dört ana bölümden oluşmaktadır: Parça bilgilerinin yer aldığı bölüm, Test parametrelerinin yazılacağı bölüm, Başlat-Bitir gibi komutların yer aldığı bölüm ve Anlık basıncın zamana karşı değişimini ifade eden bir grafiksel bölüm. Test sonuçlarını, Excel formatında rapor olarak almak mümkündür. Cihaza bağlı bilgisayar ekranının ara yüzü Şekil 3.10'da yer almaktadır:



Şekil 3.10: Cihaz kontrol ara yüzü.

[Mavi Bölge: basınç-zaman grafiği, Kırmızı Bölge: basınç ve sıcaklık parametreleri, Sarı Bölge: Hortum bilgileri, Yeşil Bölge: Başlat-Bitir butonu]

Test tamamlandığında, hortumun çevresi aynı yöntem ile, hortum kabinden çıkarılmadan ölçülmektedir. Elde edilen son çevre değeri program ara yüzüne kaydedilmektedir. Cihaz programı otomatik olarak çap artışıını, iki çevre değeri kullanılarak yüzde olarak hesaplamaktadır. Hortumlar dairesel yapıda oldukları için, hortumların çevresinde meydana gelen artışın yüzdesi ve çapında meydana gelen artışın yüzdesi aynı değeri ifade etmektedir. Test sonucunda “Rapor” butonuna basarak ilk ölçüm, son ölçüm değerleri, değişim yüzdesi ve basınç değişim grafiği Excel formatında elde edilebilmektedir.

Aynı işlemler, 100°C derecede diğer kauçuk türleri olan ECO, AEM ve NBR/CSM hortumları için tekrarlanmaktadır. Daha sonra kabin ve sıvı sıcaklığı 140°C derecede ısıtılıp EPDM, ECO, AEM ve NBR/CSM hortumları için test tekrar edilmiştir. Her test cihazı kapağı açıldıktan sonra, kabinde oluşan ısı kaybının giderilmesi amacıyla kabin tekrar test sıcaklıklarına (100°C ve 140°C'ye) ısıtılmaktadır. Böylelikle, kabin ve hortum arasında herhangi bir ısı transferinin meydana gelmesi önlenmektedir. Test sonuçları ayrı rapor halinde elde edilmiştir.

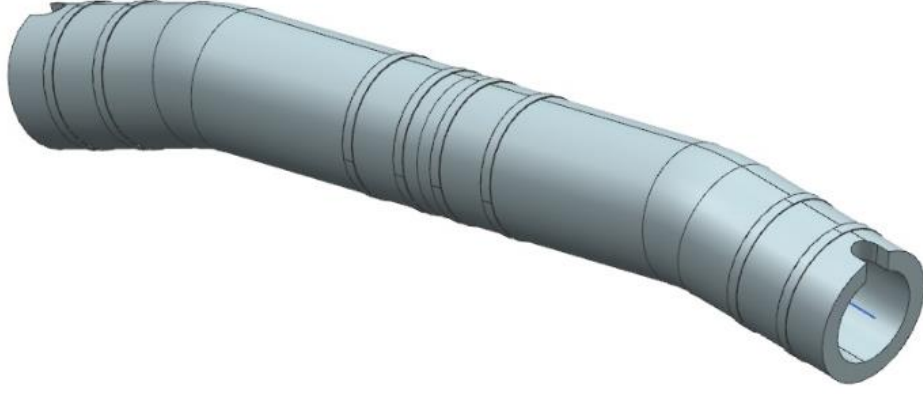
4. ANALİZLER

Çalışmada yapılan analizler iki farklı programda gerçekleştirilmiştir: FloEFD ve Ansys. Hortum geometrisi “.stp” versiyonda FloEFD programına aktarılmış ve gerekli parametreler ayarlanarak, hortum üzerine etkiyen basınç dağılımı tespit edilmiştir. FloEFD programından elde edilen sonuç dosyası, Ansys programına aktarılmıştır. Bu program sayesinde hortum üzerinde oluşan basınç kuvvetlerinin, hortumun şeklini hangi oranda değiştirdiği tespit edilmiştir.

4.1 Geometrinin Tanımlanması

Hortum geometrisi, otomotiv üreticisi firma tarafından aracın diğer ekipmanlarına uygun şekilde tasarlanmaktadır. Tasarımdaki önemli nokta iki ekipman (veya hortum geometrisine göre daha fazla sayıda ekipman) arası akışkan akışının sorunsuz yerine getirmesidir. Bu sebeple, hortumun uçları bağlantı yerleri ile doğru çapta olması gerekmektedir. Hortum et kalınlığı, hortumun araç içerisindeki çalışma koşullarına göre seçilmektedir. Yüksek basınçlı kauçuk hortumlarda 4-5 mm'ye kadar et kalınlığı mümkün olabilmektedir. Alçak basınç altında çalışan hortumların et kalınlığı ise genel olarak 3-3,5 mm arasındadır. Bu et kalınlığının; 2,6-2,7 mm'si ilk katman kauçuk ve 0,8-0,9 mm'si son katman kauçuktur. İki kauçuk katmanı arasında aramid iplikten örgü katmanı yer almaktadır. Hortum geometrisi oluşturulurken, hortumun kalıptan sorunsuz çıkmasına dikkat etmek gerekmektedir. Dolayısıyla, hortum geometrisinin çok fazla radyus içermeyen bir yapıda olması, üretim için avantajlı olmaktadır. Oluşturulan geometri aynı zamanda diğer çevre ekipmanlara yeteri kadar uzak mesafede yer alması gerekmektedir. Bu durumun sebebi, aracın yoldan gelen titreşimleri sebebiyle hortumların çevre ekipmana çarpıp zarar görmemesidir.

Yapılan çalışmada odaklanılan hortum modeli; 181,4 mm uzunluğunda 16,5 mm iç çapa sahip ve et kalınlığı 3,5 mm'dir. Geometrik modelin tasarım programında yer alan görüntüsü Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1: Hortumun geometrik modeli.

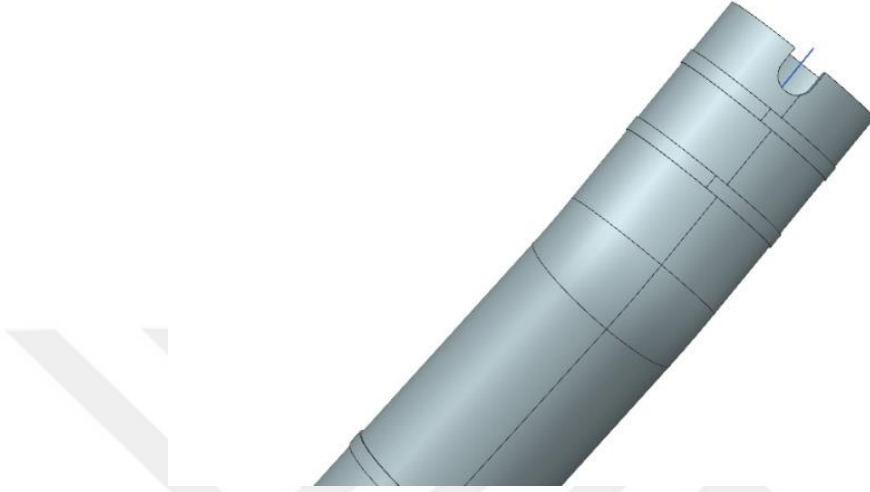
Hortumun, üretim sonrasında geometrik model ile aynı olması amacıyla kalıp üretimi, müşteri firma tarafından gönderilen tasarım üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hortum kalıbı, hortumun geometrik modeli ile aynı şekle sahip içi dolu bir silindir olarak düşünülebilir. Ancak boyutsal olarak hortumun iç çapından ve boyutundan belirli bir oranda daha büyük değerlere sahiptir. Bu büyüklüğün sebebi, hortumun vulkanizasyon işlemi sonrasında bir miktar büzülmesidir. Bu parametre çekme payı olarak adlandırılmaktadır. Çekme payının oranı, firma gizliliği nedeniyle çalışmada ifade edilememiştir. Hortum kalıbının geometrik şekli, Şekil 4.2’de yer almaktadır:



Şekil 4.2: Hortum kalıbının geometrisi.

Geometrik modelin üzerinde yer alan, Şekil 4.3’te belirtilen çentik ve çevresel markalama özellikleri, hortumun araç üzerinde montajını kolaylaştırmak amacıyla ek operasyonlar ile yapılmaktadır. Çentik boyutu, teknik resimlerde belirtilen ölçülerde olmalıdır, böylelikle monte olacağı ekipmana bire bir oturacaktır. Çevresel boya ise hortumun montajında kullanılan kelepçenin geleceği pozisyonu belirlemek amacıyla özel boyalar yardımı ile yapılmaktadır. Bu işlemler hortum performansında

etkili değildir, sadece hortumun montajlanabilmesi amacıyla gereklidir. Yapılan çalışmada hortum montajlama sürecine dahil olmayacağı için çevresel boya ve çentik işlemi gerçekleştirilmemiştir.



Şekil 4.3: Ek operasyonlar sonrası hortumun geometrik modeli.

4.2 Malzeme Özelliklerinin Saptanması- Çekme Testi

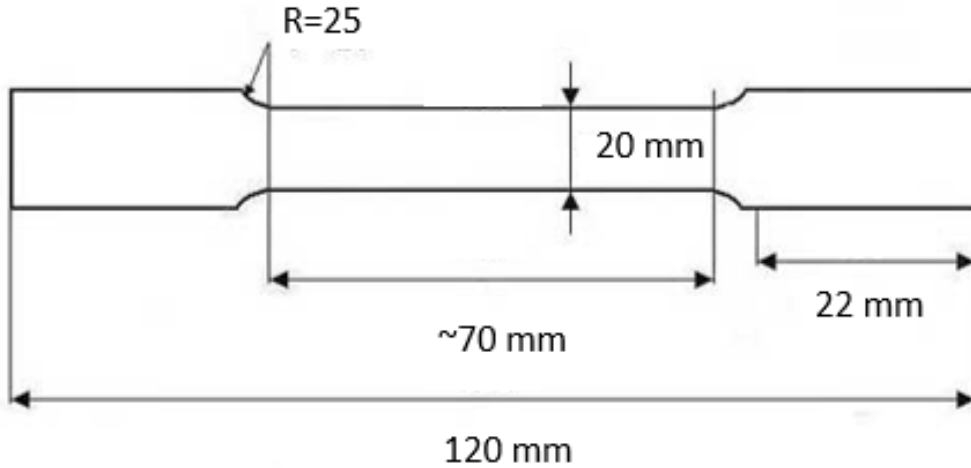
Kauçuk malzemeler genellikle laboratuvar ortamında üretilen sentetik malzemelerdir. Üretimleri ve içerikleri hem firmalara hem de projelere bağlıdır. Bazı projelerde; yağa dayanım, ısıya dayanım, korozyona dayanım gibi özelliklerin gerekliliğinden dolayı, kauçuk hamurunun reçetesine bazı kimyasallar eklenmektedir. Ayrıca her firmanın ham maddeyi temin ettiği firmalar ve koşulları da birbirlerinden ayrıdır. Bu sebeple her firmanın ürettiği kauçuk malzemesi belirli bir referans aralığında olmasına rağmen birbirlerinden farklılık göstermektedir.

CFD analizinde katı malzeme olarak adlandırılan hortum malzemesi seçimi çok etkili değildir. Analiz akışkan hacmine odaklanmaktadır. Bu sebeple, analizin doğruluğu açısından katı malzeme olarak kauçuk yapısı seçilse de kauçuğun türü ve mekanik özellikleri analizde yer almamaktadır. Ancak Ansys programında yapılan FEA analizi, katı malzemenin etkili olduğu bir analizdir. Elde edilen sonuçların doğruluğu açısından elastik malzemelerin mekanik özellikleri tam olarak programa aktarılmalıdır. Analiz programlarının kendi veri tabanından bazı malzemeleri seçmek mümkündür. Bu malzemeler standartlarda yer alan metalik malzemelerdir. Elastik malzemeler için bu mümkün değildir.

Yapılan hortumların mekanik özelliklerini saptamak amacıyla çekme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme çubuğu hazırlamak amacıyla standartlarda yer alan ölçüler kullanılmıştır. Bu numuneler, kauçuk malzemeyi ve örgü katmanını birebir yansıtmaları amacıyla hortumların üzerinden kesilerek hazırlanmaktadır. Şekil 4.4'te kesilen hortum numuneleri ve Şekil 4.5'te numune ölçüleri verilmektedir.



Şekil 4.4: Hortum üzerinden kesilen çekme numuneleri.



Şekil 4.5: Test için kullanılan çekme numunesinin boyutları.

Çekme testi, Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarda yer alan cihaz, Shimadzu markalı AG-XPLUS250KN AG model 250 kN'luk mekanik test cihazıdır. Cihazın çeneleri

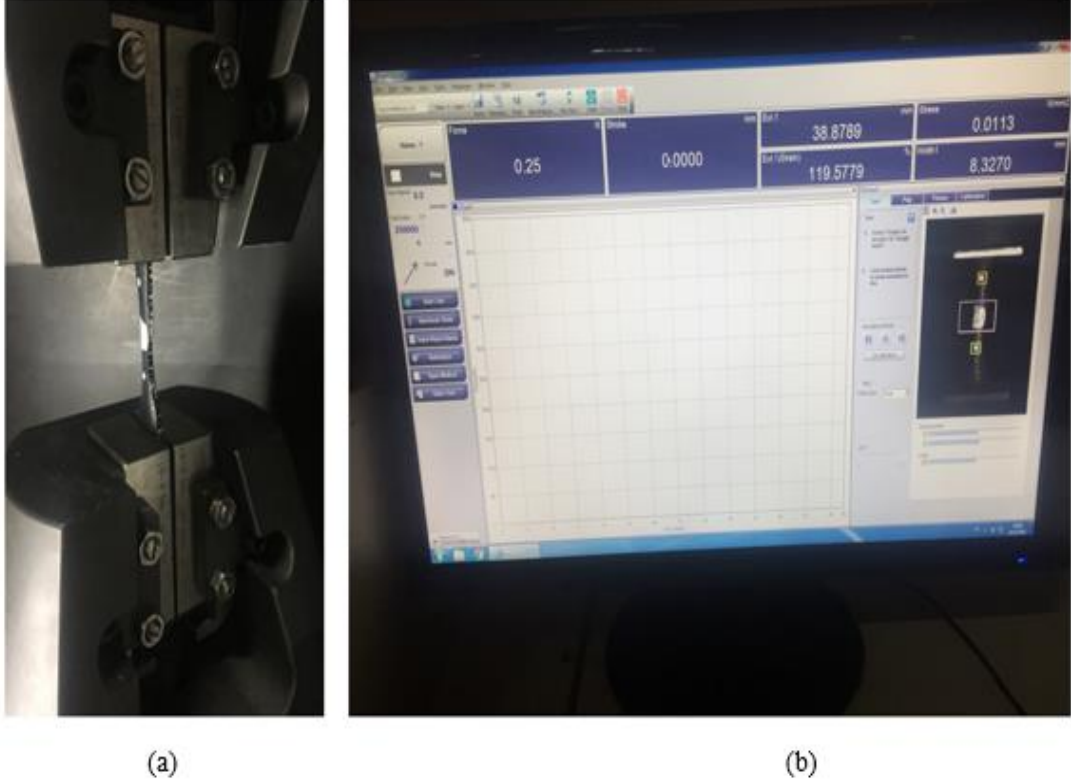
basma ve çekme işlemi için manuel olarak değiştirilebilmektedir. Parametrelerin girilmesi ve testin grafik üzerinden takip edilebilmesi amacıyla test cihazı, bir bilgisayara bağlanmıştır. Test cihazı ve bağlı bilgisayar ünitesi Şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.6: BTÜ Makine Laboratuvarında yer alan çekme testi cihazı.

Test cihazı, kameralı bir izleme sistemine sahiptir. Numune, numuneye zıt renkte bir kalem ile (açık renkli numune üzeri koyu renk, koyu renkli numune üzerine açık renk) üç farklı noktadan işaretlenmektedir. Bu işaretlerden biri numunenin orta kısmında yer almakta ve tahmini kopma bölgesini temsil etmektedir. Test cihazının numuneyi tutma bölgelerine yakın olan diğer iki ufak nokta ise, numunenin boyun olarak adlandırılan ince bölgesinin başlangıç ve bitişini temsil etmektedir. Bu

bölgelerin işaretlenme amacı, numunenin bilgisayar ortamında daha rahat takip edilebilmesidir. İşaretlenmiş numune ve bilgisayar ekranındaki görüntüsü Şekil 4.7'de yer almaktadır.



Şekil 4.7: (a) Numune üzerinde işaretlenmiş beyaz alanlar ve (b) bilgisayarda kameralı sistem ile bu alanların takibi.

Numune cihaza bağlanmadan önce noktalar arası mesafe ölçülmektedir. Bu işlem, numunenin ilk boyunu saptamamızı sağlamaktadır. Stroke olarak adlandırılan cihazın otomatik olarak ölçtüğü numune boyu, numunenin bir ucundan diğer ucuna olan boyuttur. Ancak numune elastik malzeme olduğu için, numunenin uç tarafında yer alan kalın bölgelerinde ve numunenin orta tarafında yer alan ince bölgelerinde farklı uzama miktarları görülmektedir. Bu sebeple numunenin ince bölge boyu, ilk boy olarak kabul edilmektedir. Numune cihaza bağlandıktan sonra, kamera sistemi ile beyaz bölgeler hizalanır. Test başlatıldığında, cihazın hareketli çenesi yukarı doğru hareket eder ve numune uzamaya başlar. Çekme testi 0,5 m/s hızla gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar ekranında kuvvet ve uzama miktarı grafiksel olarak ifade edilmektedir. Numune koptuğu an test tamamlanır. Çekme cihazına ait bilgisayar programı, deney süresince elde ettiği tüm verileri saklayabilmektedir. Şekil 4.8'de cihaz üzerinde yer alan numunenin uzama anına ve kopma anına ait resim yer almaktadır.



Şekil 4.8: Cihaz üzerindeki numunenin uzama ve kopma anı.

Test, aynı koşullarda dört farklı kauçuk türünden üretilen hortum içinde gerçekleştirilmiştir. Kopan numuneler Şekil 4.9'da verilmektedir.



Şekil 4.9: Çekme testi sonucunda kopan numuneler.

Test bitiminde sonuçlar, çekme testine ait olan bir bilgisayar yazılımı sayesinde excel programına aktarılmaktadır. Bu excel raporunda testin başladığı andan, numunenin koptuğu ana kadar cihaz tarafından toplanan veriler yer almaktadır. Bu veriler Newton cinsinden kuvvet, mm cinsinden uzama miktarı, N/mm^2 cinsinden gerilme (stress) ve yüzde gerinim (strain) oranıdır. NBR\CSM kauçuk numunesi çekme testinde, ilk üç saniyede elde edilen değerler excel raporundan alınarak Çizelge 4.1'de listelenmiştir:

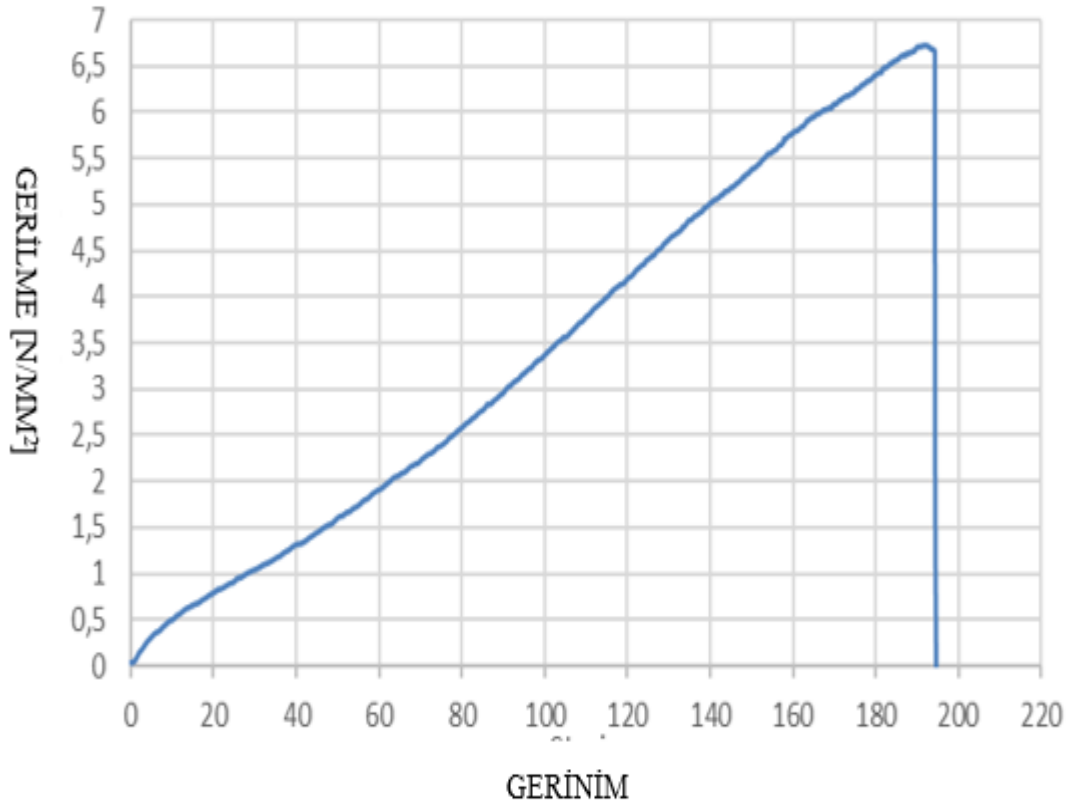
Çizelge 4.1: Çekme testinde 0-3 saniye aralığında elde edilen değerler.

Zaman [s]	Kuvvet [N]	Stroke [mm]	Uzama [mm]	Gerilme [N/mm ²]	Gerinim [%]
0,05	-0,794729	0,0038958	0,000585556	-0,00359199	0,002008135
0,1	0,07947286	0,0183125	0,000349045	0,003591994	0,001197032
0,15	0,03973643	0,03909375	0,000946045	0,001795997	0,003244414
0,2	0,03973643	0,06321875	0,009283066	0,001795997	0,03183581
0,25	0,03973643	0,0880625	0,01778984	0,001795997	0,06100938
0,3	0,03973643	0,1130521	0,04116631	0,001795997	0,1411778
0,35	0,03973643	0,1380521	0,05445099	0,001795997	0,186737
0,4	0,03973643	0,1630521	0,08241463	0,001795997	0,2826369
0,45	0,07947286	0,1880417	0,09625816	0,003591994	0,3301126
0,5	0,1192093	0,2130417	0,1223984	0,00538799	0,4197592
0,55	0,07947286	0,2380521	0,1364384	0,003591994	0,4679086
0,6	0,03973643	0,2630417	0,1636086	0,001795997	0,5610874
0,65	0,03973643	0,2880417	0,1766605	0,001795997	0,6058486
0,7	0,07947286	0,3130313	0,2033939	0,003591994	0,6975294
0,75	0,1192093	0,3380312	0,21628	0,00538799	0,7417215
0,8	0,1192093	0,3630417	0,2400265	0,00538799	0,8231589
0,85	0,1589457	0,3880312	0,2522869	0,007183988	0,8652055
0,9	0,1192093	0,4130313	0,2775497	0,00538799	0,9518431
0,95	0,1589457	0,4380313	0,2893848	0,007183988	0,9924309
1	0,1986821	0,4630312	0,3128967	0,008979984	1,073064
1,05	0,278155	0,4880417	0,3368073	0,01257198	1,155064
1,1	0,3178914	0,5130521	0,3482971	0,01436798	1,194468
1,15	0,3973643	0,5380417	0,3708649	0,01795997	1,271863
1,2	0,3973643	0,5630313	0,3826847	0,01795997	1,312398
1,25	0,4768372	0,5880312	0,406395	0,02155196	1,393711
1,3	0,5165736	0,6130416	0,4301453	0,02334796	1,475162
1,35	0,55631	0,6380417	0,4411583	0,02514395	1,51293
1,4	0,6357829	0,6630312	0,4527683	0,02873595	1,552747
1,45	0,7549922	0,6880417	0,4739933	0,03412394	1,625537
1,5	0,7947286	0,7130312	0,4960804	0,03591993	1,701283
1,55	0,9139379	0,7380313	0,5073833	0,04130793	1,740046
1,6	0,9536743	0,7630312	0,5303555	0,04310392	1,818828
1,65	0,9934107	0,7880312	0,5424347	0,04489992	1,860253
1,7	1,072884	0,8130417	0,5646477	0,04849191	1,936431
1,75	1,152357	0,8380417	0,5759373	0,05208391	1,975148
1,8	1,271566	0,8630313	0,5972481	0,0574719	2,048233
1,85	1,311302	0,8880417	0,6079159	0,0592679	2,084817
1,9	1,390775	0,9130417	0,6287231	0,06285989	2,156175
1,95	1,390775	0,9380416	0,6505318	0,06285989	2,230967
2	1,470248	0,9630312	0,6616631	0,06645188	2,269141
2,05	1,549721	0,9880313	0,6839886	0,07004388	2,345705
2,1	1,66893	1,013042	0,6949711	0,07543187	2,383369
2,15	1,708666	1,038031	0,7140007	0,07722786	2,44863
2,2	1,788139	1,063021	0,723732	0,08081986	2,482003
2,3	1,827876	1,113031	0,7523842	0,08261585	2,580264
2,35	1,907349	1,138052	0,7744923	0,08620784	2,656083

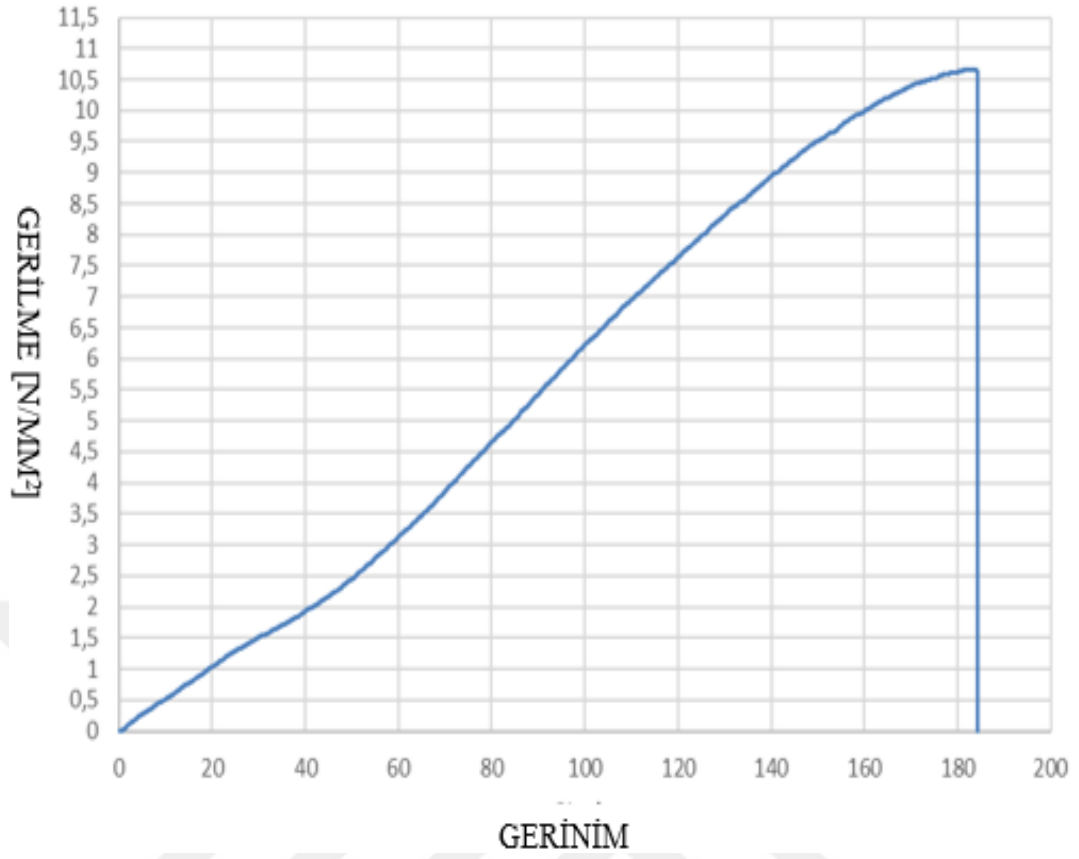
Çizelge 4.2 (devam): Çekme testinde 0-3 saniye aralığında elde edilen değerler.

Zaman [s]	Kuvvet [N]	Stroke [mm]	Uzama [mm]	Gerilme [N/mm ²]	Gerinim [%]
2,4	1,986821	1,163042	0,7853127	0,08979984	2,693191
2,45	2,106031	1,188031	0,8056946	0,09518783	2,76309
2,5	2,185504	1,213031	0,8149014	0,09877983	2,794664
2,55	2,22524	1,238042	0,8335476	0,1005758	2,85861
2,6	2,304713	1,263042	0,8441296	0,1041678	2,894901
2,65	2,344449	1,288031	0,864109	0,1059638	2,963419
2,7	2,384186	1,313031	0,8738518	0,1077598	2,996831
2,75	2,463659	1,338031	0,8945866	0,1113518	3,06794
2,8	2,582868	1,363031	0,9157848	0,1167398	3,140639
2,85	2,622604	1,388031	0,9256554	0,1185358	3,174489
2,9	2,741814	1,413031	0,9452591	0,1239238	3,241719
2,95	2,78155	1,438031	0,9560699	0,1257198	3,278795
3	2,78155	1,463021	0,9768219	0,1257198	3,349962

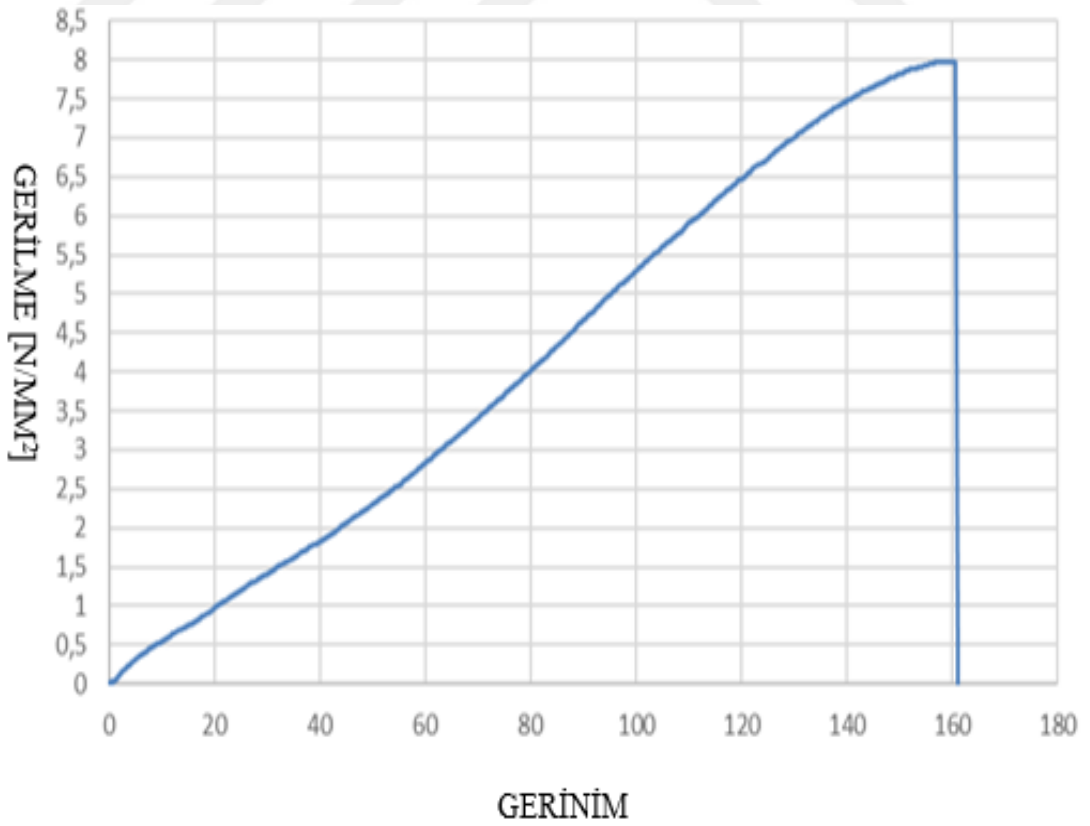
Excel raporunda elde edilen datalar her kauçuk türü için stress strain grafiği oluşturmamızı sağlamaktadır. Dört farklı kauçuk hortum üzerinden kesilen numunelerin çekme testi sonucu oluşturulan gerilme-gerinim (stress-strain) grafiği Şekil 4.10, Şekil 4. 11, Şekil 4.12 ve Şekil 4 .13'te verilmiştir:



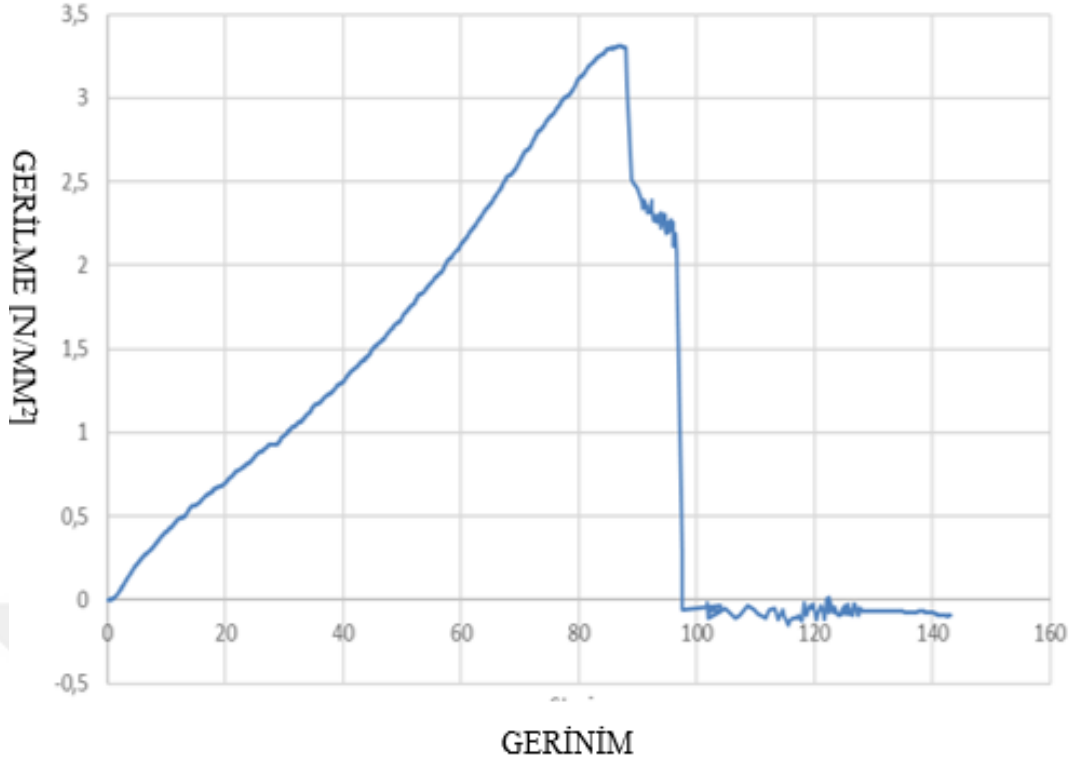
Şekil 4.10: EPDM Kauçuk türüne ait gerilme-gerinim grafiği.



Şekil 4.11: AEM Kauçuk türüne ait gerilme-gerinim grafiği.



Şekil 4.12: ECO Kauçuk türüne ait gerilme-gerinim grafiği.



Şekil 4.13: NBR / CSM Kauçuk türüne ait gerilme-gerinim grafiği.

Elastisite modülü; malzemenin belirli kuvvette maruz kaldığında yapısında oluşan elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür. Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde oldukça önemli bir parametredir. Elastisite modülü Hooke Kanununa göre hesaplanmaktadır. Hooke kanunu şu şekilde ifade edilebilmektedir:

$$\sigma = \frac{E}{\epsilon} \quad (5.1)$$

Burada:

ϵ = Gerinim

E=Elastisite modülü

σ = Gerilme [N/mm²]

Elastisite modülü, lineer malzeme karakteristiğine sahip malzemelerde kullanılan malzemeye özgü bir parametredir. Kauçuk yapısı itibariyle lineer özellik göstermemektedir. Ancak çalışmada incelenen hortumlar geometrik olarak kısa kabul edilebilecek hortumlardır. Bu sebeple, çekme testinden elde edilen hortum grafikleri incelendiğinde, elastik bölgede oluşan stress ve strain değerleri lineer kabul

edilebilmektedir. Bu kabul; yapısal analizde girdi olarak kullanılan elastisite modülünü kolaylıkla hesaplayabilmek için yapılan bir basitleştirme değildir.

Grafiklerin elastik bölgelerinden alınan stress ve strain değerlerine göre elde edilen elastisite değerleri Çizelge 4.2’de ifade edilmiştir:

Çizelge 4.3: Kauçuk türüne göre elastisite modülü.

Kauçuk Türü	E [MPa]
EPDM	10,866
AEM	6,237
ECO	5,795
NBR/CSM	11,165

4.3 CFD Analizi

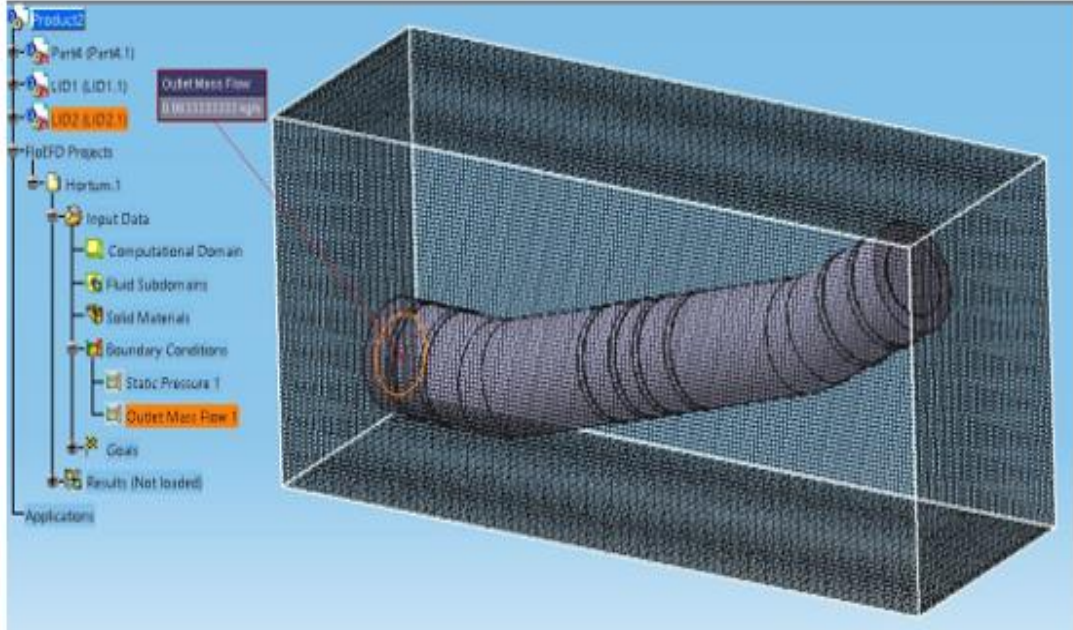
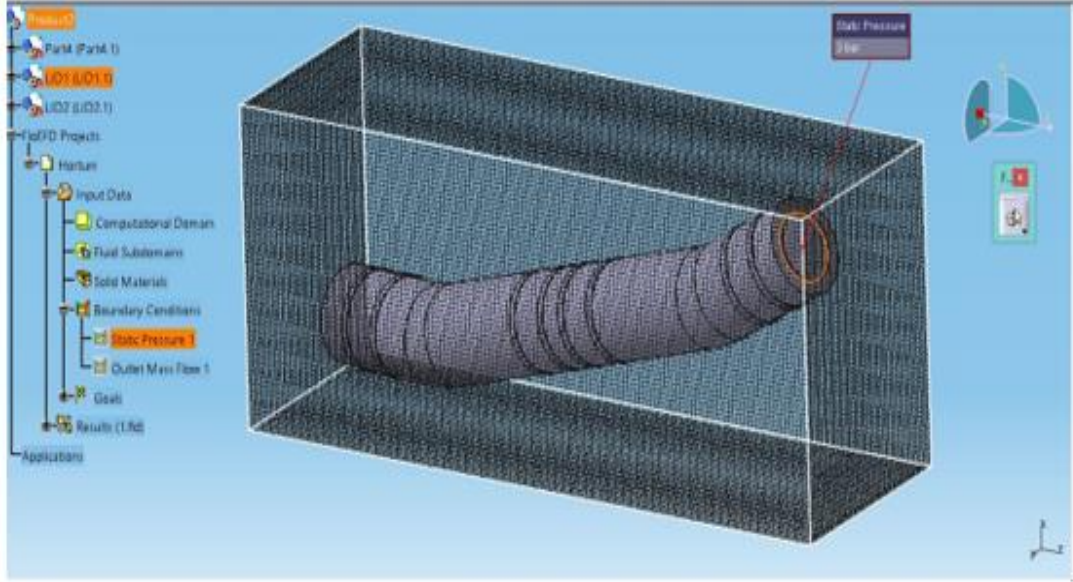
CFD analizi ele alınan problemde, bir akış eylemi olduğu durumlarda akışkanın davranışının incelendiği analiz metodudur. Her problem için farklı çözüm yolları mevcut olsa da genel çözüm algoritması benzerdir. Çözüme ulaştırılmak istenen problemde ilk olarak, mevcut geometrinin iç akış hacmi tespit edilmektedir. Sonraki adım; her probleme uygun olarak başlangıç koşullarını belirleyerek, geometride uygun konuma bu başlangıç koşullarını atamaktır. Mesh yapısı oluşturulup, her eleman bu koşullarda çalıştırılarak sonuca ulaşılmaktadır.

Hortum geometrisi Unigraphics NX programında tasarlanmıştır ve FloEFD programına “.stp” versiyonu formatında aktarılmıştır. FloEFD programında çalışmanın genel ayarları yapılmıştır. Akış tipi, analizin gerçek koşullara göre doğru olarak modellenebilmesi amacıyla laminer ve türbülanslı akış seçilmiştir. Akışkan tipi, su ve katı tipi, kauçuk olarak geometriye atanmıştır.

Hortumun iki ucu akış hacmi oluşturulabilmesi amacıyla silindir biçimindeki kapaklar ile kapatılmıştır. Akış hacmi, hortum içerisinden sıvının geçtiği hacmi ifade etmektedir. Bir başka deyişle, geometride sıvının izlediği yoldur. Araç üzerinde, akışkan motordan gelerek soğutucuya iletilir. Analizin gerçek durum ile birebir uyumlu olabilmesi amacıyla, hortum geometrisinin giriş kısmı, teknik resimde de belirtilen motor tarafıdır. Geometrik modelin çıkış kısmı ise araç üzerinde soğutucuya denk gelen kısım olarak belirlenmiştir. Yapılan analizin başlangıç koşulları Çizelge 4.3’de listelenmiştir. Bu başlangıç koşullarının geometride uygulandığı noktalar Şekil 4.14’de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.4: 100°C’de yapılan analizin başlangıç koşulları.

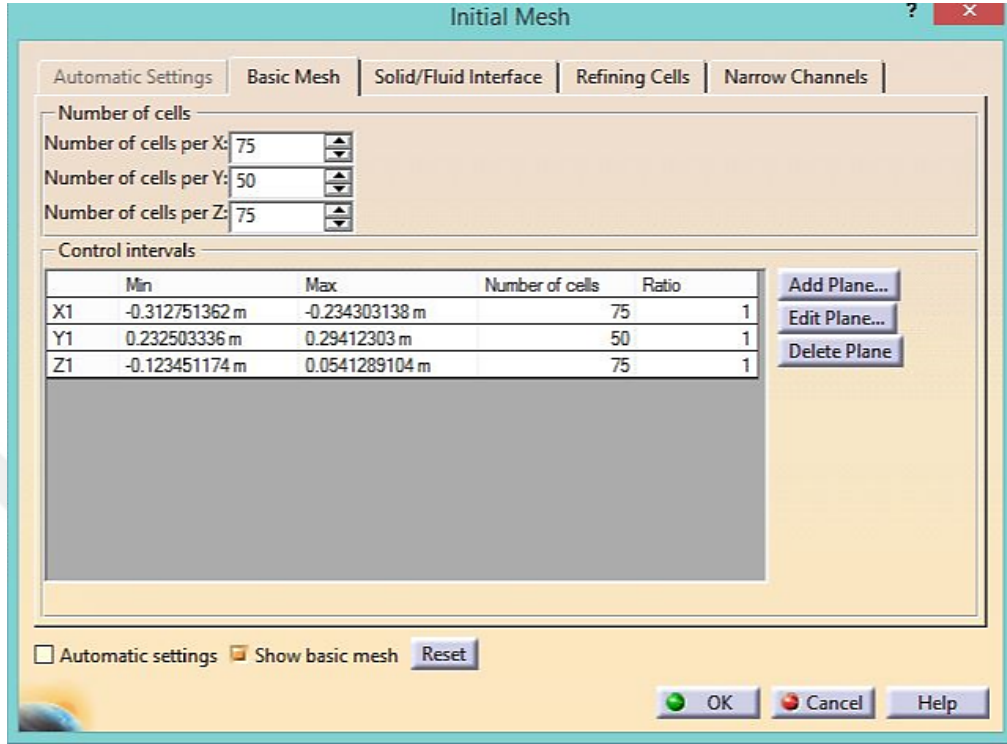
Başlangıç Koşulu	Giriş (Inlet)	Çıkış (Outlet)
Sıcaklık	100°C	
Basınç	3 Bar (statik)	-
Kütleli debi	-	300 kg/h



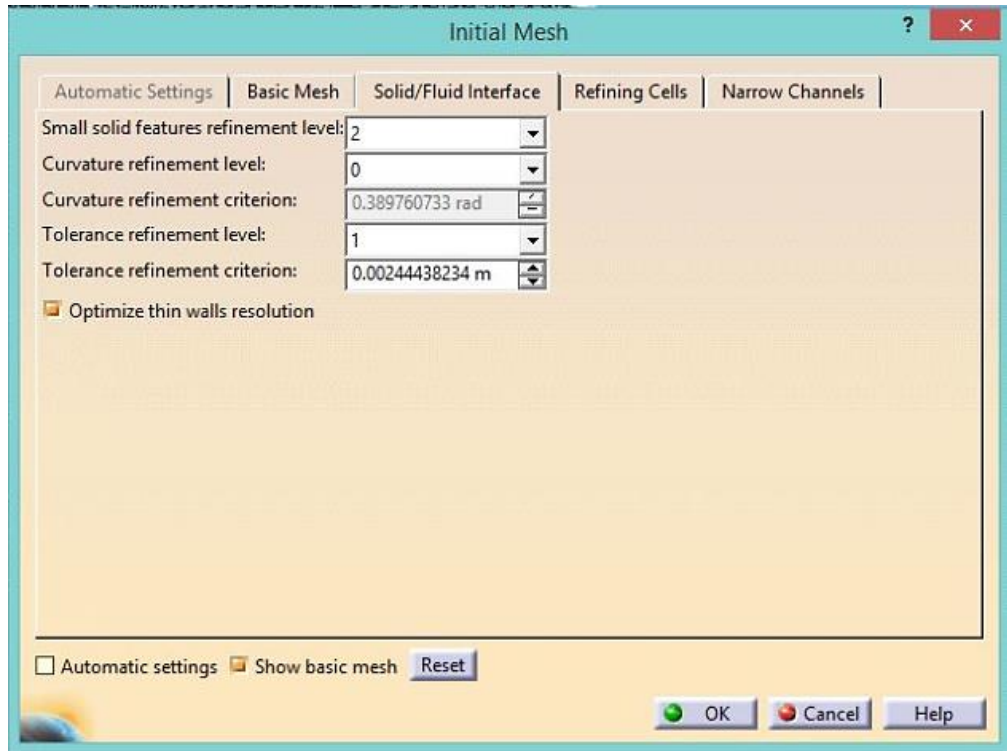
Şekil 4.14: Hortumun giriş ve çıkış tarafındaki başlangıç koşulları.

Geometrik modele uygun sınır koşulları atandıktan sonra, geometri uygun ağ yapısına dönüştürülmektedir. Bu amaçla bazı parametreler program üzerinden ayarlanmaktadır. Ayarlanan parametrelerden bazıları; x, y ve z doğrultudaki hücre sayısı, küçük katı özellikleri iyileştirme seviyesi, tolerans iyileştirme seviyesi, akışkan iyileştirme seviyesidir. Tüm bu parametreleri, problem türüne göre

değiştirmek önemlidir. Geometride oluşan eleman sayısı bu parametrelere göre belirlenmektedir. Yapılan ayarlamaların ekran görüntüleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmektedir.

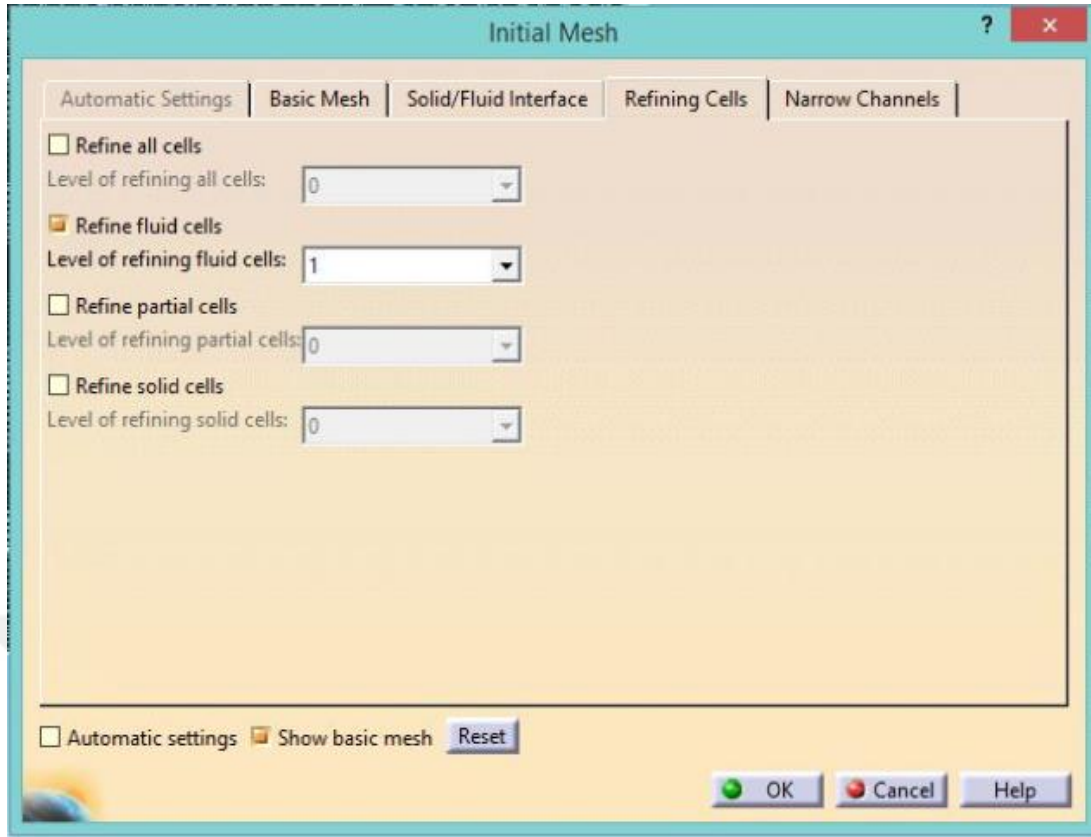


(a)

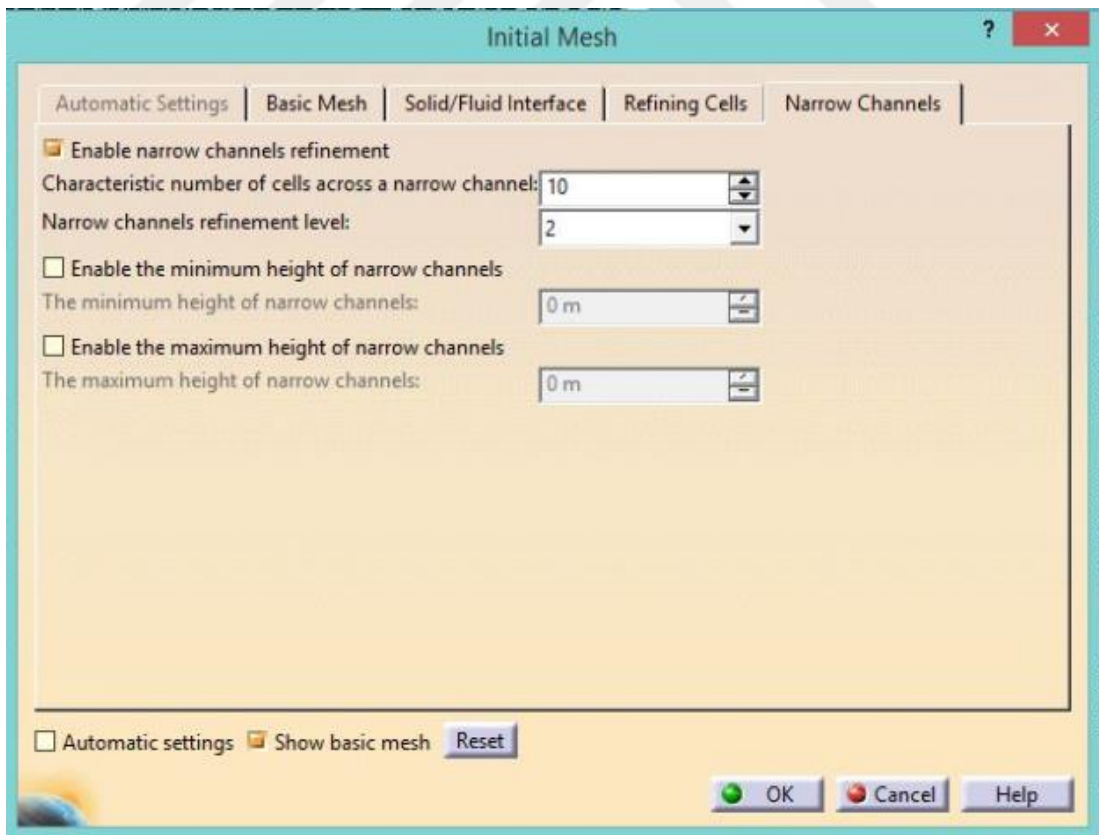


(b)

Şekil 4.15: Mesh parametreleri [(a) temel ayarlar ve (b) katı-sıvı ara yüz ayarları].



(c)



(d)

Şekil 4.16: Mesh parametreleri [(c) ince mesh ve (d) dar kanal ayarları].

Analizin doğruluğu açısından, eleman sayısı optimum seçilmelidir. Az eleman sayısı seçimi; data üzerinden gerekli bilgilerin tam anlamıyla alınamamasına neden olmaktadır. Bu tip durumlarda, eksik bilgi nedeniyle analiz doğru sonuca ulaşamamaktadır. Eleman sayısı fazla olduğunda ise sonuç istenilenden daha hassas olmakta ancak kullanılan donanım zorlanmakta, analiz süresi uzamakta, gereksiz enerji kullanımı ve süre israfı meydana gelmektedir. Bu sebeple, eleman sayısı ve mesh yapısı optimum olması tercih edilmektedir. Optimum değere ulaşıncaya kadar elde edilen düğüm sayıları ve buna bağlı eleman sayısını ifade eden Çizelge 4.4, aşağıda verilmiştir:

Çizelge 4.5: 100°C'de yapılan analizin düğüm ve eleman sayısı.

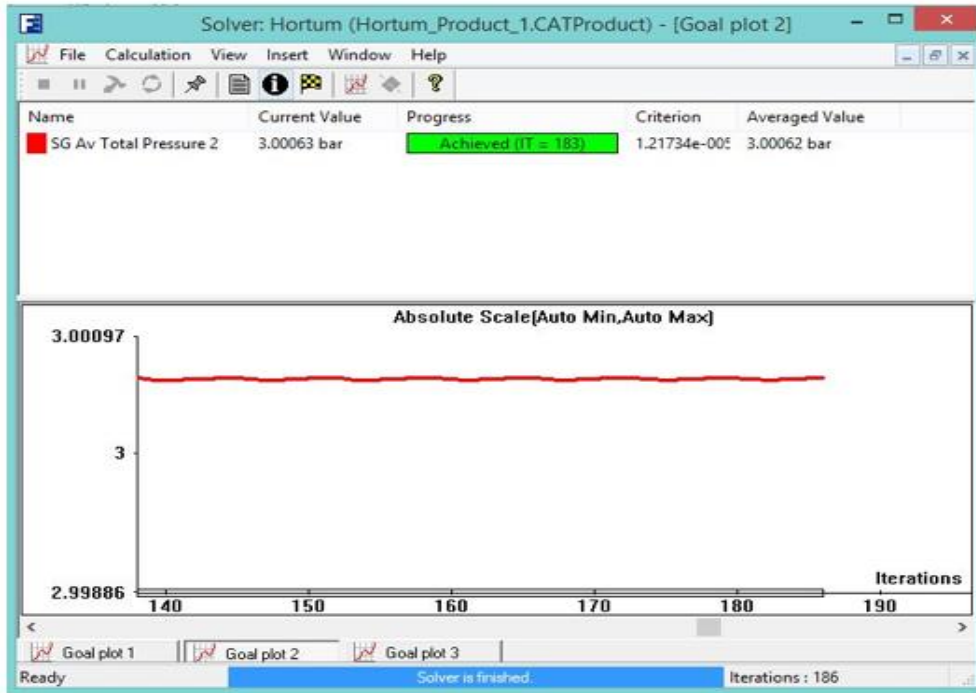
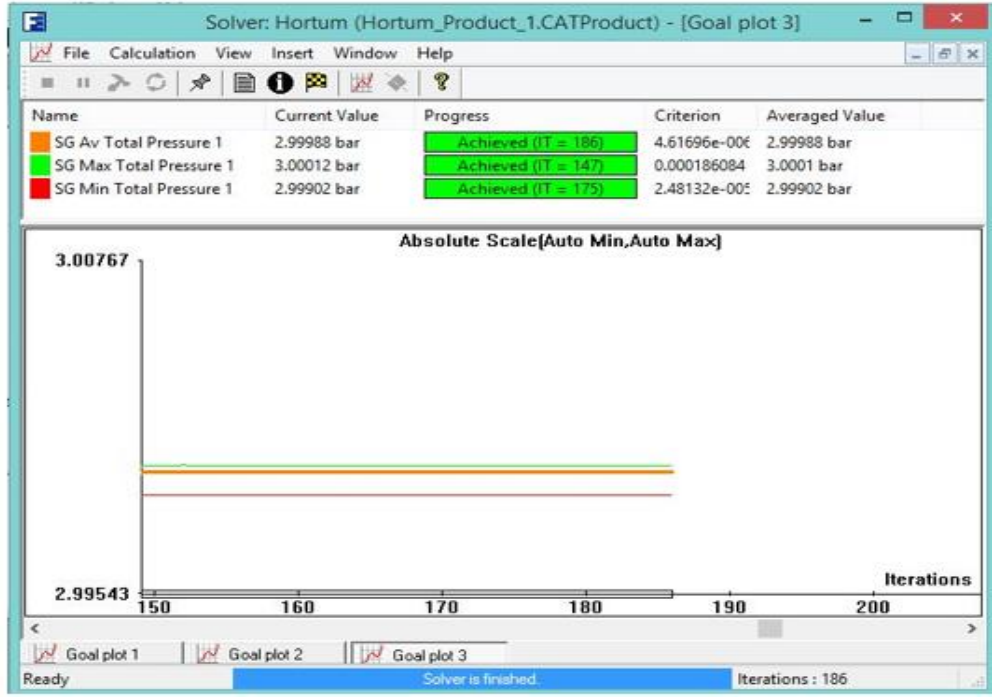
Mesh	Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı
Mesh 1	10364	31952
Mesh 2	19687	54101
Mesh 3	30574	83479
Mesh 4	32158	87434

Mesh işlemi sonuçlandığında program, Şekil 4.17'de yer alan ekran sayesinde kullanıcıya bilgi vermektedir. Bu aşamadan sonra analiz sorunsuz başlatılmaktadır. Gerekli iterasyon sayısına ulaştığında veya belirtilen bir sayıya yakınsadığında analiz başarı ile sonuçlanmış kabul edilebilir.

Parameter	Value
Status	Mesh generation finished normally.
NC_Total	391458
NC_Ingas	87434
NC_Inbod	269326
NC_Part	34698
NC_Unres	0
Fluid cells	87434
Solid cells	269326
Partial cells	34698
Cpu time	0 : 0 : 47
Calculation time left	
Run at	FURKAN
Warning	Comment
No warnings	

Şekil 4.17: 100°C'de yapılan analizin mesh durum bilgisi.

Analiz sonuçları istenen tüm parametreler üzerinden incelenebilmektedir. Yapılan çalışmada amaç, basınç dağılımlarını ve değerlerini tespit ederek statik analiz için ön bilgi oluşturmaktır. Bu sebeple analizin hedefleri; minimum toplam basınç, maksimum toplam basınç ve iki farklı konumdaki ortalama toplam basınç olmak dört farklı parametre olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin yakınsama değerleri Şekil 4.18’de verilmiştir:



Şekil 4.18: 100°C’de analiz hedefleri yakınsama grafikleri.

100°C’de yapılan CFD analizinin sonuçları, statik analiz için dışarı aktarılmıştır. Yapılan modelleme kopyalanarak başlangıç koşulları 140°C olarak güncellenmiş, aynı genel ayarlar ve mesh parametreleri altında analiz çalıştırılmıştır. Başlangıç koşullarının listesi Çizelge 4.5’te ve hedeflerin yakınsama grafikleri Şekil 4.19’da verilmiştir:

Çizelge 4.6: 140°C’de yapılan analiz başlangıç koşulları.

Başlangıç Koşulu	Giriş (Inlet)	Çıkış (Outlet)
Sıcaklık	140°C	
Basınç	3 Bar (statik)	-
Kütleli debi	-	300 kg/h



Şekil 4.19: 140°C’de analiz hedefleri yakınsama grafikleri.

İki farklı sıcaklık değeri altında yapılan analizlerin sonucu Ansys programında kullanılmak üzere dışa aktarılmıştır. CFD analizi sonuçları, statik analiz için gerekli olduğu kadar, çap genişleme testi sonrası oluşan maksimum basıncın karşılaştırılması ve test ile analizin doğruluğunun teyit edilmesi amacıyla da önem arz etmektedir.

4.4 Ansys- Yapısal Analiz

ANSYS Mechanical Enterprise, çok geniş bir uygulama yelpazesi olan, geometri hazırlığını veya geometri optimizasyonunu kapsayan yapısal analiz için sonlu elemanlar analizi (FEA) metodunu kullanan bir yazılımsal çözümdür. İncelenen problemde, geometri kuvvet veya basınç gibi belirli bir gerilmeye maruz kaldığı durumlarda, geometrinin yapısında deformasyon meydana gelmektedir. FSI analizlerinde, geometri üzerinde akıştan kaynaklı bir basınç dağılımı gözlemlenmektedir. Bu basınç dağılımı, geometrinin şeklinde bir deformasyona sebep olmaktadır. Bu nedenle, FSI analizlerinin ilk adımı basınç dağılımını tespit edebilmek için CFD analizi, FSI analizinin ikinci adımı ise yapısal deformasyonu tespit edebilmek için FEA analizidir.

Ansys programı malzeme seçimini kolaylaştırabilmek amacıyla geniş bir malzeme kütüphanesi içermektedir. Bu malzeme kütüphanesinde, günlük yaşamımızda sık kullanılan standart malzemelerin elastisite modülü gibi mekanik özellikleri listelenmiştir. Ancak kauçuk yapısı; projenin çalışma koşullarına, firmanın kullandığı kimyasallara, hammaddeye oldukça bağlıdır. Bu sebeple, Ansys malzeme kütüphanesinden seçilen bir malzeme test edilen hortumların malzeme özelliklerini birebir karşılayamamaktadır. Kauçuk hortumların mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla çekme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonucunda, malzemelerin stress-strain diyagramı elde edilmiştir.

Ansys programına aktarılan geometri üzerinde giriş bölgesi, çıkış bölgesi, duvar gibi geometrik bölgeler belirtilmektedir. Belirli bir yük altında geometrinin vereceği tepki, geometri malzemesine bağlı olduğu için, geometrinin özellikleri tanımlanırken malzemenin geometriye atanması gerekmektedir. Malzeme bilgileri için; çekme testinden elde edilen elastisite modülü (E) değerleri sisteme girilmiştir.

Mesh modelinin oluşturulması CFD analizinde olduğu gibi geometri üzerinden gerekli verilerin alınması, her elementin uygulanan yük altındaki tepkilerinin

toplanması amacıyla oldukça önemlidir. Uygun mesh yapısı oluşturulduktan sonra ve analizin başlatılmaktadır. Geometri ve sınır koşulları, daha önce gerçekleştirilen CFD analizinde tanımlandığı şekildedir. Analiz dört farklı kauçuk için tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, çap genişleme testi sonucu elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmak üzere raporlanmıştır.

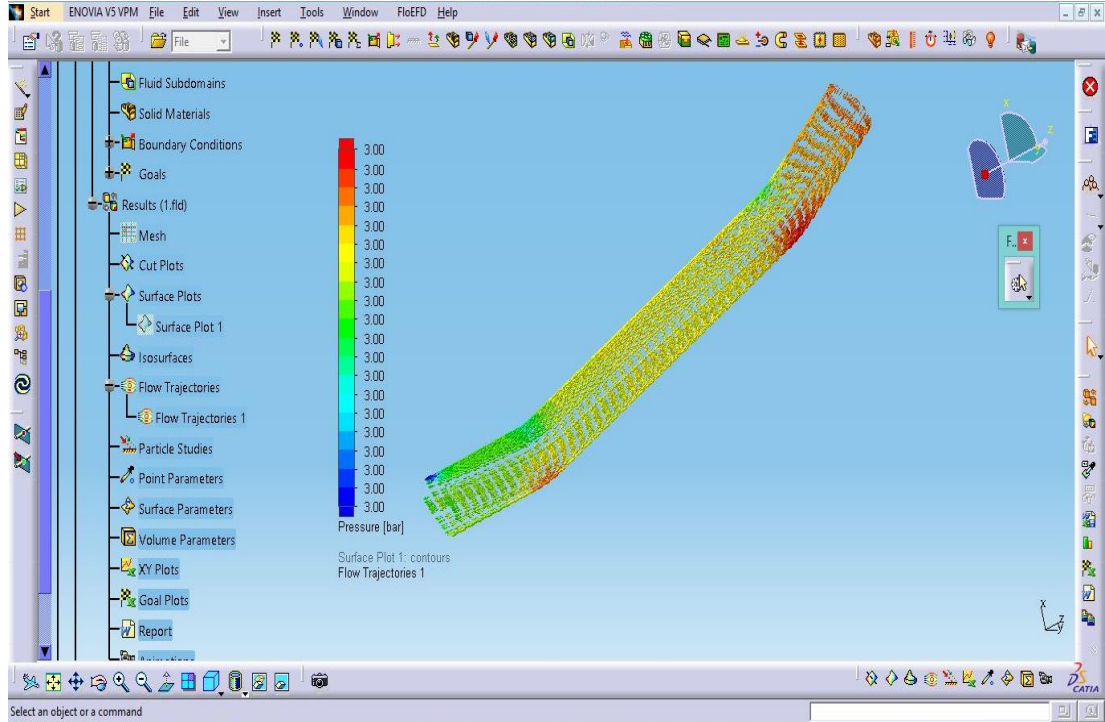


5. SONUÇ VE ÖNERİLER

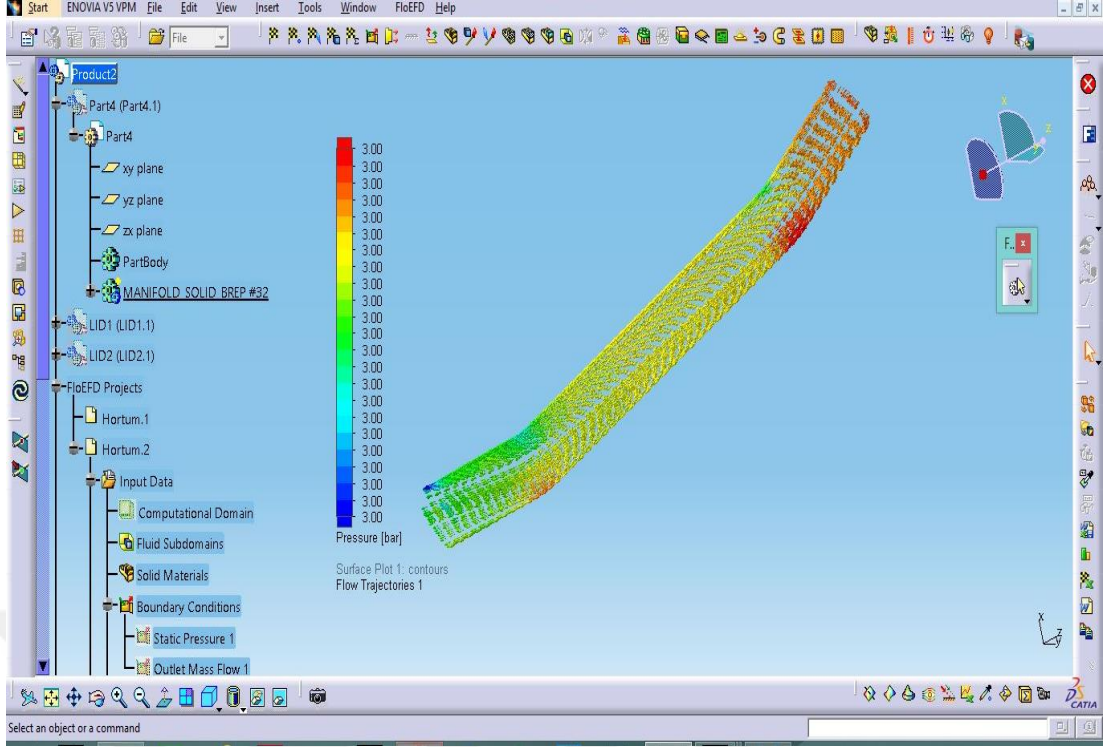
5.1 CFD Analizi ve Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

CFD analizi bir sonraki adım olan yapısal analize ön bilgi olması açısından önem taşımaktadır. Çıkan sonuçlar yapısal analizin girdileridir. Ayrıca çıkan sonuçlar, gerçek koşullarda yapılan test sonuçları ile karşılaştırılan bir kontrol noktası gibi düşünülmektedir. Kontrol noktasının amacı; analiz için yapılan metodun, belirlenen başlangıç koşullarının doğruluğunu teyit etmektir.

Yapılan analizde çıktı olarak elde edilen sonuçlar; hortum üzerinde ortalama, minimum ve maksimum basınç değeri ve bu basınç değerlerinin hortum üzerinde yoğunlaştığı bölgelerin göstergesidir. Basınç dağılımı, hortumun hangi bölgelerde genişleyeceğinin öngörülmesi açısından önemlidir. Elde edilen sonuçların doğruluğu hortum üzerinde gözle kontrol edilebilmektedir. Gözle kontrol sonucu yaklaşık olarak hortum üzerinde genişleyen yerler tespit edilebilmektedir. 100°C ve 140°C’de CFD analizinden elde edilen basınç dağılımı Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de yer almaktadır.

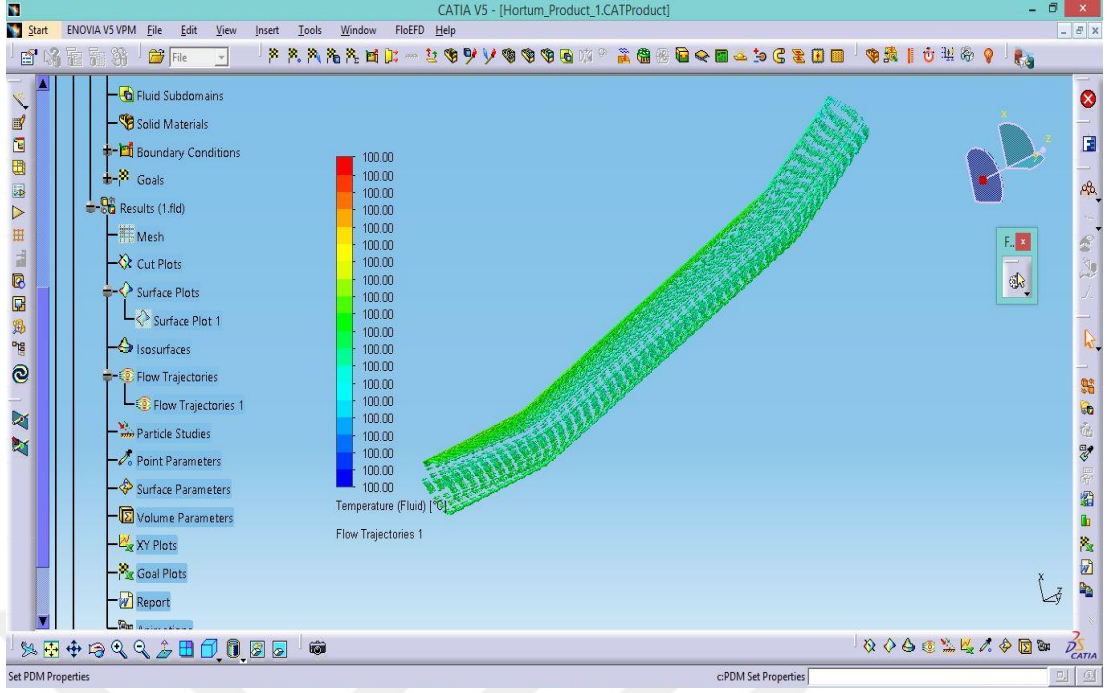


Şekil 5.1: 100°C’de elde edilen basınç analizi.

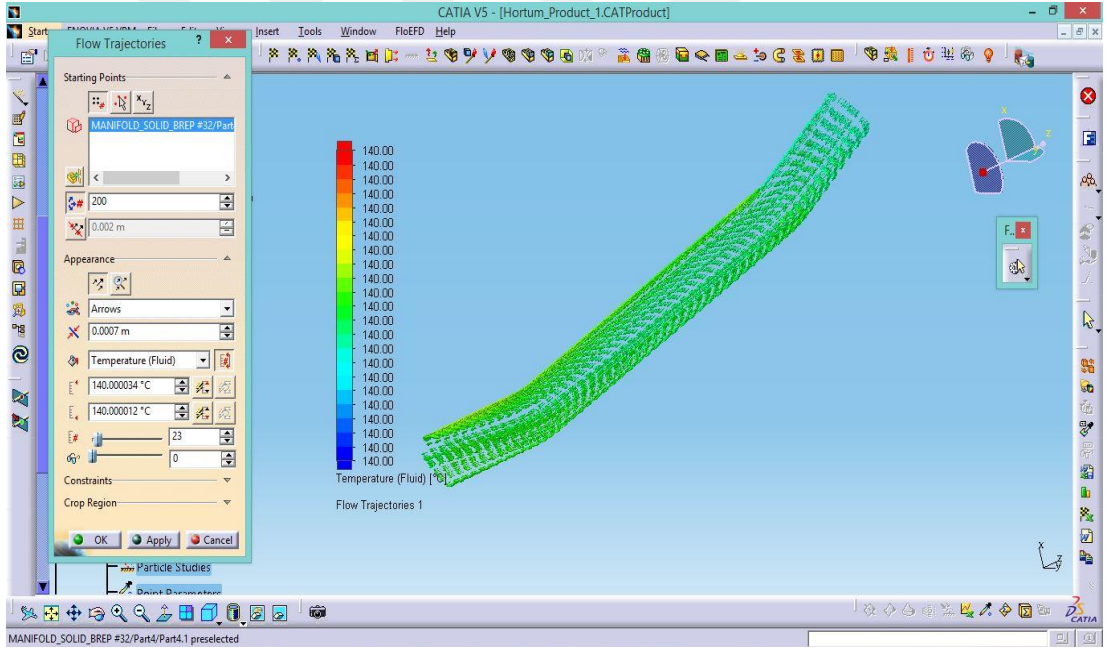


Şekil 5.2: 140°'de elde edilen basınç analizi.

Çap genişleme testi sırasında ısı transferi istenmeyen bir durumdur. Test sırasında bu durumu önlemek amacıyla kabin sıcaklığı, hortum sıcaklığı ve sıvı sıcaklığı sabit tutulmaktadır. İlk durum için kabin sıcaklığı 100°C'ye kadar ısıtılmaktadır. Ayarlanan sıcaklığa ulaştığında hortumu bağlamak amacıyla kabin kapısı bir süre açılır ve hortumun tapalara montaj prosesi gerçekleştirilir. Bu süreç boyunca soğuyan kabinin yeniden 100°C'ye ulaşması beklenmektedir. Hortum içerisindeki sıvı akışı, sıvı sıcaklığı 100°C'ye ulaşana kadar devam etmektedir. Sıvı sıcaklığı da belirtilen değere ulaştığında test süreci başlatılır. Süreç boyunca kabin içi sıcaklık değerinin korunduğu, test cihazına bağlı monitörden kontrol edilebilmektedir. CFD analizinde geometri üzerine yapılan akış simülasyonunun bir çıktısı olarak sıcaklık dağılımına ulaşmak da mümkündür. Çap genişleme testinde olduğu gibi yapılan analiz sonucunda da elde edilen sıcaklık değerlerinin analiz boyunca değişmemesi beklenmektedir. Aynı süreç 140°C sıcaklık değeri için de yapılmaktadır ve analiz çıktısı olarak hortum geometrisi üzerindeki dağılımın 140°C civarında olması beklenmektedir. Analiz sonucuna göre elde edilen sıcaklık değerlerini gösteren ekran görüntüleri Şekil 5.3'te ve Şekil 5.4'te verilmektedir:



Şekil 5.3:100°C’de elde edilen sıcaklık dağılımı.

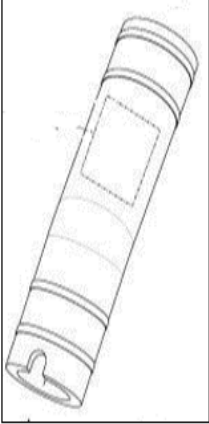


Şekil 5.4:140°C’de elde edilen sıcaklık dağılımı.

Çap genişleme testi sonucunda dört farklı kauçuk için hem 100°C hem de 140°C’de gerçekleştirilen testlerin sıvı sıcaklığı, kabin sıcaklığı, minimum ve maksimum basınç değerini içeren bir rapor elde edilmektedir. 140°C’de gerçekleştirilen AEM hortuma ait çap genişleme testi raporunun ilgili kısmı Şekil 5.5’te verilmiştir. Diğer kauçuk hortumlarının değerleri ve CFD analizi sonucunda elde edilen basınç-sıcaklık değerleri ise Çizelge 5.1’de ifade edilmiştir:

ÇAP GENİŞLETME TESTİ

Tarih: 29.06.2018 Saat: 11:28

TEST BİLGİLERİ		TEST PARAMETERİ	
PARÇA ADI	FIAT		
PARÇA KOD NUMARASI	5802379522		
HAMUR CİNSİ	AEM		
İPLİK TİPİ	ARAMİD		
İPLİK DTEKS	1100		
İPLİK HATVE	3,5		
ŞARTNAME	9.02136/01		
ÇAP ø	16,5		
ET KALINLIĞI	3,5		
AÇIKLAMA	Simulasyon		

Şekil 5.5: 140°C'de yapılan çap genişleme testi sonuç raporu.

Çizelge 5.1: Çap genişleme testi ve CFD analizi sonuçları karşılaştırma çizelgesi.

Test Parametreleri	100°C EPDM	100°C AEM	100°C ECO	100°C NBR/CSM	140°C EPDM	140°C AEM	140°C ECO	140°C NBR/CSM
Çap Genişleme Testi- (Mak. Basınç)	3,01	3,02	3,00	3,01	3,00	2,99	3,00	3,01
Çap Genişleme Testi- (Min. Basınç)	3,04	3,04	3,03	3,03	3,03	3,04	3,04	3,04
CFD Analizi (Min. Basınç)	2,99902	2,99902	2,99902	2,99902	2,99988	2,99988	2,99988	2,99988
CFD Analizi (Mak. Basınç)	3,0001	3,0001	3,0001	3,0001	3,00013	3,00013	3,00013	3,00013

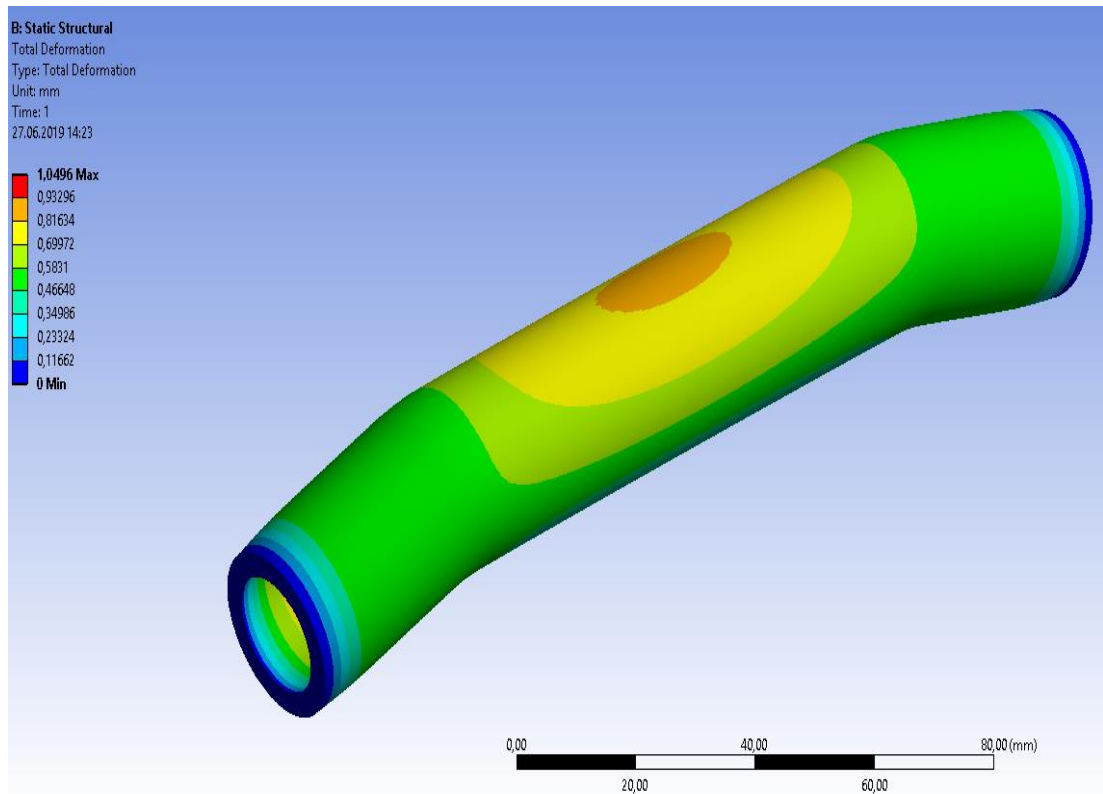
Çizelge incelendiğinde test sonuçları ve CFD sonuçlarının hemen hemen aynı değerlerde olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum beklenen bir durumdur. Çalışmada seçilen hortum eksenel boy açısından oldukça küçüktür ve giriş-çıkış bölgelerine yakın alanlarda iki adet radyus bulunmaktadır. Akışkan, borunun içerisine girdiği andan çıktığı ana kadar çeşitli basınç kayıplarına maruz kalmaktadır. Bu basınç kayıpları; akışa ters yönde olan sürtünme kuvvetleri, çap değişimlerinde, radyuslu bölgelerde, ani çap daralmaları ve genişlemesi olan alanlarda, vana, pompa gibi bağlantı elemanlarının olduğu kısımlarda oluşan kayıplardır (Aracı ve Kınacı,2018). Bu kayıpları minimize etmek amacıyla kısa boylu neredeyse düz yapılı bir hortum seçilmiştir. Bu seçimin sonucu olarak da tahmin edildiği gibi giriş ve çıkış koşullarındaki basınç değişimi neredeyse 0'dır.

5.2 FEA Analizi ve ap Genişleme Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

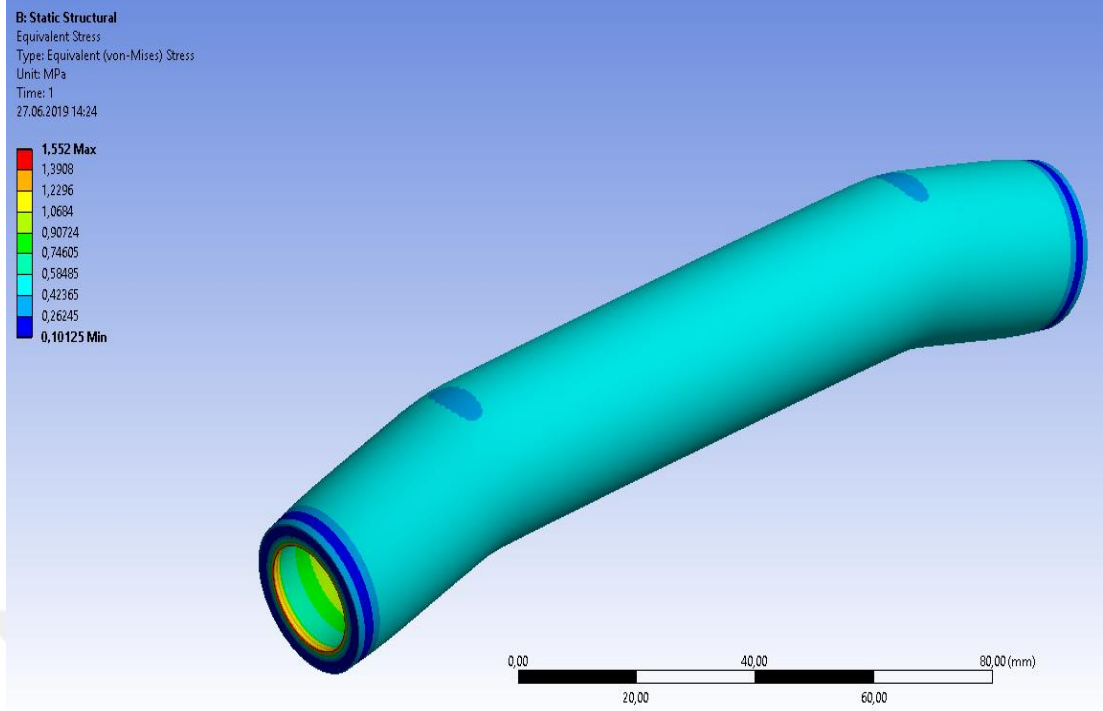
FEA analizinin amacı hortumun maruz kaldığı basınç kuvvetlerinin, hortum üzerinde meydana getirdiği deformasyonun tespit edilmesidir. Deformasyon, hortumun çapında meydana gelen genişleme olarak gözlemlenmektedir. Hortum belirli bir basına maruz kaldığında daireselliğini koruyamamakta ve hortum üzerinde belirli bölgelerde daha fazla bir basınç yığılması gözlemlenmektedir. Kauçuk hortumların yapılarında da sıcaklık altında bir kuvvete maruz kalan tüm malzemelerde gözlemlenen termal genişme görülmektedir. Bu genişme FEA analizinin çıktısı olarak değerlendirilebilmektedir.

Dört farklı kauçuktan üretilen hortumlar için yapısal analiz işlemleri tekrarlanmıştır. Ansys programı, kullanıcı isteklerine göre çeşitli sonuçları görüntüleyebilme yetkinliğine sahiptir. Yapılan çalışmada odaklanılan nokta, total deformation (toplam deformasyon) olarak adlandırılan parametredir. Ancak basınç kuvvetlerinin hortum üzerindeki etkisini görebilmek için test sonuçlarında, hortum üzerine etkiyen stress (gerilim) de incelenmiştir.

EPDM kauçuğundan üretilen hortum için gerilme (stress) ve toplam deformasyon sonuçları şekil 5.6'da ve şekil 5.7'de yer almaktadır:



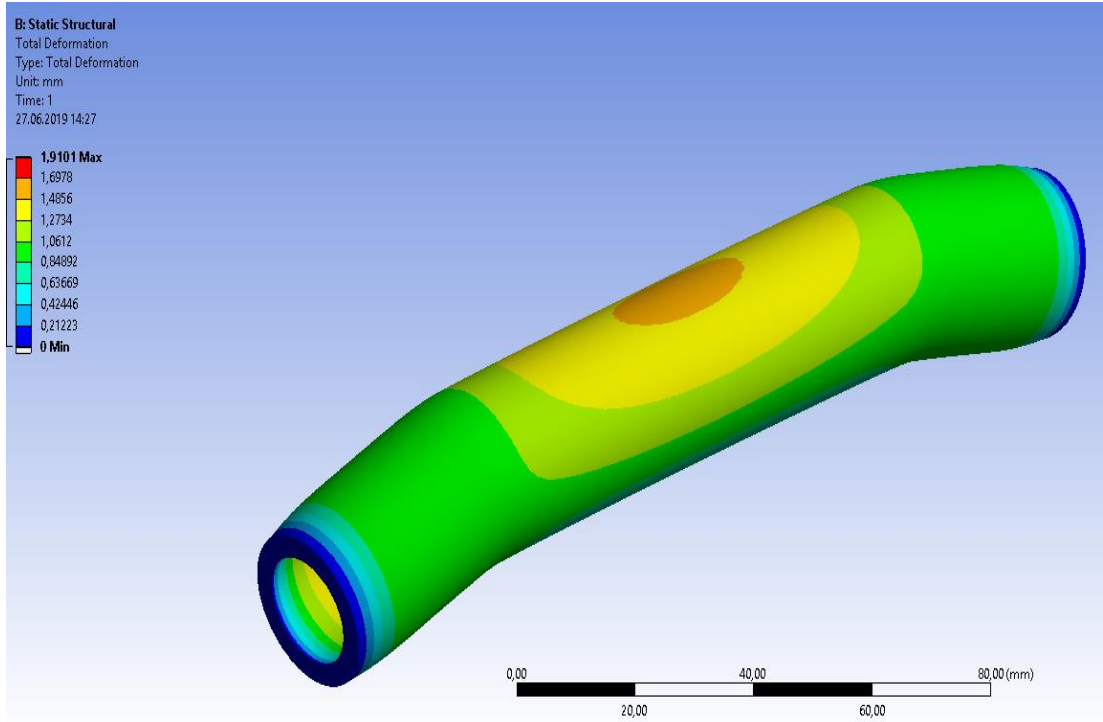
şekil 5.6: EPDM kauçuğundan üretilen hortumun toplam deformasyonu.



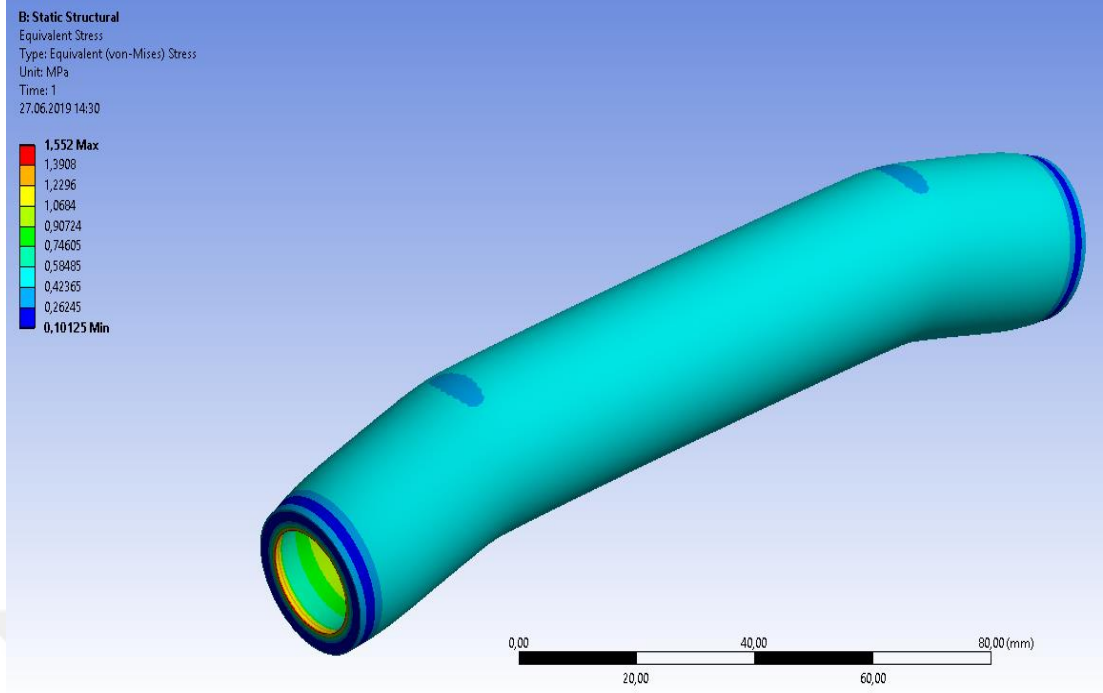
Şekil 5.7: EPDM kauçuğundan üretilen hortumun stress değerleri.

Sonuçlar; EPDM hortumda meydana gelen genişlemenin maksimum 1.05 mm olduğunu, hortum üzerine etkiyen yükün ise 1,55 MPa olduğunu göstermektedir.

ECO kauçuğundan üretilen hortum için gerilme (stress) ve toplam deformasyon sonuçları Şekil 5.8’de ve Şekil 5.9’da şu şekilde ifade edilmiştir:



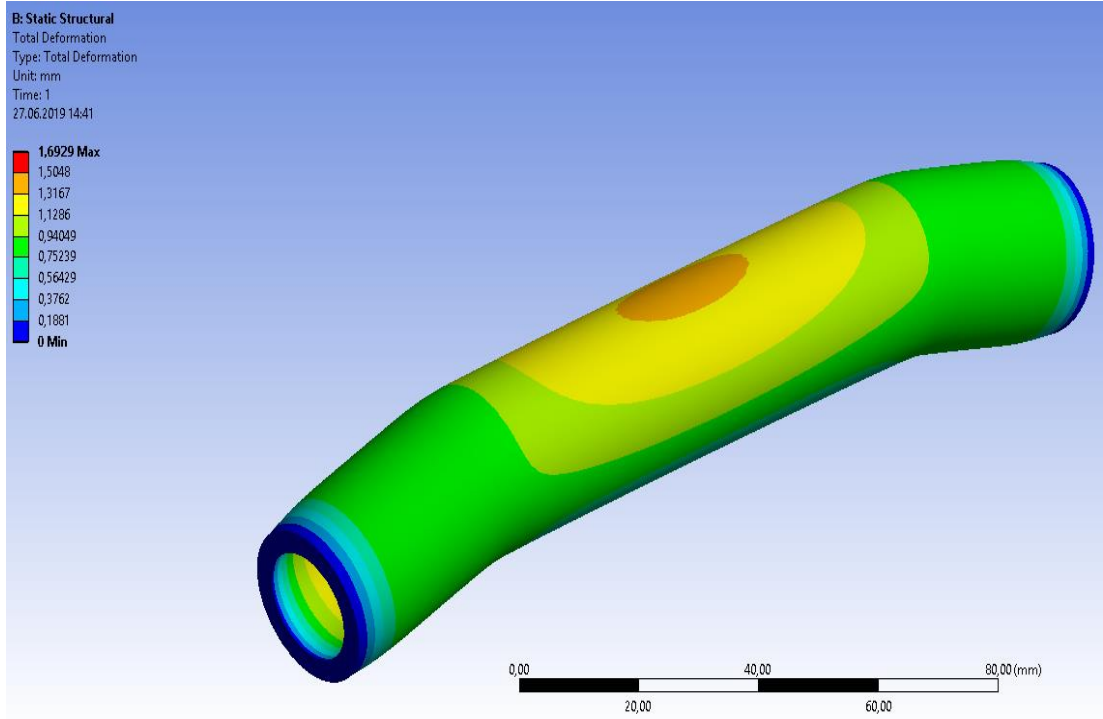
Şekil 5.8: ECO kauçuğundan üretilen hortumun toplam deformasyonu.



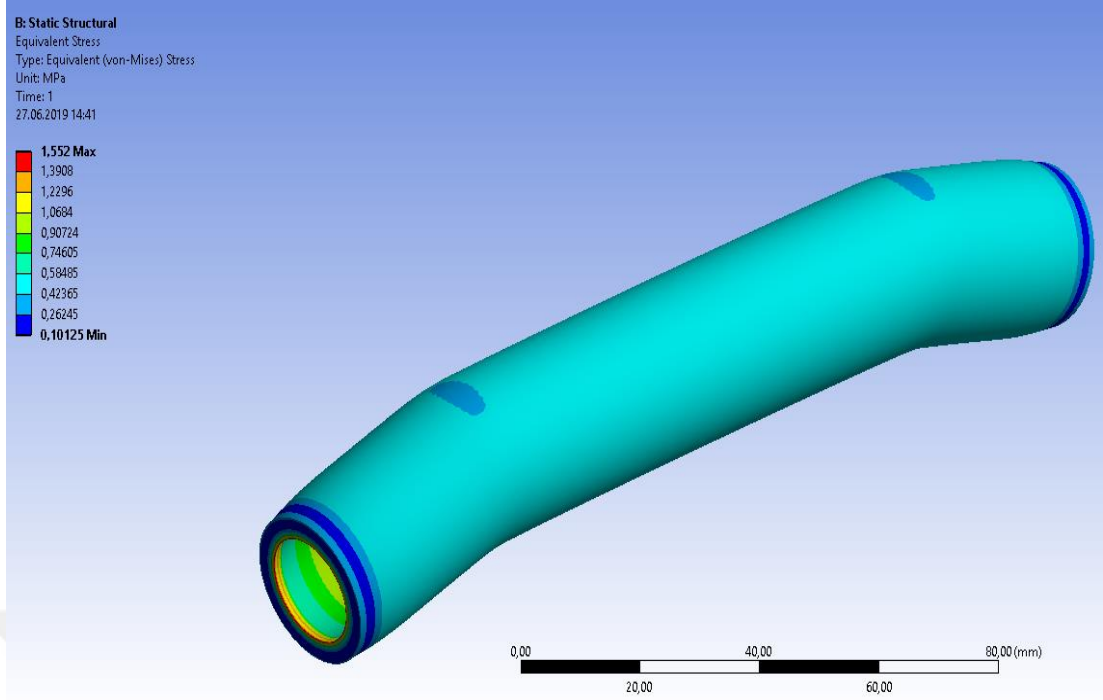
Şekil 5.9: ECO kauçuğundan üretilen hortumun stress değerleri.

Sonuçlar; ECO hortumda meydana gelen genişlemenin maksimum 1.91 mm olduğunu, hortum üzerine etkiyen yükün ise 1,55 MPa olduğunu göstermektedir.

AEM kauçuğundan üretilen hortum için gerilme (stress) ve toplam deformasyon sonuçları sırasıyla, Şekil 5.10'da ve Şekil 5.1'de verilmiştir:



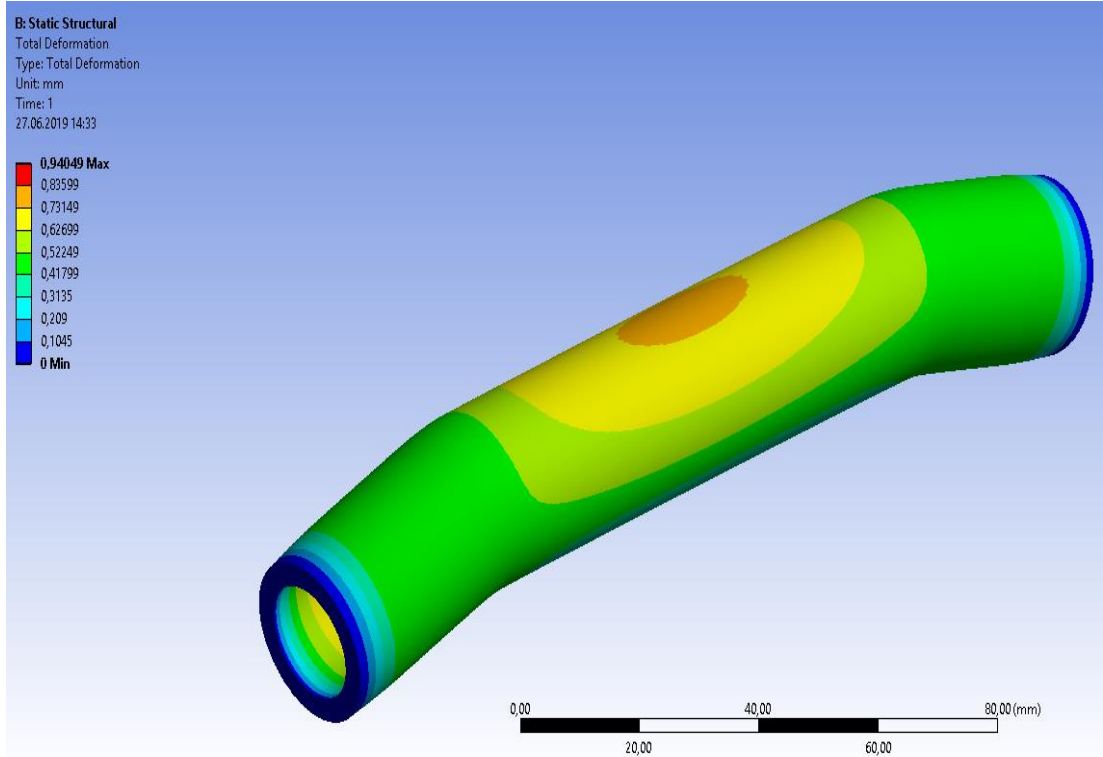
Şekil 5.10: AEM kauçuğundan üretilen hortumun toplam deformasyonu.



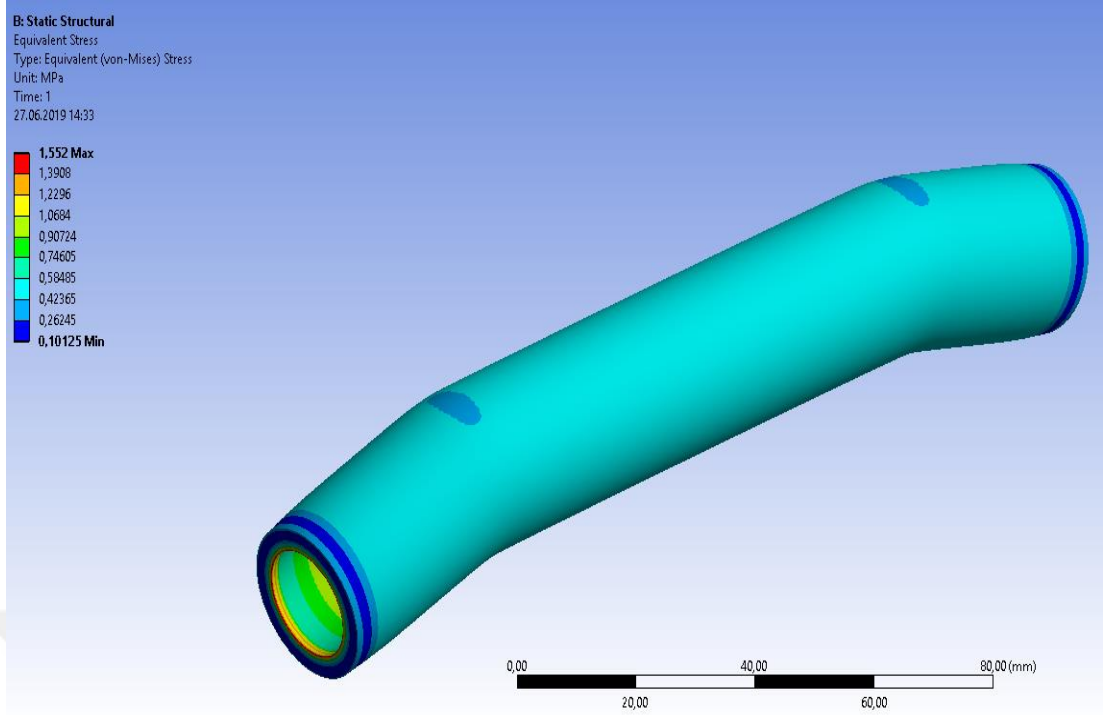
Şekil 5.11: AEM kauçuğundan üretilen hortumun stress değerleri.

Sonuçlar; AEM hortumda meydana gelen genişlemenin maksimum 1.70 mm olduğunu, hortum üzerine etkiyen yükün ise 1,55 MPa olduğunu göstermektedir.

NBR\CSM kauçuğundan üretilen hortum için gerilme (stress) ve toplam deformasyon sonuçları Şekil 5.12’de ve Şekil 5.13’te ilde ifade edilebilir:



Şekil 5.12: NBR\CSM kauçuğundan üretilen hortumun toplam deformasyonu.

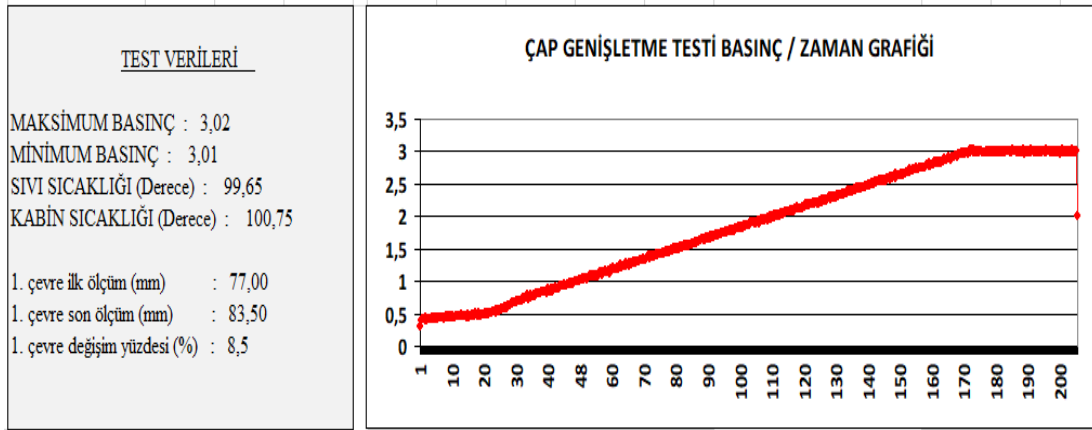


Şekil 5.13: NBR\CSM kauçuğundan üretilen hortumun stress değerleri.

Sonuçlar NBR\CSM hortumda genişlemenin maksimum 0,94 mm olduğunu, hortum üzerine etkiyen yükün ise 1,55 MPa olduğunu göstermektedir.

Hortum üzerine etkiyen gerilme (stress) değerleri incelendiğinde, sonuçların birbiri ile aynı değerler olduğu görülmektedir. Bu durum aynı şartlarda, aynı basınç değerlerinde test edilen hortumlar için beklenen bir durumdur. Ancak dört farklı kauçuk hortumu için toplam deformasyon, hortumların malzemeleri ile ilişkili olması sebebiyle farklı değerler göstermektedir.

Elatek Firması performans laboratuvarında gerçekleştirilen çap genişleme testinin sonuçları excel formatında rapor halinde elde edilmektedir. Bu raporda, test süresince oluşan maksimum ve minimum basınç, kabinde sıcaklık rejime ulaşıktan sonra ölçülen minimum ve maksimum sıcaklık değerleri bilgi olarak yer almaktadır. Cihazın ölçüm sonuçlarını doğru bir şekilde değerlendirebilmesi amacıyla, hortumun ilk çapı (katsayı ve pi sayısı sabit olduğu için çevre ölçümü gerçekleştirilmiştir.) ölçülerek program girdisi olarak yazılmıştır. Test gerçekleştirildikten sonra ölçülen son çap değerinin yazılması ile cihaz çap değişimindeki değeri % olarak ifade etmektedir. Örnek olarak 100°C’de EPDM kauçuk hortumu için gerçekleştirilen çap genişleme testi raporu Şekil 5.14’te verilmiştir:



Şekil 5.14: 100°C’de gerçekleştirilen EPDM kauçuk hortum çap genişleme testinin, excel sonuç raporunda yer alan test verileri ve basınç-zaman grafiği.

Yapılan çalışma kapsamında, üretilen hortumlardan belirli sıcaklıklarda sıvı geçirilmiş ve bu sıvının hortumun duvarları üzerinde bir basınç oluşturması sağlanmıştır. Bu testin bir çıktısı olarak, oluşan bu basınç dağılımının hortumu ne kadar deforme ettiği diğer bir deyiş ile hortumun çapında ne kadarlık bir artışa sebep olduğu ölçülerek tespit edilmiştir. Aynı işlemler FloEFD ve Ansys analiz programları yardımıyla simule edilmiş ve sonuçlar Çizelge 5.2’de yer alan çizelgede listelenmiştir. Bu çizelge 100°C’de gerçekleşen çap genişleme testinin ve termal genişleme analizinin sonuçlarını ifade etmektedir:

Çizelge 5.2: 100°C’de Çap genişleme testi ve termal genişleme analizi sonuçları.

Kauçuk Türleri	Testi Sonucu [mm]	Analizi Sonucu [mm]
EPDM	1,035 (%8,50)	1,05
AEM	1,75 (%14,28)	1,70
ECO	1,90 (%14,63)	1,91
NBR\CSM	1,11 (%8,86)	0,94

Çizelge 5.3’de 140°C’de gerçekleşen çap genişleme testinin ve termal genişleme analizinin sonuçları verilmiştir:

Çizelge 5.3: 140°C’de Çap genişleme testi ve termal genişleme analizi sonuçları.

Kauçuk Türleri	Testi Sonucu [mm]	Analizi Sonucu [mm]
EPDM	1,74 (%14,29)	1,05
AEM	1,87 (%15,58)	1,70
ECO	1,99 (%15,38)	1,91
NBR\CSM	1,92 (%15,38)	0,94

Çizelgeler incelendiğinde, 100°C’de test sonuçlarının ve analiz sonuçlarının birbiri ile oldukça yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durum hem CFD analizinde hem de FEA analizinde oluşturulan geometrik modelin ve belirlenen sınır şartlarının doğruluğunu kanıtlamaktadır.

100°C’de, dört kauçuk türü için yapılan incelemede, ECO kauçuk türünün en fazla genleşme gösteren kauçuk türü oldu tespit edilmiştir. Daha sonra genleşme miktarlarına göre sırasıyla AEM, NBR\CSM ve EPDM hortumları gelmektedir. Ancak sıcaklık artırılıp, kauçuk malzemelerin erime sıcaklığına yakın değerlere getirildiğinde en fazla genleşme sırasıyla ECO, NBR\CSM, AEM ve EPDM kauçuk türlerinde görülmektedir.

140°C’de gerçekleştirilen CFD analizinden elde edilen basınç kuvvetleri ve 100°C’de gerçekleştirilen CFD analizinden elde edilen basınç kuvvetleri benzer değerlerdedirler. Bu sebeple 140°C’de yapılan FEA analizinden elde edilen toplam deformasyon miktarı, 100°C’de elde edilen değerler ile aynıdır. 140°C’de yapılan çap genişleme testi sonucu ile aynı sıcaklık değerinde gerçekleştirilen analiz sonucu karşılaştırıldığında sonuçların, 100°C’de elde edilen sonuçlara oranla daha tutarsız olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmanın diğer bir sonucu olarak, aynı kauçuk türünün farklı sıcaklık değerlerindeki genleşme değerlerini incelediğimizde ise, tahmin edildiği gibi sıcaklık artışı genleşme miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek sıcaklıkta çalışan hortumların deforme olma olasılıkları, düşük sıcaklıkta çalışan hortumlara göre daha yüksektir. Bu durum kauçuk seçimi için en önemli parametre olma niteliği taşımaktadır.

5.3 Çalışmanın Uygulama Alanları

Kauçuk, 15. yüzyıl itibariyle dünya üzerinde kullanılmaya başlanan bir malzeme türüdür. Hammaddesi, kauçuk ağacı (*Hevea brasiliensis*) olarak bilinen tropik ağaçlardan elde edilmektedir. 19.yüzyıldan itibaren, çeşitli kimyasal maddelerin eklenmesi ile farklı sentetik kauçuk türleri elde edilmektedir. Teknolojinin gelişimiyle, endüstrilerde kauçuk kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Kauçuk dayanımı ve hafifliği sebebiyle özellikle otomotiv sektöründe geniş yer bulmuştur. 2013 yılında Türkiye otomotiv sektöründe, 156 bin ton kauçuk tüketimi gerçekleştirmiştir. Bu tüketim oranı 2005 yılına göre yüzde 33 artış göstermektedir (Pagder, 2013).

Yapılan çalışma, otomotiv sektörü başta olmak üzere tüm sektörlerde kullanımı yaygınlaşan kauçuk malzemeler için termal genişlemenin önemini vurgulamaktadır. Araç içerisinde bağlantı elemanı olarak kullanılan hortumların, kauçuk olarak seçilmesinin araçta hafifletmeye sebep olacağı bilinmektedir. Kauçuklar, malzeme yapısı gereği elastik malzemelerdir. Bu durum, malzemenin kırılmadan belirli kuvvet veya basınç altında tekrarlı şekilde kullanabileceği anlamına gelmektedir. Ancak, yüksek sıcaklıklarda kauçuk malzemelerin elastik yapısında değişim görülebileceği yapılan deneyler ve analizler ile kanıtlanmıştır.

Çalışmanın uygulama alanı olarak belirtilebilir ki; kauçuk malzeme seçiminde aracın çalışma şartları, araç motorunun ulaşacağı sıcaklık ve aracın performansı oldukça önemlidir. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere, hortumlar kimyasal yapılarının tamamen bozulduğu sıcaklıklara ulaşmayan daha düşük sıcaklıklarda bile genişleme eğilimindedir. Bu durum, hortumların sabit çapta katı madde olarak modellenmesinin doğru olmadığını ve bu modellemenin kullanıldığı hesaplamaların, hortumların çalışma koşullarındaki kötü senaryoyu yansıtmadığını belirtmektedir. Kötü senaryoya göre yapılmayan hesaplamalar, beklenmedik durumlar ile karşılaşılabilmesinin bir göstergesidir.

Yapılan testler ve analizler farklı sıcaklık değerlerinde tekrarlanabilmektedir. Böylelikle yapılan çalışma, her kauçuk türü için sıcaklık-genişleme oranı matrisi elde edilerek genişletilebilmekte ve bu açıdan temel bir bilgi niteliğinde olmaktadır. Ayrıca yapılan çalışma inşaat, savunma, otomotiv, denizcilik veya havacılık gibi birçok sektörde gerçekleştirilen yeni ürün tasarımı çalışmalarında; malzeme seçimi aşamasında destekleyici özelliktedir.

KAYNAKLAR

Thomas, S., Rane, A. V., Abitha, V. K., Kanny, K., Dutta, A. (2018). Hydraulic Rubber Dam: An Effective Water Management Technology. William Andrew. 25-36., doi: 10.1016/B978-0-12-812210-5.00003-1

ANSYS Fluent. (2018). RBF Morph makes ANSYS Fluent more Flexible in RIBES Clean Sky Project. <https://www.ansys.com/blog/rbf-morph-clean-sky>

Aracı, S., & Kınacı, Ö. K. (2018) Boru İçi Akışlarda Basınç Kaybının Sayısal Hesabı. Erişim: https://www.journalagent.com/gmo/pdfs/GMO_24_211_39_60.pdf

ASM International. (2002). ASM Ready Reference Thermal Properties of Metals. Materials Park, Ohio 44073-0002. Erişim <https://www.asminternational.org/documents/10192/3449965/ACFAAD6.pdf/2d574bfc-e104-48c5-8d8e-c33ffe91c3a0>

Bak, S., & Yoo, J. (2019). FSI analysis on the sail performance of a yacht with rig deformation. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(2), 648-661.

Bereznitski, A., & Kaminski, M. L. (2002). Practical Implications of Hydroelasticity in Ship Design. In The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. *International Society of Offshore and Polar Engineers*.

Bokaian, A. (2004). Thermal expansion of pipe-in-pipe systems. *Marine structures*, 17(6), 475-500.

Cengel, Y. (2010). Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications (Si Units). Tata McGraw Hill Education Private Limited.

Clancy, L., (2017). Erişim: 18 Nisan 2019 <https://studentreader.com/6PVJP/thermal-expansion/>

Expansion joints. (2019). Erişim: 17 Nisan 2019 http://www.solidswiki.com/index.php?title=Expansion_Joints

Ezkurra Mayor, M., Esnaola Ramos, J. A., Martínez Agirre, M., Lertxundi, U., Etxeberria, U. (2018). Analysis of One-Way and Two-Way FSI Approaches to Characterise the Flow Regime and the Mechanical Behaviour during Closing Manoeuvring Operation of a Butterfly Valve. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Materials Engineering* 12(4), 409-415.

Fish, J., & Belytschko, T. (2007). A first course in finite elements. Erişim adresi <https://books.google.com.tr/books> (Orijinal eser 2007'de basıldı)

Gorski, J. J. (2002). Present state of numerical ship hydrodynamics and validation experiments. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 124 (2), 74-80., doi: 10.1115/1.1425397

- Handeland, M. P.** (2015). *Importance of Fluid-Structure Interaction on Dropped Lifeboats-A parametric study used to explore the importance of hydroelasticity on complex low rigidity structures using decision factors* (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi <https://pdfs.semanticscholar.org/5b34/a3e648537f0a302ec6cba92ffdba510bdefd.pdf>
- Johannessen, S. R.** (2012). *Use of CFD to Study Hydrodynamic Loads on Free-Fall Lifeboats in the Impact Phase.: A verification and validation study* (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi https://mdx2.plm.automation.siemens.com/sites/default/files/thesis/pdf/thesis_johannessen.pdf
- Kodal, M., Karakaya, N., Wis, A. A., & Ozkoc, G.** (2019). Thermal Properties (DSC, TMA, TGA, DTA) of Rubber Nanocomposites Containing Carbon Nanofillers. *In Carbon-Based Nanofiller and Their Rubber Nanocomposites*, 325-366., doi: 10.1016/B978-0-12-817342-8.00011-1
- Langen, I., & Sigbjörnsson, R.** (1979). Dynamisk analyse av konstruksjoner: Dynamic analysis of structures. Erişim adresi <https://www.fagbokforlaget.no/Dynamiske-systemer/I9788251922609> (Orişinal eser 2007 de basıldı)
- Lee, K., Huque, Z., Kommalapati, R., Han, S. E.** (2017). Fluid-structure interaction analysis of NREL phase VI wind turbine: Aerodynamic force evaluation and structural analysis using FSI analysis. *Renewable Energy*, 113, 512-531., doi: 10.1016/j.renene.2017.02.071
- Liu, Z. K., Shang, S. L., Wang, Y.** (2017). Fundamentals of thermal expansion and thermal contraction. *Materials*, 10(4), 410.
- McKeen, L. W.** (2019). The effect of UV light and weather on plastics and elastomers. *William Andrew*, 279-359., doi: 10.1016/B978-0-12-816457-0.00010-1
- Pagder.** (2013). Erişim adresi: <http://www.pagder.org/haberdetay.php?id=54>
- Painting, B.** (2017). Erişim: 19 Nisan 2019 <https://sciencing.com/calculate-thermal-expansion-cylinder-6505422.html>
- Rubber Asia.** (2017). Erişim tarihi: 23 Nisan 2019 <https://www.rubberasia.com/2017/04/05/world-rubber-consumption-1-8-2016-says-irsg/>
- Sim, L., Ramanan, S. R., Ismail, H., Seetharamu, K. N., Goh, T. J.** (2005). Thermal characterization of Al₂O₃ and ZnO reinforced silicone rubber as thermal pads for heat dissipation purposes. *Thermochimica acta*, 430(1-2), 155-165., doi: 10.1016/j.tca.2004.12.024
- Sleight, A. W.** (1995). Thermal contraction. *Endeavour*, 19(2), 64-68., doi: 10.1016/0160-9327(95)93586-4
- Solorio, J.** (2018). How To Account For Thermal Expansion In Piping System Design. Erişim: 21 Nisan 2019 <https://www.corzan.com/blog/how-to-account-for-thermal-expansion-in-piping-system-design>
- The Phenomenon of Thermal Expansion.** (2019). Erişim: 17 Nisan 2019 <https://www.brighthubengineering.com/thermodynamics/20956-the-mystery-of-thermal-expansion/> <https://www.brighthubengineering.com/manufacturing-technology/38377-what-is-thermal-expansion/>

Thermal Expansion of Solids and Liquids. (2019). Erişim: 17 Nisan 2019
<https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/13-2-thermal-expansion-of-solids-and-liquids/>

Thermal Expansion. (2019). Erişim:17 Nisan 2019
<https://brilliant.org/wiki/thermal-expansion/>

Thermal Physics: A Macroscopic View. (2019) Erişim: 22 Nisan 2019
http://www.webassign.net/question_assets/buelemphys1/chapter13/section13dash2.pdf

Wong, C. P., & Bollampally, R. S. (1999). Thermal conductivity, elastic modulus, and coefficient of thermal expansion of polymer composites filled with ceramic particles for electronic packaging. *Journal of applied polymer science*, 74(14), 3396-3403.

Zhou, W., Wang, C., An, Q., Ou, H. (2008). Thermal properties of heat conductive silicone rubber filled with hybrid fillers. *Journal of Composite Materials*, 42(2), 173-187., doi: 10.1177/0021998307086184

Zhou, W. Y., Qi, S. H., Zhao, H. Z., Liu, N. L. (2007). Thermally conductive silicone rubber reinforced with boron nitride particle. *Polymer composites*, 28(1), 23-28., doi: 10.1002/pc.20296

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Nithiarasu, P. (2013). The Finite Element Method for Fluid Dynamics (Seventh Edition). *Butterworth-Heinemann*. 14 (i)., doi: 10.1016/B978-1-85617-635-4.00016-9

ÖZGEÇMİŞ

TARANMIŞ
VESİKALIK
FOTOĞRAF

Ad-Soyad : Aslıhan Çakır
Doğum Tarihi ve Yeri : 1993 Bursa
E-posta : aslihancakiir@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Elatek Kauçuk- Tasarım ve simülasyon mühendisi
- Can Metal- Proje Mühendisi

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- 9.Uluslararası Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Otekon 2018 - Air Flow Characteristic of Air Intake Hose with Numerical and Experimental Analysis