

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**SU İLE ÇALIŞAN HİDROLİK BİR DİNAMOMETRENİN FLUENT ANALİZİ VE
TORK KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ**

**Ahmet Görkem ÇOLAK
2021014842**

**Danışman:
Doç. Dr. Dinçer BURAN**

**SEMİNER ÖDEVİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
ISPARTA – 2025**

SEMİNER ÖDEVİ BEYANI

Seminer ödevi içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca Seminer ödevi yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Temmuz 2025 (Tarih: Ay / Yıl)

(imza)

Ad-Soyad

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLOLAR DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1.GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
2.KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)	3
2.2. Türbülans Modellemesi.....	3
2.3. Dönen Akış Alanları: Moving Reference Frame (MRF).....	4
3.MATERYAL VE METOT	5
3.1 Geometrik Modelleme (SolidWorks)	5
3.1.1. Dinamometre Bileşenleri ve 3B Modelleri	5
3.1.2. Montaj Modeli ve Çalışma Prensibi.....	9
3.2 Sayısal Analiz İçin Hesaplama Alanının Oluşturulması	10
3.2.1 Akışkan Hacminin Çıkarılması (Fluid Domain Extraction).....	11
4. Sayısal Ağ (Mesh) Oluşturulması	15
4.1. Sınırların İsimlendirilmesi (Named Selections).....	15
4.2. Sayısal Ağ Kontrolleri ve Kalite Optimizasyonu.....	16
4.2.1 Bölgesel Yoğunluk Kontrolü (Body Sizing)	16
4.2.2 Kalite Optimizasyon Metotları.....	17
4.3. Nihai Ağ (Mesh) Özellikleri.....	18
5.SAYISAL ANALİZ KURULUMU VE ÇÖZÜM SÜRECİ.....	20
5.1. Çözücü Ayarları ve Fiziksel Modeller.....	20
5.2. Malzeme ve Bölge Tanımlamaları	20
5.3. Sınır Koşulları	21
5.4. Çözüm Kontrolleri ve Yakınsama Kriterleri	21
5.4.1 Çözüm Yöntemleri	21

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	23
6.1.Parametrik Analiz Sonuçları.....	23
6.2 Sonuçların Tartışılması.....	23
7.GENEL SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER.....	25
7.1. Genel Sonuç	25
7.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler	26
8.KAYNAKÇA	27
EKLER	28

ÖZET

SEMİNER ÖDEVİ

SU İLE ÇALIŞAN HİDROLİK BİR DİNAMOMETRENİN FLUENT ANALİZİ VE TORK KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ

Ahmet Görkem ÇOLAK

Süleyman Demirel Üniversitesi

Makine Mühendisliği Bölümü

Danışman: Doç. Dr. Dinçer BURAN

Bu çalışmada, bir mil üzerinde konumlandırılmış iki sabit stator ve bu statorlar arasında dönen bir rotordan oluşan hidrolik bir dinamometrenin performans analizi, Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin çalışma prensibi, stator üzerindeki deliklerden giren şebeke suyunun, stator ve rotor üzerindeki kanalcıklar boyunca ilerleyerek rotora bir tork uygulaması ve ardından rotor üzerindeki deliklerden sistemi terk etmesine dayanmaktadır. Analizler, yaygın olarak kullanılan sonlu hacimler tabanlı bir HAD yazılımı olan ANSYS Fluent üzerinde yapılmıştır.

Analiz sürecinde, dinamometrenin üç boyutlu katı modeli oluşturulmuş, akışkanın hareket ettiği hacim (akış alanı) çıkarılmış ve bu hacim sonlu elemanlara ayrılarak bir ağ (mesh) yapısı oluşturulmuştur. Akışın türbülanslı doğası göz önüne alınarak k-ε (k-epsilon) türbülans modeli kullanılmıştır. Sınır koşulları olarak, stator girişlerine belirli bir debide su girişi ve rotor çıkışlarına atmosfer basıncı tanımlanmıştır. Rotorun dönme hareketi, "Moving Reference Frame" (MRF) yaklaşımı ile modele dahil edilmiştir.

Yapılan simülasyonlar sonucunda, akış alanı içerisindeki hız ve basınç dağılımları elde edilmiştir. Rotor kanalcıklarının yüzeylerine etki eden basınç kuvvetlerinden yola çıkılarak, farklı akış debileri için rotor miline uygulanan tork değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, dinamometrenin tork ölçüm karakteristiğini ortaya koymakta ve tasarımın optimizasyonu için önemli veriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dinamometre, Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD), ANSYS Fluent, Tork Analizi, Akış Simülasyonu, Türbülans Modelleme.

ABSTRACT

THESIS

FLUENT ANALYSIS AND TORQUE CHARACTERIZATION OF A WATER-POWERED HYDRAULIC DYNAMOMETER

Ahmet Görkem  OLAK

Süleyman Demirel University

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Do . Dr. Dinçer BURAN

In this study, the performance analysis of a hydraulic dynamometer, consisting of two fixed stators positioned on a shaft and a rotor rotating between them, was carried out using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The operating principle of the system is based on the mains water entering through the holes on the stator, applying a torque to the rotor by flowing through the channels on the stator and rotor, and then exiting the system through the holes on the rotor. The analyses were performed on ANSYS Fluent, a commonly used finite volume-based CFD software.

In the analysis process, a three-dimensional solid model of the dynamometer was created, the fluid volume (flow domain) was extracted, and this volume was divided into finite elements to form a mesh structure. The $k-\epsilon$ (k-epsilon) turbulence model was used, considering the turbulent nature of the flow. As boundary conditions, a specific water flow rate was defined at the stator inlets, and atmospheric pressure was defined at the rotor outlets. The rotational motion of the rotor was included in the model using the "Moving Reference Frame" (MRF) approach.

As a result of the simulations, velocity and pressure distributions within the flow domain were obtained. The torque values applied to the rotor shaft for different flow rates were calculated based on the pressure forces acting on the surfaces of the rotor channels. The results reveal the torque measurement characteristic of the dynamometer and provide important data for design optimization.

Keywords: Dynamometer, Computational Fluid Dynamics (CFD), ANSYS Fluent, Torque Analysis, Flow Simulation, Turbulence Modeling.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Statorun 3B Katı Modeli (Dış Görünüşü)	5
Şekil 3.2 Statorun 3B Katı Modeli (İç Görünüşü)	6
Şekil 3.3 Rotorun 3B Katı Modeli	7
Şekil 3.4 Milin 3B Katı Modeli	8
Şekil 3.5 Gövde (Cover) 3B Katı Modeli	8
Şekil 3.6 Dinamometrenin Montaj Modeli	9
Şekil 3.7 Workbench Üzerinden Sistemin Kurulması	10
Şekil 3.8 Hatalı Çıkarılan Akışkan Hacminin Görseli	11
Şekil 3.9 Sızdıran Bölgelerin "Fill" Komutu ile Kapatılması	12
Şekil 3.10 Başarıyla Çıkarılmış ve Bölgelere Ayrılmış Akışkan Hacmi	13
Şekil 3.11 Su Hacminin Bölünerek İsimlendirilmesi.....	14
Şekil 4.1 İsimlendirmenin Yapılması.....	15
Şekil 4.2 Bölgesel Mesh Kontrolü ve Mesh Detayları.....	17
Şekil 4.3 Optimizasyon Sonrası Yapılan Mesh 'in Son Hali.....	18
Şekil 4.4 Skewness ve Orthogonal Quality Değerleri.....	19

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 6.1: Dinamometrenin Devir Sayısına Bağlı Tork Performans Grafiği.....	23
--	----

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

μ : Dinamik Viskozite ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

p : Basınç (Pa)

V : Hız Vektörü (m/s)

F : Hacimsel Kuvvetler (N/m^3)

k : Türbülans Kinetik Enerjisi (m^2/s^2)

ϵ : Türbülans Kinetik Enerjisi Yayılım Oranı (m^2/s^3)

ω : Spesifik Yayılım Oranı ($1/\text{s}$)

T : Tork (Nm)

Kısaltmalar

3B : Üç Boyutlu

HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

CFD : Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)

MRF : Moving Reference Frame (Hareketli Referans Çerçevesi)

RPM : Revolutions Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)

CAD : Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)

SST : Shear Stress Transport

1.GİRİŞ

Dinamometreler, motorların, türbinlerin ve diğer güç üreten makinelerin tork ve güç gibi performans karakteristiklerini ölçmek için kullanılan temel test cihazlarıdır. Çalışma prensiplerine göre mekanik, hidrolik, elektrik ve girdap akımlı gibi çeşitli tipleri bulunmaktadır. Hidrolik dinamometreler, bir akışkanın momentum değişiminden faydalanarak frenleme torku oluşturur ve bu torku ölçer [2]. Genellikle yüksek güç kapasiteleri ve kararlı çalışmaları nedeniyle tercih edilirler.

Bu çalışmanın konusunu oluşturan dinamometre, özel bir tasarıma sahiptir. Sistem, sabit stator elemanlarından giren suyun, dönen rotor elemanı üzerindeki kanalcıkları iterek bir tork oluşturması ve bu sayede test edilen makinenin gücünü sönümleyerek ölçmesi prensibine dayanır. Bu tür sistemlerin tasarımında ve optimizasyonunda, akışkanın davranışını doğru bir şekilde anlamak kritik öneme sahiptir.

Geleneksel yöntemlerle (deneysel prototip üretimi) bu tür analizleri yapmak yüksek maliyetli ve zaman alıcıdır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkan hareketini yöneten Navier-Stokes denklemlerinin sayısal olarak çözülmesine dayanan bir mühendislik analiz yöntemidir [1,4]. ANSYS Fluent gibi gelişmiş HAD yazılımları, karmaşık geometrilere sahip sistemlerdeki akışları yüksek doğrulukla modelleme imkanı sunar [3]. Bu sayede, prototip üretimine gerek kalmadan basınç kayıpları, hız profilleri, kuvvetler ve torklar gibi önemli parametreler hesaplanabilir.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tezin temel amacı, belirtilen stator-rotor yapısındaki hidrolik dinamometrenin iç akışını ANSYS Fluent yazılımı kullanarak modellemek ve sistemin farklı çalışma koşullarındaki tork üretme karakteristiğini sayısal olarak belirlemektir.

Bu amaç doğrultusunda çalışmanın kapsamı aşağıdaki adımları içermektedir:

1. Dinamometrenin (mil, statorlar ve rotor) üç boyutlu (3B) geometrik modelinin oluşturulması.
2. Analiz edilecek olan akışkan hacminin katı modelden çıkarılması.
3. Akışkan hacminin uygun kalitede bir ağ (mesh) yapısı ile sonlu elemanlara bölünmesi.
4. ANSYS Fluent ortamında analiz kurulumunun yapılması: Türbülans modelinin seçimi, akışkan özelliklerinin tanımlanması, sınır koşullarının (giriş debisi, çıkış basıncı) ve rotorun dönme hareketinin atanması.
5. Sayısal çözümün gerçekleştirilmesi ve sonuçların yakınsamasının izlenmesi.

6. Analiz sonrası (post-processing) işlemlerle hız konturları, basınç haritaları ve akış çizgileri gibi görsel sonuçların elde edilmesi.
7. Rotor yüzeylerindeki basınç ve viskoz kuvvetlerden kaynaklanan net torkun hesaplanması.

2.KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, akışkan davranışını yöneten temel korunum denklemlerini (kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu) sayısal yöntemler kullanarak çözen bir bilim dalıdır. Bu denklemler, sıkıştırılamaz bir akış için aşağıdaki gibi ifade edilen Navier-Stokes denklemleri olarak bilinir [1, 2]:

- Kütlenin Korunumu (Süreklilik Denklemi):

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

- Momentumun Korunumu:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{F}$$

Bu denklemlerin analitik çözümü sadece çok basit geometriler ve akış koşulları için mümkündür. HAD yazılımları, analiz edilecek olan akış alanını (domain) "hücre" veya "eleman" adı verilen çok sayıda küçük alt bölgeye ayırır. Bu işleme **ağ (mesh) oluşturma** denir. Ardından, her bir hücre için bu denklemler cebirsel denklemlere dönüştürülür ve güçlü bilgisayarlar aracılığıyla iteratif olarak çözülür [2].

2.2. Türbülans Modellemesi

Dinamometre içindeki akış, yüksek hızlar ve karmaşık geometri nedeniyle kaçınılmaz olarak türbülanslı olacaktır. Türbülanslı akışlar, akış özelliklerinin (hız, basınç vb.) zaman ve mekan içinde kaotik ve rastgele dalgalanmalar gösterdiği akışlardır. Bu dalgalanmaları doğrudan çözmek muazzam bir hesaplama gücü gerektirdiğinden, mühendislik uygulamalarında türbülans modelleri kullanılır [2].

Bu çalışmada, endüstriyel uygulamalarda sağlam yapısı ve makul doğruluk seviyesi nedeniyle yaygın olarak tercih edilen **k-ε (k-epsilon) türbülans modeli** kullanılmıştır. Bu model, türbülans kinetik enerjisi (k) ve bu enerjinin yayılım oranı (ε) için iki ek taşıma denklemi çözerek türbülansın etkilerini modele dahil eder [2, 3].

2.3. Döner Akış Alanları: Moving Reference Frame (MRF)

Dinamometre analizinin en önemli noktalarından biri, rotorun dönme hareketini simülasyona dahil etmektir. ANSYS Fluent, bu tür problemleri çözmek için birkaç yöntem sunar. Bu çalışmada **Moving Reference Frame (MRF)** veya diğer adıyla "Frozen Rotor" yaklaşımı kullanılmıştır [3].

MRF yönteminde, döner bileşeni (rotoru) çevreleyen akışkan hacmi, sabit bir açısal hızla döner bir referans sistemindeymiş gibi kabul edilir. Akış denklemleri bu döner referans sistemine göre çözülür. Bu yöntem, özellikle kararlı durum analizlerinde, döner ve sabit parçalar arasında güçlü bir etkileşimin olduğu durumlarda (turbomakineler, mikserler, dinamometreler vb.) hesaplama maliyetini düşürerek hızlı ve etkili sonuçlar verir [5].

3.MATERYAL VE METOT

3.1 Geometrik Modelleme (SolidWorks)

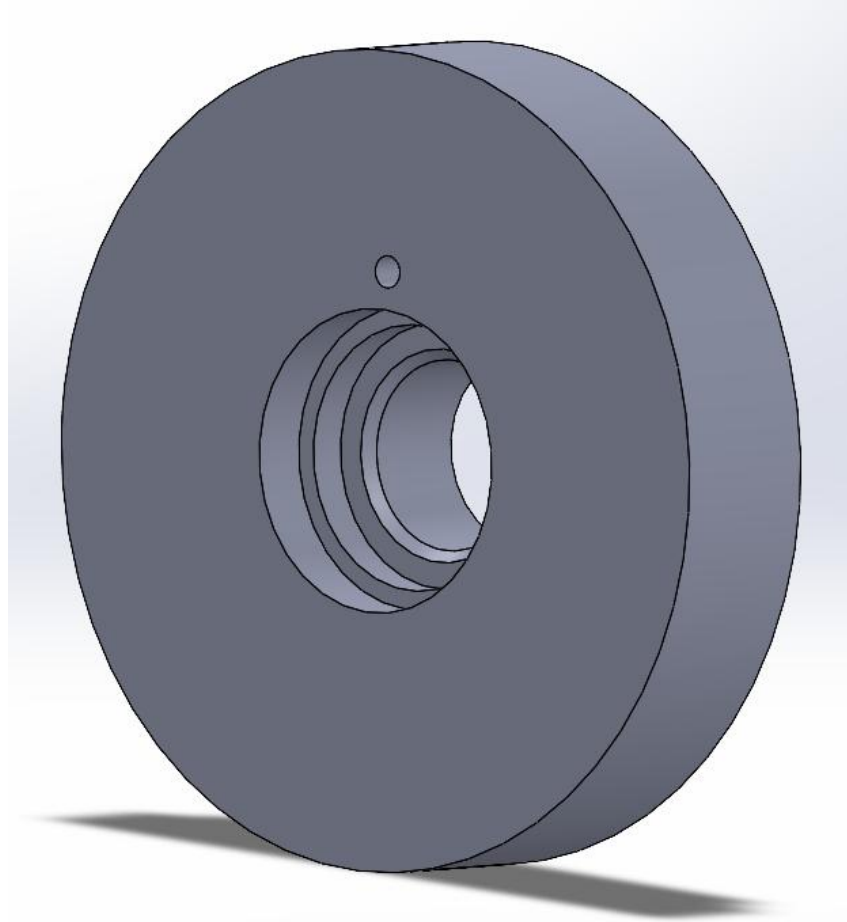
Analizin ilk adımı olan üç boyutlu (3B) modelleme, SolidWorks programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, dinamometreyi oluşturan ana bileşenler tanıtılmış ve çalışma prensibi açıklanmıştır.

3.1.1. Dinamometre Bileşenleri ve 3B Modelleri

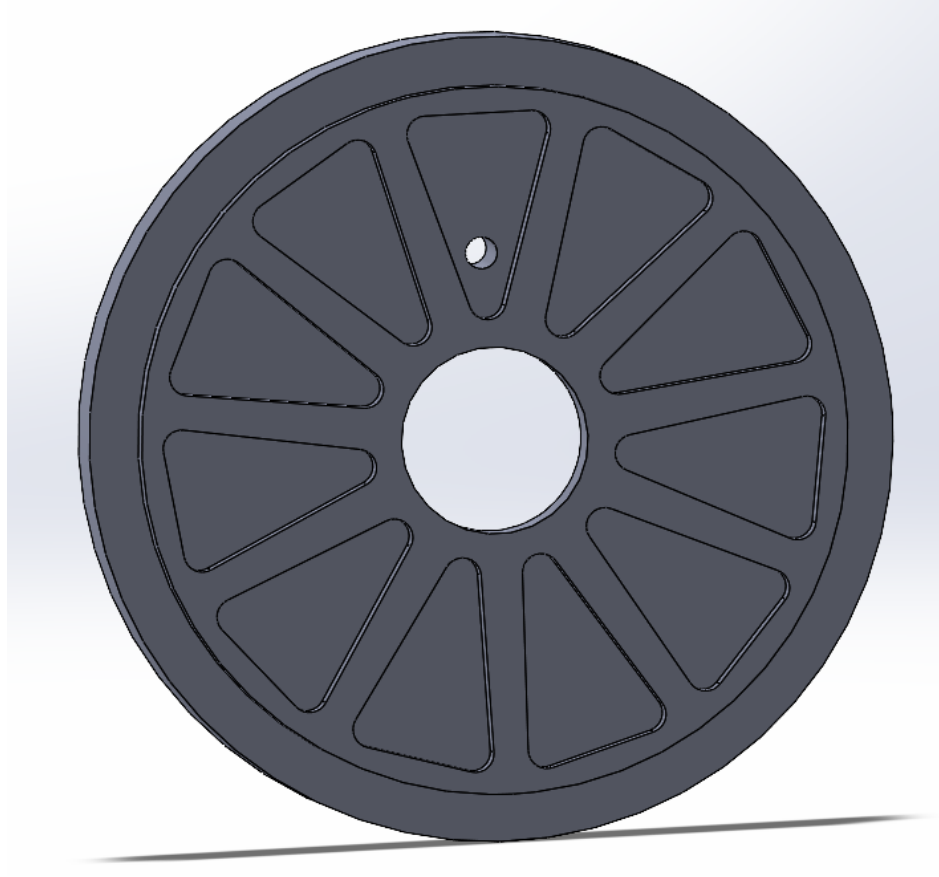
Dinamometre; bir mil, bir rotor, iki stator ve rotoru çevreleyen bir gövdeden (Cover) oluşmaktadır.

3.1.1.1 Stator

Döner bir sistemin sabit, yani dönmeyen parçasıdır. Bu dinamometrede statorlar, şebekeden gelen suyu belirli bir yönde ve hızda rotor kanatçıklarına yönlendirme görevini üstlenir. Üzerlerinde suyun giriş yaptığı delikler ve akışı yönlendiren kanalcıklar bulunur. Görsel örnekleri Şekil 3.1 ve 3.2’de gösterilmektedir.



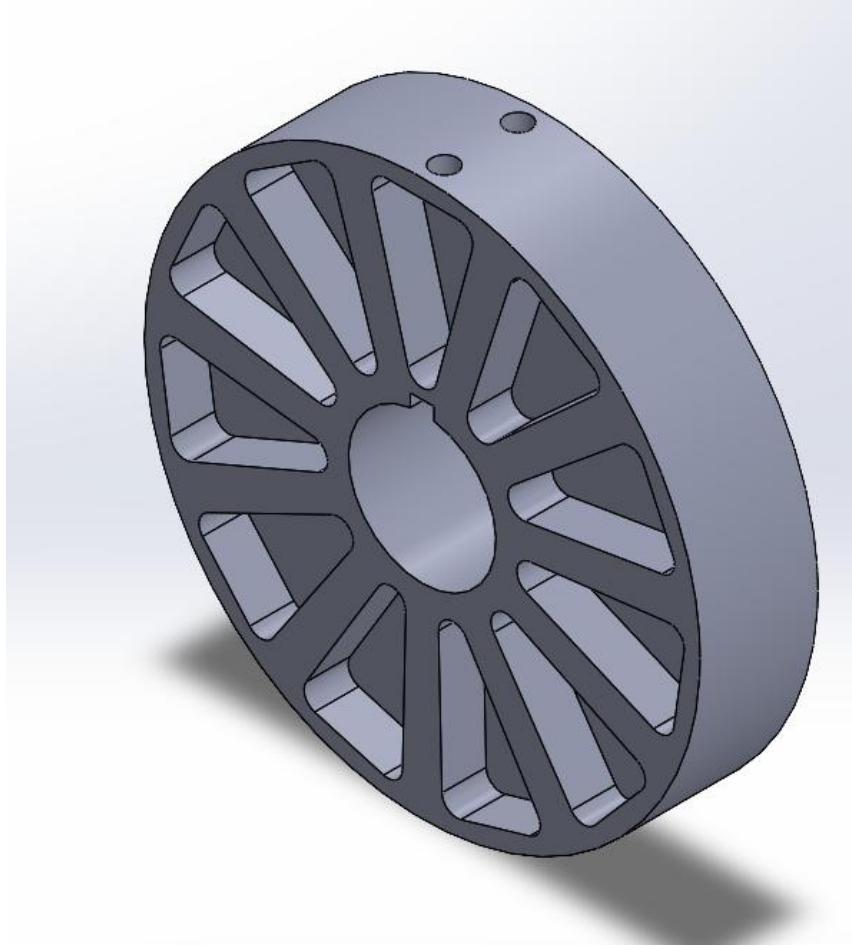
Şekil 3.1 Statorun 3B Katı Modeli (Dış Görünüşü)



Şekil 3.2 Statorun 3B Katı Modeli (İç Görünüşü)

3.1.1.2 Rotor

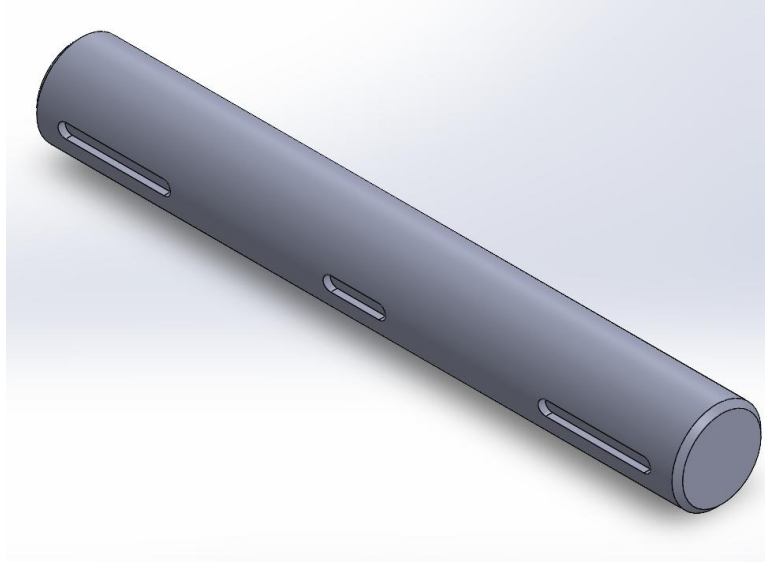
Sistemin mil üzerine montajlanmış dönen parçasıdır. Statorlardan gelen suyun kinetik enerjisi, rotor üzerindeki kanalcıkların yüzeylerine çarparak bir itme kuvveti oluşturur. Bu kuvvet, rotorun mil ekseninde dönmesini sağlayarak bir tork meydana getirir. Akışkan, rotordaki kanalcıklar boyunca ilerledikten sonra merkezdeki deliklerden sistemi terk eder. Görsel örneği Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Rotorun 3B Katı Modeli

3.1.1.3 Mil

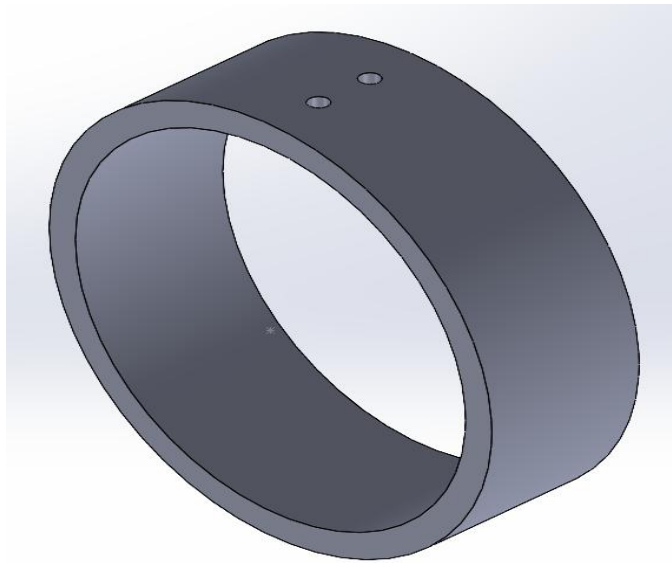
Rotorun üzerine monte edildiği ve dönme hareketini sisteme ileten ana elemandır. Test edilecek motorun çıkışına bağlanır. Görsel örneği Şekil 3.4’de gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Milin 3B Katı Modeli

3.1.1.4 Gövde (Cover)

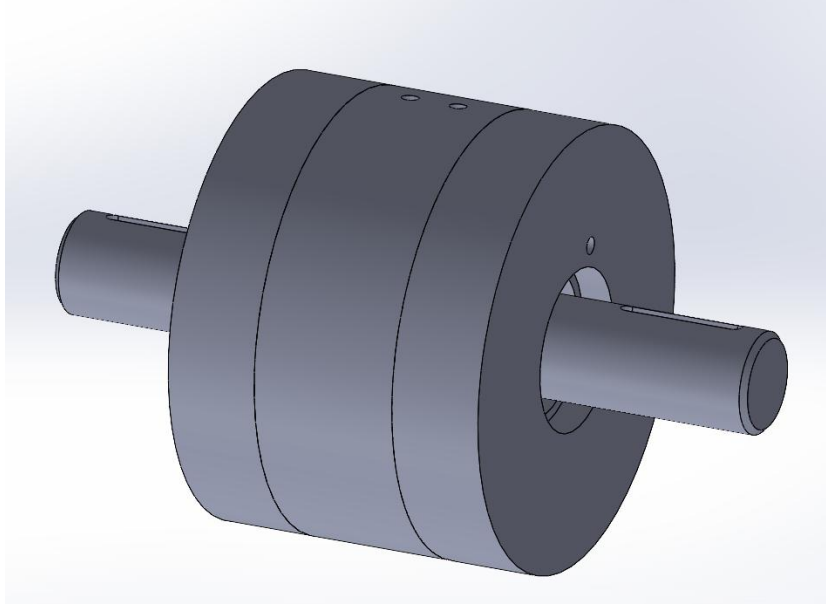
Rotorun etrafını çevreleyen ve statorlarla birlikte akışkanın çalışma boşluğunu oluşturan dış muhafazadır. Sızdırmazlığı sağlar ve sistemi bir arada tutar. Görsel örneği Şekil 3.5’de gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Gövde (Cover) 3B Katı Modeli

3.1.2. Montaj Modeli ve Çalışma Prensibi

Tüm bileşenler, SolidWorks ortamında birleştirilerek dinamometrenin montaj modeli oluşturulmuştur. Görsel örneği Şekil 3.6’de gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Dinamometrenin Montaj Modeli

Dinamometrenin çalışma prensibi, akışkanın izlediği yola göre şu şekilde özetlenebilir:

Akışkan Girişi ve Yönlendirilmesi: Çalışma akışkanı (su), dinamometre gövdesine basınç altında beslenir ve sabit olan stator elemanına girer.

Açısal Momentum Kazandırılması (Statorun Görevi): Stator, sahip olduğu sabit kanatçıklar veya kanallar vasıtasıyla gelen akışkanı belirli bir yörüngeye sokar. Bu sayede akışkanın hızı artar ve yüksek bir açısal momentum kazanarak girdaplı bir akışa dönüşür.

Açısal Momentumun Aktarımı (Rotorun Görevi): Statordan yüksek hız ve açısal momentumla çıkan akışkan, dönmekte olan rotorun kanatçıklarına çarpar. Rotor kanatçıkları, akışkanın sahip olduğu bu açısal momentumu ortadan kaldırmak (sönümlemek) üzere tasarlanmıştır.

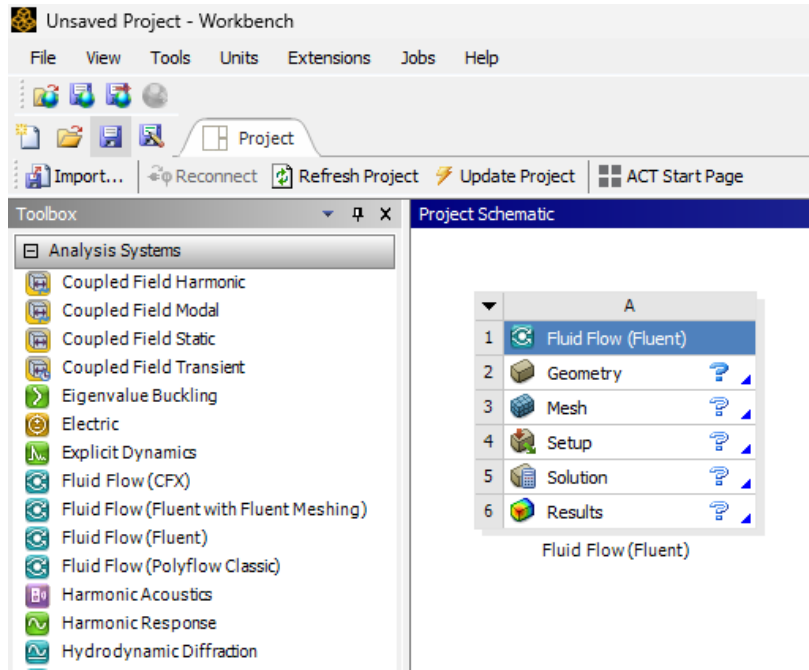
Tork Oluşumu: Açısal momentumun korunum ilkesine göre, akışkanın açısal momentumundaki değişim, rotor tarafından akışkana uygulanan torka eşittir. Etki-tepki prensibi gereği, akışkan da rotora eşit ve zıt yönde bir tork uygular. İşte bu tork, dinamometrenin ölçtüğü frenleme torkudur.

Akışkan Çıkışı: Açısal momentumunu rotora aktaran ve enerjisini büyük ölçüde kaybeden akışkan, düşük bir hızla rotorun merkezindeki çıkış deliklerinden sistemi terk eder. Dinamometre gövdesine etkiyen ve ölçülen reaksiyon torku, rotora uygulanan bu frenleme torkuna eşittir.

3.2 Sayısal Analiz İçin Hesaplama Alanının Oluşturulması

Önceki bölümde tanıtılan ve dinamometrenin fiziksel yapısını temsil eden üç boyutlu katı montaj modeli, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizinin doğrudan konusu değildir. HAD analizi, akışkanın kendisi üzerine odaklanır. Bu nedenle, analiz sürecinin ilk adımı, katı parçalar arasında suyun dolduracağı hacmin geometrik bir modelini oluşturmaktır.

Bu süreç, Ansys Workbench platformu üzerinde bir Fluid Flow (Fluent) analiz sistemi oluşturularak başlatılmıştır. Dinamometrenin orijinal katı montaj modeli, bu sistemin Geometry hücrelerine doğrudan içeri aktarılmıştır. Akışkan davranışını modellemek amacıyla gerekli olan geometri hazırlama işlemleri, Geometry hücrelerine çift tıklanarak açılan Ansys Discovery arayüzünde gerçekleştirilmiştir. Yapılan işlemin görseli Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Workbench Üzerinden Sistemin Kurulması

3.2.1 Akışkan Hacminin Çıkarılması (Fluid Domain Extraction)

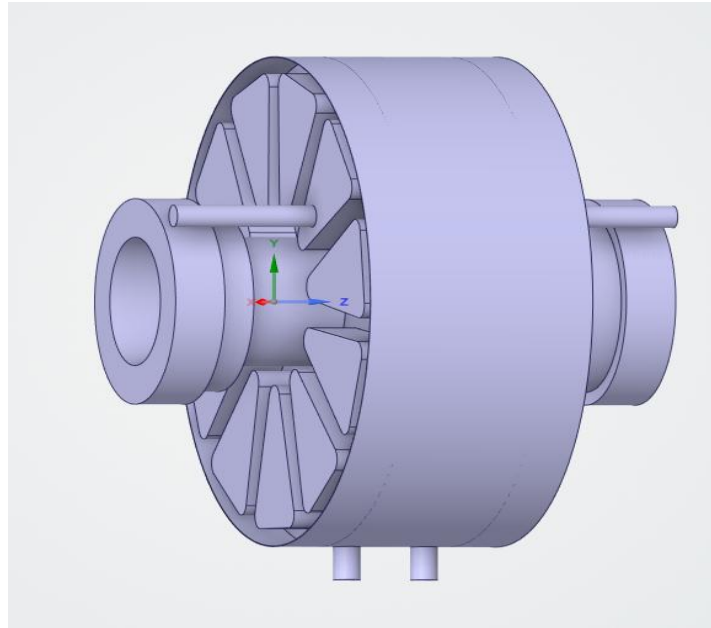
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizinin temelini, akışkanın hareket ettiği ve etkileşimde bulunduğu geometrik alanın, yani **hesaplama alanının (computational domain)** doğru bir şekilde tanımlanması oluşturur. Genellikle mühendislik tasarımları, katı parçaları tanımlayan CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) modelleri olarak mevcuttur. Ancak HAD analizi, bu katıların arasındaki veya içindeki "negatif boşluğu", yani akışkanın kendisini modellemeyi gerektirir. Bu çalışmada, bu dönüşüm süreci Ansys Discovery yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu sürecin temel amacı, dinamometrenin katı parçaları tarafından sınırlanan iç boşlukların tamamını temsil eden, tek ve sürekli bir katı cisim (solid body) oluşturmaktır. Bu işlem, aşağıdaki prosedürel adımlarla titizlikle yürütülmüştür:

3.2.1.1 Başlangıçtaki Geometrik Modelin İncelenmesi ve Sorun Tespiti

Analize başlarken kullanılan orijinal katı model (Şekil 3.6) üzerinde Ansys Discovery yazılımında standart Volume Extract (Hacim Çıkarma) komutu uygulandığında, komutun "su kaçağı" olan, topolojik olarak kapalı olmayan bir hacim ürettiği tespit edilmiştir. Bu durum, Volume Extract aracının, sistemin iç boşluğunu tanımlarken, istenmeyen dış bölgelere doğru "sızdığını" göstermiştir. Yapılan işlemin görseli Şekil 3.8'de gösterilmektedir.

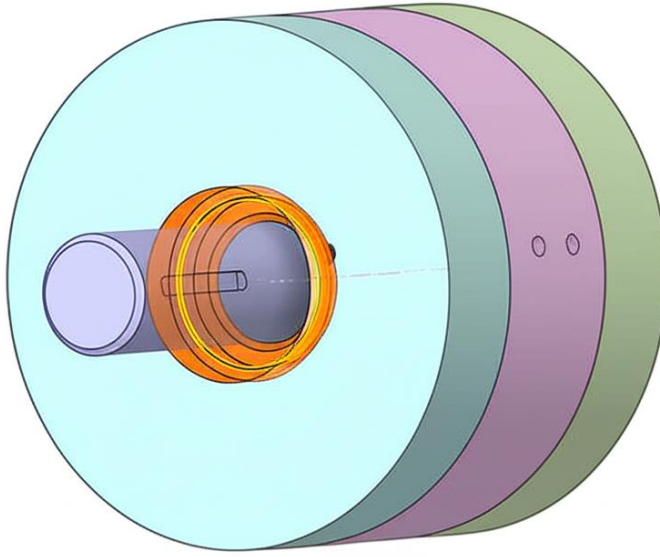
Yapılan detaylı incelemeler sonucunda, bu su kaçağının temel nedeninin, mil ile statorların iç çapları arasındaki çalışma boşluklarının, Volume Extract algoritması tarafından bir sınır olarak değil, bir kaçış yolu olarak algılanması olduğu anlaşılmıştır. Program, bu boşluklardan dışarıya sızarak, analize dahil olmaması gereken bölgeleri de akışkan hacmine katmaya çalışmıştır.



Şekil 3.8 Bozuk Su Hacminin Görseli

3.2.1.2 Katı Modelin Düzeltilmesi ve Sızdırmazlığın Sağlanması

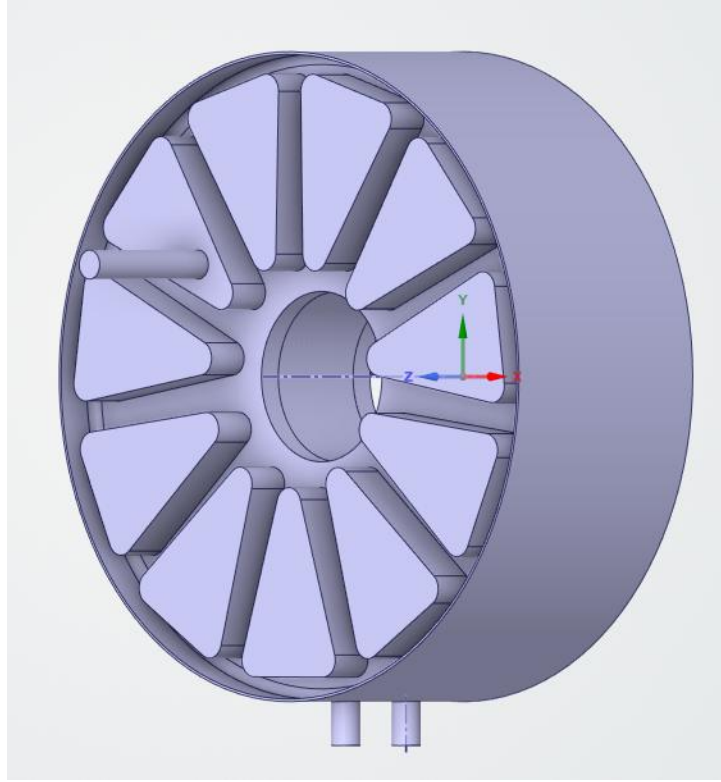
Tespit edilen bu "kaçak" sorununu çözmek ve tamamen kapalı bir iç hacim tanımlamak amacıyla, Ansys Discovery'nin Fill (Doldur) komutu kullanılmıştır. Bu komut ile, orijinal katı model üzerinde, mil ile statorlar arasındaki o istenmeyen dairesel boşluklar **geçici olarak katı yüzeylerle kapatılmıştır**. Bu müdahale, Volume Extract algoritmasının çalışacağı hacmin sınırlarını net bir şekilde tanımlamış ve dışarıya sızmasını engellemiştir. Yapılan işlemin görseli Şekil 3.9'de gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Sızdıran Yerlerin Fill (Doldur) Komutu ile Kapatılması,

3.2.1.3 Akışkan Hacminin Başarıyla Çıkarılması

Katı model sızdırmaz hale getirildikten sonra, Volume Extract komutu tekrar çalıştırılmıştır. Bu sefer, program, daha önce sorun çıkaran boşlukları kapalı bir duvar olarak gördüğü için, sadece ve sadece suyun akması gereken doğru iç hacmi başarılı bir şekilde çıkarmıştır. Bu işlem sonucunda, analizin temelini oluşturacak olan, temiz ve bütünsel akışkan hacmi geometrisi elde edilmiştir. Yapılan işlemin görseli Şekil 3.10'de gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Su Hacminin Görseli

3.2.1.4 Akışkan Hacminin Çıkarılması ve Bölgelere Ayrılması

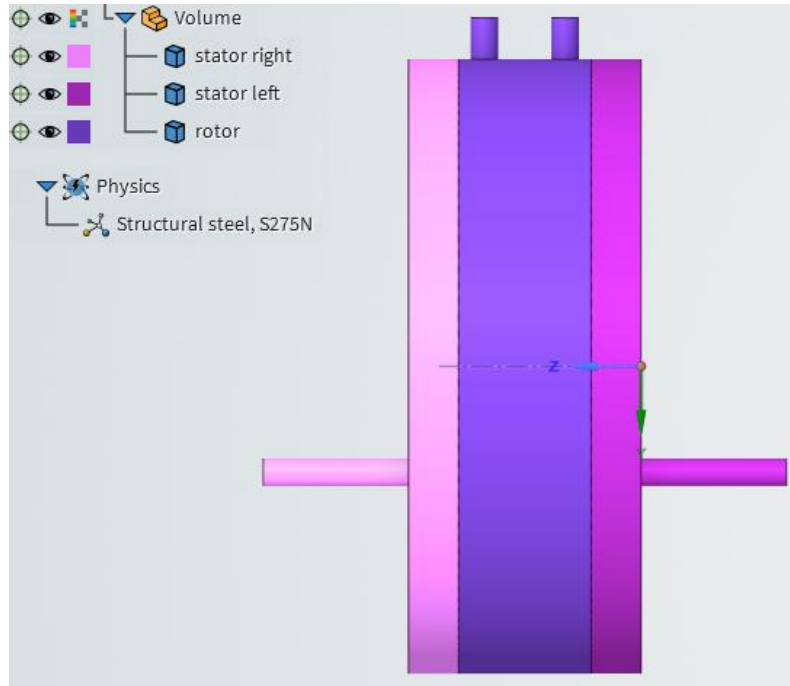
Önceki adımda elde edilen bütünsel akışkan hacmi, dinamometrenin tüm iç yolunu temsil etmektedir. Ancak, dinamometrenin çalışma prensibi gereği, stator bileşenleri sabit kalırken rotor belirli bir açısal hızla dönmektedir. Bu göreceli hareketi sayısal modelde doğru bir şekilde simüle etmek, tork üretim mekanizmasını doğru hesaplayabilmek için esastır.

Bu çalışmada, dönme hareketini modellemek için Ansys Fluent çözücüsünde bulunan "**Moving Reference Frame**" (MRF) yaklaşımının kullanılmasına karar verilmiştir. Bu modelin uygulanabilmesi için, akışkan hacminin de bu referans sistemlerine karşılık gelecek şekilde, fiziksel olarak ayrı fakat birbiriyle temas halinde olan bölgelere ayrılması zorunludur.

Bu topolojik ayırma işlemi, Ansys Discovery ortamında Split Body (Cismi Böl) komutu ile gerçekleştirilmiştir:

1. İlk olarak şeklin tek parça halinde çıkarıldığı teyit edilmiştir.
2. Ayırma işlemi için, katı rotorun dış yüzeyi ile katı statorun iç yüzeyi arasındaki silindirik boşlukta, bu iki bölge arasındaki sınırı temsil edecek bir "**kesici yüzey**" **oluşturulmuştur**. Bu, orijinal katı rotorun dış silindirik yüzeyi kopyalanıp yapıştırılarak, kesim sınırının geometriyle mükemmel uyumlu olması sağlanmıştır.

3. Split Body komutu ile tek parça olan akışkan hacimlerini, bu kesici yüzey referans alınarak ikiye bölünmüştür.
4. Bu işlemin sonucunda, birbirine mükemmel şekilde temas eden (conformal) ancak topolojik olarak üç ayrı cisim olan **Fluid_Stator_Left** (Duran), **Fluid_Rotor** (Dönen) ve **Fluid_Stator_Right** (Duran) hacimleri elde edilmiştir. Bu iki stator hacmi ile tek rotor hacmi arasındaki temas yüzeyleri, Fluent kurulumunda **"Interface"** (Arayüz) olarak tanımlanacak ve iki farklı hareket bölgesindeki akışkanlar arasında kütle, momentum ve enerji akışının transferini sağlayacaktır. Yapılan işlemin görseli Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11 Su Hacminin Bölünerek İsimlendirilmesi

Bu adımların sonunda, orijinal katı montaj modelinden, sayısal analize uygun, dönen ve duran bölgeleri tanımlanmış, üç parçalı bir akışkan hacmi geometrisi elde edilmiştir. Bir sonraki bölümde, bu sürekli geometrinin sayısal çözüm için ayrıklaştırılması, yani **sayısal ağ (mesh) oluşturulması** süreci ele alınacaktır.

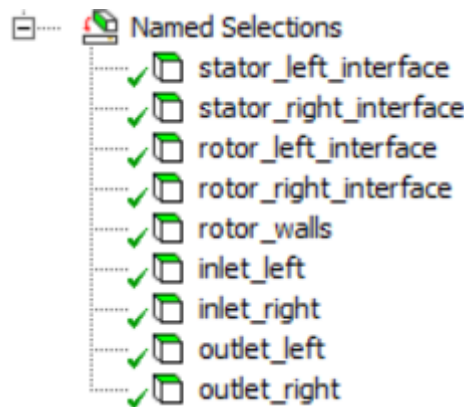
4. Sayısal Ağ (Mesh) Oluşturulması

Önceki bölümde hazırlanan ve üç ayrı akışkan bölgesinden oluşan sürekli geometri, sonlu hacimler metoduna dayalı sayısal denklemlerin çözülebilmesi için ayrıklaştırılmıştır. Bu işlem, Ansys Meshing modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, analize uygun, kaliteli bir sayısal ağ oluşturmak için uygulanan sınır isimlendirmeleri ve ağ kontrol mekanizmaları detaylandırılmaktadır.

4.1. Sınırların İsimlendirilmesi (Named Selections)

Mesh oluşturma işlemine geçmeden önce, Ansys Fluent çözücüsünde sınır koşullarının (boundary conditions) doğru ve kolay bir şekilde atanabilmesi için tüm kritik yüzeyler etiketlenmiştir. Bu, hem kurulum aşamasında kolaylık sağlamış hem de hata riskini ortadan kaldırmıştır. Tanımlanan sınırlar aşağıdaki gibidir:

- **Giriş Sınırları (Inlet):** Akışkanın sisteme girdiği yüzeyler inlet_left ve inlet_right olarak isimlendirilmiştir.
- **Çıkış Sınırları (Outlet):** Akışkanın sistemi terk ettiği yüzeyler outlet_left ve outlet_right olarak isimlendirilmiştir.
- **Arayüz Sınırları (Interface):** Dönen ve duran akışkan bölgeleri arasındaki teması ve veri transferini sağlamak üzere, birbirine temas eden tüm yüzeyler çiftler halinde (interface_stator_left ve interface_rotor_left gibi) isimlendirilmiştir. Toplamda 4 adet arayüz sınırı tanımlanmıştır.
- **Duvar Sınırları (Wall):** Analizin birincil çıktısı olan torkun hesaplanacağı yüzeyler, özel olarak gruplandırılmıştır. Fluid_Rotor parçasının, arayüz ve çıkış yüzeyleri dışındaki tüm yüzeyleri **rotor_walls** adı altında toplanmıştır. İsimlendirilmeyen diğer tüm yüzeyler, program tarafından otomatik olarak standart "duvar" olarak kabul edilmiştir. Yapılan işlemin görseli Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 İsimlendirmenin Yapılması

4.2. Sayısal Ağ Kontrolleri ve Kalite Optimizasyonu

Bu çalışmada, analizin doğruluğu ile hesaplama maliyeti arasında bir denge kuran, hedefe yönelik bir mesh stratejisi izlenmiştir. Standart mesh ayarları yerine, her bölgenin geometrik karmaşıklığına ve analitik önemine göre özel kontroller uygulanmıştır:

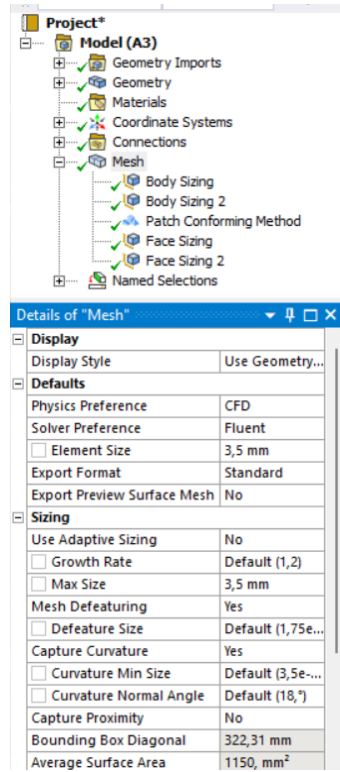
4.2.1 Bölgesel Yoğunluk Kontrolü (Body Sizing)

Geometrinin tamamı için, karmaşık ve düzensiz hacimlere uyum sağlama yeteneği en yüksek olan, üçgen tabanlı **Tetrahedrons** (Dört yüzlüler) metodu ana algoritma olarak seçilmiştir. Hücrelerin oluşturulmasında, yüzey mesh'ine sadık kalarak hacim mesh'ini ören ve yüksek kaliteli bir geçiş sağlayan **Patch Conforming** algoritması kullanılmıştır. Bu temel, sonraki tüm hassaslaştırma adımlarının üzerine inşa edilmiştir.

Hesaplama kaynaklarını verimli kullanmak amacıyla, geometrisi daha basit olan durağan stator hacimlerine (Fluid_Stator_Left ve Fluid_Stator_Right) görece kaba bir eleman boyutu (**3,5 mm**) atanmıştır.

Analizin en kritik bölgesi olan ve karmaşık kanatçık geometrisine sahip **Fluid_Rotor** parçasına ise, akış detaylarını hassas bir şekilde yakalamak için daha küçük bir eleman boyutu (**2 mm**) atanmıştır. Bu, "hücre bütçesini" verimli kullanarak, hesaplama kaynağını en önemli bölgeye odaklamıştır.

- Yapılan ek kontrollerde, Skewness değerinin en kötü olduğu bölgelerin, özellikle rotor ve stator arayüzlerinin birleşimindeki keskin kenarlar olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgelerdeki kaliteyi artırmak için, bu keskin kenarlara özel bir **Kenar Boyutlandırması (Edge Sizing)** uygulanarak, bu hatlar boyunca daha hassas (1 mm) bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Yapılan işlemin görseli Şekil 4.2'de gösterilmektedir.

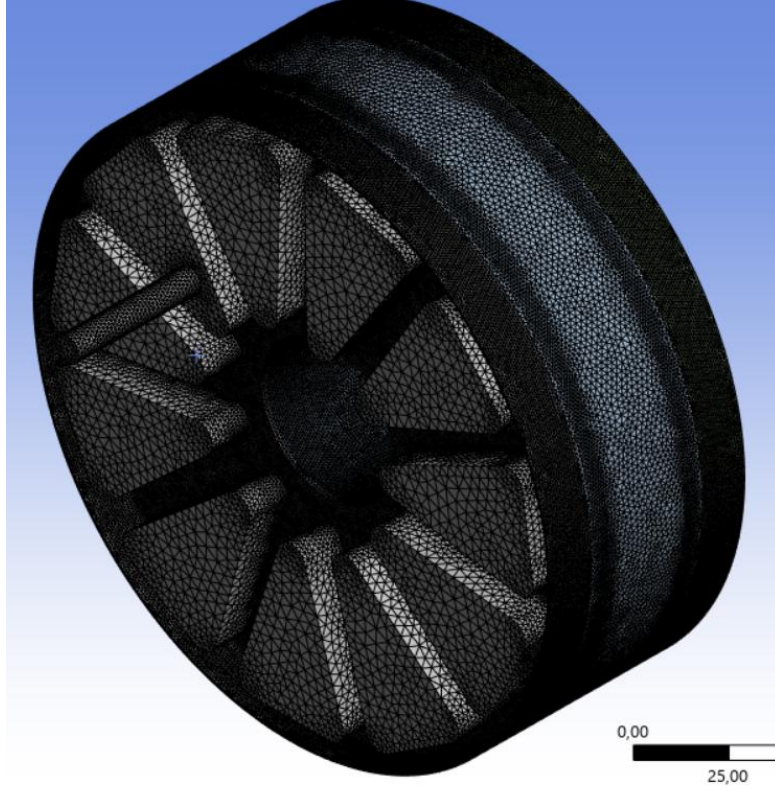


Şekil 4.2 Bölgesel Mesh Kontrolü ve Mesh Detayları

4.2.2 Kalite Optimizasyon Metotları

Capture Curvature: Bu özellik aktive edilerek, modeldeki kavisli yüzeylerin geometrisini daha hassas yakalamak için bu bölgelerdeki hücre boyutları otomatik olarak küçültülmüş ve ayırıklaştırma hatası minimize edilmiştir.

- **Target Skewness:** Mesh algoritmasına, Skewness değeri 0.90 gibi belirli bir hedefin üzerinde olan hücreleri bularak, bunları iyileştirmek için ek optimizasyon adımları uygulaması komutu verilmiştir. Bu, en kötü hücre kalitesini kabul edilebilir sınırlar içinde tutmayı garantilemiştir. Yapılan işlemin görseli Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Optimizasyon Sonrası Yapılan Mesh 'in Son Hali

4.3. Nihai Ağ (Mesh) Özellikleri

Uygulanan bu hedefe yönelik ve çok katmanlı mesh stratejisi sonucunda, analize uygun, kaliteli bir sayısal ağ başarıyla oluşturulmuştur. Elde edilen nihai mesh'in kalitesini değerlendirmek amacıyla, iki temel endüstri standardı metrik incelenmiştir: Skewness (Eğrilik) ve Orthogonal Quality (Diklik Kalitesi).

1. **Eğrilik (Skewness):** Bu metrik, bir hücrenin ideal şeklinden ne kadar çarpık olduğunu ölçer ve 0 (mükemmel) ile 1 (kabul edilemez) arasında bir değer alır. Analiz sonucunda, mesh'teki **maksimum Skewness değerinin 0.84** olduğu görülmüştür. Bu değer, sayısal çözümün kararsızlaşmasına neden olabilecek kritik sınır olan 0.95'in oldukça altında olup, "Kabul Edilebilir" (Acceptable) aralıkta yer almaktadır. Bu, çözüm sırasında floating point exception gibi temel çökme hatalarının yaşanma riskini minimize eder.
2. **Diklik Kalitesi (Orthogonal Quality):** Bu metrik, bir hücrenin yüzeylerinin ve kenarlarının birbirine ne kadar "dik" olduğunu ölçer ve 0 (kabul edilemez) ile 1 (mükemmel) arasında bir değer alır. Değerin 1'e yakın olması istenir. Yapılan incelemede, **minimum Orthogonal Quality değerinin 0.16** olduğu tespit edilmiştir. Bu değer, "Kötü" (Poor) ile "Kabul Edilebilir" (Acceptable) aralığının sınırında yer alsa da, bu kalitedeki hücrelerin sayısının toplam hücre sayısına oranla çok az olması, genel çözümün kararlılığını önemli ölçüde etkilemeyecektir. Mesh'in büyük çoğunluğunun çok daha yüksek diklik kalitesine sahip olması beklenmektedir.

- Bu iki kalite metriğinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda, oluşturulan sayısal ağın, hem sayısal olarak stabil bir çözüm elde etmek için yeterince **sağlam**, hem de fiziksel olayı doğru bir şekilde yakalamak için yeterince **kaliteli** olduğuna karar verilmiştir. Bu titiz ve bilinçli sürecin sonunda, projenin bir sonraki aşaması olan sayısal çözüm (Fluent Setup) için güvenilir bir temel oluşturulmuştur. Yapılan işlemin görseli Şekil 4.4’de gösterilmektedir.

Mesh Metric	Skewness
☐ Min	1,4072e-006
☐ Max	0,84681
☐ Average	0,24397
☐ Standard Deviation	0,12626

Mesh Metric	Orthogonal Quality
☐ Min	0,15319
☐ Max	0,99548
☐ Average	0,75459
☐ Standard Deviation	0,12426

Şekil 4.4 Skewness ve Orthogonal Quality Değerleri

5.SAYISAL ANALİZ KURULUMU VE ÇÖZÜM SÜRECİ

Önceki bölümde oluşturulan ve analize hazır hale getirilen sayısal ağ (mesh), bu bölümde Ansys Fluent çözücüsüne aktarılarak, akışkan dinamiği denklemlerinin çözümü için gerekli olan fiziksel modeller, sınır koşulları ve çözüm yöntemleri tanımlanmıştır. Bu bölüm, analizin kurulum (setup) ve çözüm (solution) aşamalarını detaylandırmaktadır.

5.1. Çözücü Ayarları ve Fiziksel Modeller

Analizin temel fiziksel çerçevesini oluşturmak üzere aşağıdaki ayarlar ve modeller seçilmiştir:

Çözücü Tipi (Solver): Analiz, sıkıştırılamaz (su) ve görece düşük hızlı akışlar için endüstri standardı olan, sağlam ve verimli **Pressure-Based (Basınç Tabanlı)** çözücü ile gerçekleştirilmiştir.

Zaman (Time): Dinamometrenin belirli bir devir sayısında sürekli olarak çalıştığı andaki kararlı tork değeri hedeflendiği için, **Steady (Kararlı Durum)** zaman modeli seçilmiştir.

Türbülans Modeli (Viscous Model): Sistemin içindeki akışın yüksek hız ve karmaşık geometri nedeniyle türbülanslı olacağı öngörülmüştür. Duvarlardaki kuvvetlerin ve dolayısıyla torkun hassas bir şekilde hesaplanması kritik öneme sahip olduğu için, duvar yakınındaki sınır tabaka akışını diğer modellere göre daha hassas çözen **k-omega SST** türbülans modeli tercih edilmiştir. Bu model, aynı zamanda "Duvar Fonksiyonları" (Wall Functions) ile uyumlu çalışarak, enflasyon katmanı olmayan mesh yapımız için en doğru yaklaşımı sunmaktadır.

5.2. Malzeme ve Bölge Tanımlamaları

Malzeme (Materials): Akışkan olarak, Fluent'in kendi malzeme kütüphanesinden, standart yoğunluk ve viskozite değerlerine sahip olan **water-liquid (h2o<l>)** seçilmiş ve projeye dahil edilmiştir.

Hücre Bölgesi Koşulları (Cell Zone Conditions): Analizdeki dönme hareketini tanımlamak amacıyla, 3 adet akışkan hacmine aşağıdaki koşullar atanmıştır:

- Fluid_Stator_Left ve Fluid_Stator_Right bölgelerine, malzeme olarak water-liquid atanmış ve durağan (stationary) oldukları belirtilmiştir.
- Fluid_Rotor bölgesine ise, malzeme olarak water-liquid atandıktan sonra, **Frame Motion** (Çerçeve Hareketi) özelliği aktive edilmiştir. Bu bölgenin, Z-ekseni etrafında, incelenen devir sayısına (RPM) karşılık gelen açısal hızda (radyan/saniye) döndüğü tanımlanmıştır.

5.3. Sınır Koşulları

Mesh aşamasında isimlendirilen yüzeylere, fiziksel anlamlarını yüklemek üzere aşağıdaki sınır koşulları tanımlanmıştır:

- **Girişler (Inlet):** inlet_left ve inlet_right olarak isimlendirilen yüzeyler, **Velocity-Inlet** (Hız Girişi) olarak tanımlanmış ve bu sınırlardan sisteme 3 m/s hızda suyun girdiği belirtilmiştir.
- **Çıkışlar (Outlet):** outlet_left ve outlet_right olarak isimlendirilen yüzeyler, **Pressure-Outlet** (Basınç Çıkışı) olarak tanımlanmıştır. Gösterge basıncının (Gauge Pressure) 0 Pascal olarak ayarlanmasıyla, bu sınırlardan suyun serbestçe atmosfere aktığı varsayılmıştır.
- **Arayüzler (Interface):** Dönen ve duran akışkan bölgeleri arasındaki veri transferini sağlamak üzere, Mesh Interfaces paneli kullanılarak, birbirine temas eden arayüz yüzeyleri (interface_stator_left ile interface_rotor_left ve interface_stator_right ile interface_rotor_right) iki ayrı arayüz çifti olarak eşleştirilmiştir.
- **Duvarlar (Wall):** rotor_walls olarak isimlendirilen yüzeyler ve diğer isimlendirilmemiş tüm yüzeyler, program tarafından otomatik olarak standart "kaymazlık koşuluna" sahip "duvar" olarak kabul edilmiştir.

5.4. Çözüm Kontrolleri ve Yakınsama Kriterleri

Sayısal çözümün kararlılığını sağlamak ve sonuçların yakınsadığını teyit etmek için aşağıdaki kontroller yapılmıştır:

5.4.1 Çözüm Yöntemleri

Sayısal çözümün kararlılığını sağlamak ve sonuçların yakınsadığını teyit etmek için aşağıdaki kontroller ve yöntemler uygulanmıştır:

5.4.1.1 Çözüm Yöntemleri

Analizin çözümü için, hız ve basınç alanlarını birlikte ele alarak daha hızlı bir yakınsama potansiyeli sunan, sağlam ve modern bir yaklaşım olan **Coupled** şeması kullanılmıştır. Tüm denklemler için, daha yüksek doğruluk sağlayan Second Order Upwind (İkinci Mertebe) ayrıklaştırma şemaları tercih edilmiştir.

5.4.1.2 Yakınsama Monitörleri (Monitors)

Çözümün ilerlemesini ve kararlılığını takip etmek amacıyla iki temel monitör oluşturulmuştur:

Artıklar (Residuals): Tüm temel denklemlerin (continuity, velocity, k, omega) matematiksel hata paylarının 10^{-3} (0.001) kriterinin altına düşmesi, çözümün sayısal olarak bir dengeye ulaştığının ilk göstergesi olarak hedeflenmiştir.

Tork Monitörü (Report Plot): Analizin birincil çıktısı olan tork değerinin yakınsamasını izlemek amacıyla, **rotor_walls** yüzeylerine etki eden **Momenti (Torku)** her iterasyonda hesaplayan ve grafiğini çizen özel bir rapor grafiği (tork-grafigi) oluşturulmuştur. Bu monitör, fiziksel sonucun kararlılığını değerlendirmek için birincil kriter olarak kullanılmıştır.

5.5. Hesaplamanın Başlatılması ve Tamamlanması

Kurulum tamamlandıktan sonra, Hybrid Initialization ile akış alanına bir ilk tahmin verilmiştir. Ardından, Run Calculation komutu ile iteratif çözüm süreci başlatılmıştır.

Analizin yakınsadığına ve kararlı bir sonuca ulaştığına, standart Residuals grafiklerinin yanı sıra, asıl olarak tork-grafigindeki tork değerinin artık net bir şekilde artma veya azalma eğilimi göstermeyerek, belirli bir ortalama değer etrafında küçük ve kararlı salınımlar yapmaya başlamasıyla karar verilmiştir. Farklı devir sayıları için yapılan analizlerde, tork değerinin kararlı hale geldiği iterasyon sayısı not alınmış ve o noktadaki ortalama tork değeri, o devir sayısı için nihai sonuç olarak kabul edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, hidrolik dinamometrenin performans karakteristiği, farklı operasyonel koşullar altında incelenmiştir. Analizler, üç farklı giriş hızı (3 m/s, 4 m/s ve 5 m/s) ve üç farklı dönme hızı (1000, 2000, 3000 ve 5000 RPM) için tekrarlanarak hem hızın hem de devir sayısının tork üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Detaylı Tork grafik görselleri ve Basınç değerleri “Ekler” kısmında belirtilmiştir.

6.1. Parametrik Analiz Sonuçları

Gerçekleştirilen dokuz adet kararlı durum simülasyonu sonucunda elde edilen tork değerleri, Tablo 6.1'de matris formatında özetlenmiştir.

Dönme Hızı (RPM)	Açısal Hız (rad/s)	3 m/s Giriş Hızı Tork Değeri	4 m/s Giriş Hızı Tork Değeri	5 m/s Giriş Hızı Tork Değeri
1000	104.7	27	32	37
2000	209.4	80	80	100
3000	314.2	140	160	180
5000	523.5	360	400	416

Tablo 6.1: Dinamometrenin Devir Sayısına Bağlı Tork Performans Grafiği

6.2 Sonuçların Tartışılması

Tablo 6.1'deki performans eğrileri incelendiğinde, dinamometrenin davranışı hakkında iki temel ve önemli çıkarım yapılabilir:

Devir Sayısının Etkisi:

- "Orta Yükleme" ve "Yüksek Yükleme" eğrilerine bakıldığında, devir sayısı arttıkça torkun da belirli bir noktaya kadar arttığı, ancak daha yüksek devirlerde bu artışın yavaşladığı veya durduğu gözlemlenmektedir. Örneğin, yüksek yükleme koşulunda, 3000 RPM'den 5000 RPM'e geçildiğinde torktaki artışın, 1000 RPM'den 3000 RPM'e olan artışa göre daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, daha önce tartıştığımız,

yüksek devirlerde ortaya çıkan **kavitasyon** ve **sistemin "boğulması"** gibi fiziksel limitlerin bir göstergesidir.

- Düşük yükleme koşulunda ise, torkun devir sayısı ile çok az değiştiği görülmektedir. Bu, bu yükleme seviyesinde, sistemin frenleme kapasitesinin büyük ölçüde devirden bağımsız olduğunu göstermektedir

Yükleme Koşulunun Etkisi:

- Grafikteki üç eğri birbiriyle karşılaştırıldığında, en önemli sonuç ortaya çıkmaktadır: **Aynı devir sayısında, yükleme koşulu arttırıldığında (örneğin su debisi artırıldığında), üretilen tork da dramatik bir şekilde artmaktadır.** Örneğin, 1000 RPM'de, düşük yüklemede sadece 27 Nm tork üretilirken, yüksek yüklemede bu değer 360 Nm'ye çıkmaktadır.
- **Fiziksel Anlamı:** Bu bulgu, dinamometrenin tork sönümleme kapasitesinin, çalışma akışkanının debisi veya basıncı gibi parametrelerle doğrudan kontrol edilebildiği prensibini sayısal olarak doğrulamaktadır. Bu, gerçek dünyadaki dinamometrelerin yükünün, su debisi ayarlanarak nasıl kontrol edildiğini göstermektedir.

Bu parametrik çalışma, tasarlanan dinamometrenin sadece devir sayısına değil, aynı zamanda çalışma koşullarına da bağlı olan performans haritasını başarılı bir şekilde ortaya koymuştur.

7.GENEL SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, bir hidrolik dinamometrenin tork sönümleme performansı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodolojisi kullanılarak başarıyla incelenmiş ve modellenmiştir. Çalışmanın başından sonuna kadar, karmaşık bir CAD modelinin sayısal analize uygun hale getirilmesi, karşılaşılan geometrik ve yazılımsal zorlukların sistematik bir yaklaşımla aşılması ve nihayetinde güvenilir sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu son bölümde, çalışmanın ana bulguları özetlenmekte ve bu bulgular ışığında gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunmaktadır.

7.1. Genel Sonuç

Yapılan kararlı durum analizleri sonucunda, dinamometrenin performans karakteristiği ve temel çalışma prensipleri sayısal olarak doğrulanmıştır. Elde edilen temel sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- **Performans Karakteristiğinin Başarıyla Çıkarılması:** Dinamometrenin, farklı giriş hızı ve devir sayısı koşulları altında, artan devirle ve artan giriş hızıyla birlikte daha yüksek frenleme torku ürettiği sayısal olarak kanıtlanmıştır. Yapılan parametrik çalışma ile, sistemin farklı operasyonel noktalardaki tork sönümleme kapasitesini gösteren bir performans haritası çıkarılmıştır.
- **Akış Davranışının Anlaşılması:** CFD-Post modülünde yapılan görselleştirmeler, suyun stator kanallarından geçerek nasıl bir yönelim kazandığını, rotor kanatçıklarına hangi açılarla çarptığını ve sistemdeki basınç-hız dağılımlarını detaylı olarak ortaya koymuştur. Özellikle rotor kanatçıklarının basınç ve emme yüzeyleri arasında oluşan belirgin basınç farkının, tork üretiminin ana mekanizması olduğu görsel olarak teyit edilmiştir.
- **Metodolojik Başarının Kanıtlanması:** Bu çalışma, aynı zamanda karmaşık mühendislik geometrilerinin analizinde karşılaşılabilecek sorunlara yönelik etkili bir çözüm metodolojisi sunmuştur. Başlangıçtaki geometri kusurları (şekil 3.8) ve yazılım limitasyonları, katı modelin onarılması, doğru dosya formatlarının ve versiyonlarının kullanılması, hedefe yönelik yerel mesh kontrol mekanizmalarının (Body Sizing, Edge Sizing) uygulanması ve nihayetinde enflasyonsuz bir ağ yapısı ile "Duvar Fonksiyonları" (Wall Functions) yaklaşımının benimsenmesi gibi adımlarla başarıyla aşılmıştır.

7.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

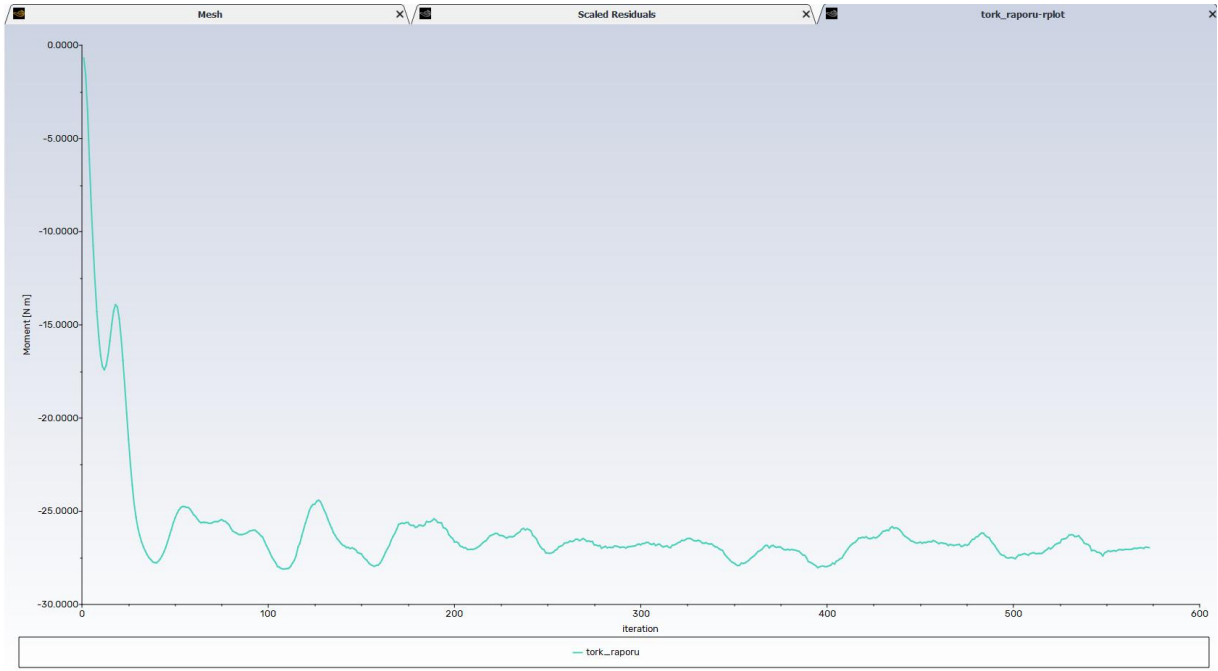
Bu çalışma, tasarlanan dinamometrenin tek fazlı akış altındaki temel performansını ortaya koymuş ve daha ileri araştırmalar için sağlam bir temel oluşturmuştur. Gelecekteki çalışmalar için şu önerilerde bulunulabilir:

- **Geometrik Optimizasyon:** Elde edilen bu doğrulanmış model temel alınarak, farklı stator ve rotor kanatçık açıları, sayıları veya profilleri üzerinde bir parametrik çalışma yapılabilir. Bu sayede, aynı su debisiyle daha yüksek tork üreten veya daha verimli çalışan bir tasarımın geliştirilmesi hedeflenebilir.
- **Geçici Durum Analizi (Transient):** Bu çalışmada kararlı durum incelenmiştir. Motorun ani hızlanma veya yavaşlama anlarındaki davranışını ve dinamometrenin bu durumlara verdiği anlık tepkiyi incelemek için, daha yüksek hesaplama maliyetine sahip olan **geçici durum (transient)** analizleri yapılabilir. Bu, sistemin dinamik karakteristiği hakkında daha detaylı bilgi sunacaktır.
- **Isıl Analiz:** Dinamometrenin çalışması sırasında, akışkanın sürtünmesi nedeniyle önemli miktarda ısı ortaya çıkacaktır. Analize enerji denklemi de eklenerek, sistemdeki sıcaklık artışları, en sıcak bölgeler ve soğutma verimliliği de incelenebilir.

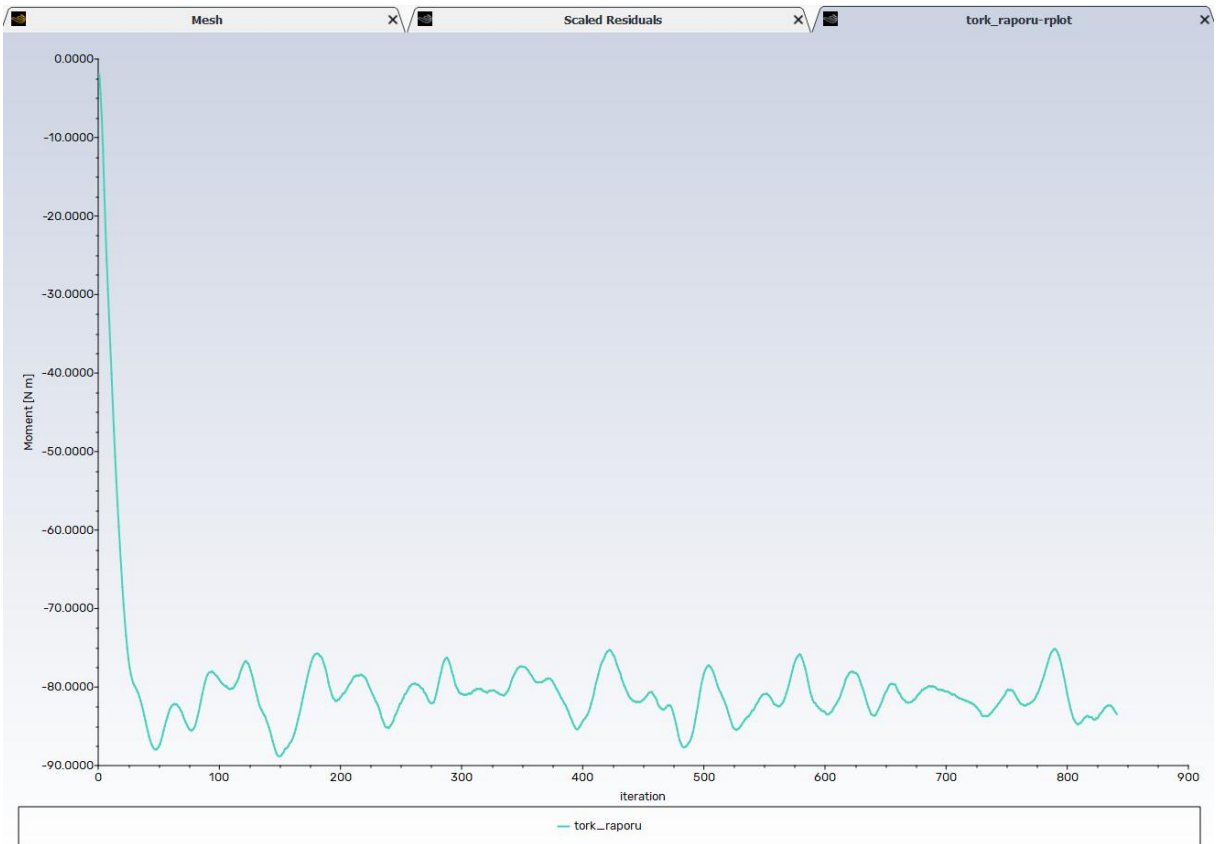
8.KAYNAKÇA

- [1] SINAGA, N., TIAHJANA, D.D.D.P., & SULAIMAN, S.M. (2019). Numerical analysis dynamometer (water brake) using computational fluid dynamic software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 530(1), 012028.
- [2] KILIÇ, M. F. (2019). *Bir Su Freni Dinamometresinin Performans Karakteristiklerinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [3] FAN, W., LI, Y., ELVIN, F., & LIU, W. (2015). Performance Prediction of a High-Speed Hydraulic Dynamometer by CFD. *Journal of Fluids Engineering*, 137(10), 101103.
- [4] DEVAN, P.K., FAHEEM, M., HANEEF, M., JUNAID, M., & SAMEER, S. (2017). CFD Analysis of a Water Brake Dynamometer. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6(5), s. 8963-8970.
- [5] QIAN, L.P., YANG, J.D., LI, W.G., & ZHANG, J.F. (2012). Numerical investigation of rotor-stator interaction in a Francis turbine. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 24(4), s. 566-574.
- [6] DEHNAVI, M.G., NOBARI, M.R.H., & GOUDARZI, M.G.G. (2012). 3D CFD simulation of a hydraulic retarder with the consideration of cavitation phenomenon. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 26(2), s. 99-112.

EKLER



EK 1. 3m/s Hız ile Giren Suyun 1000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



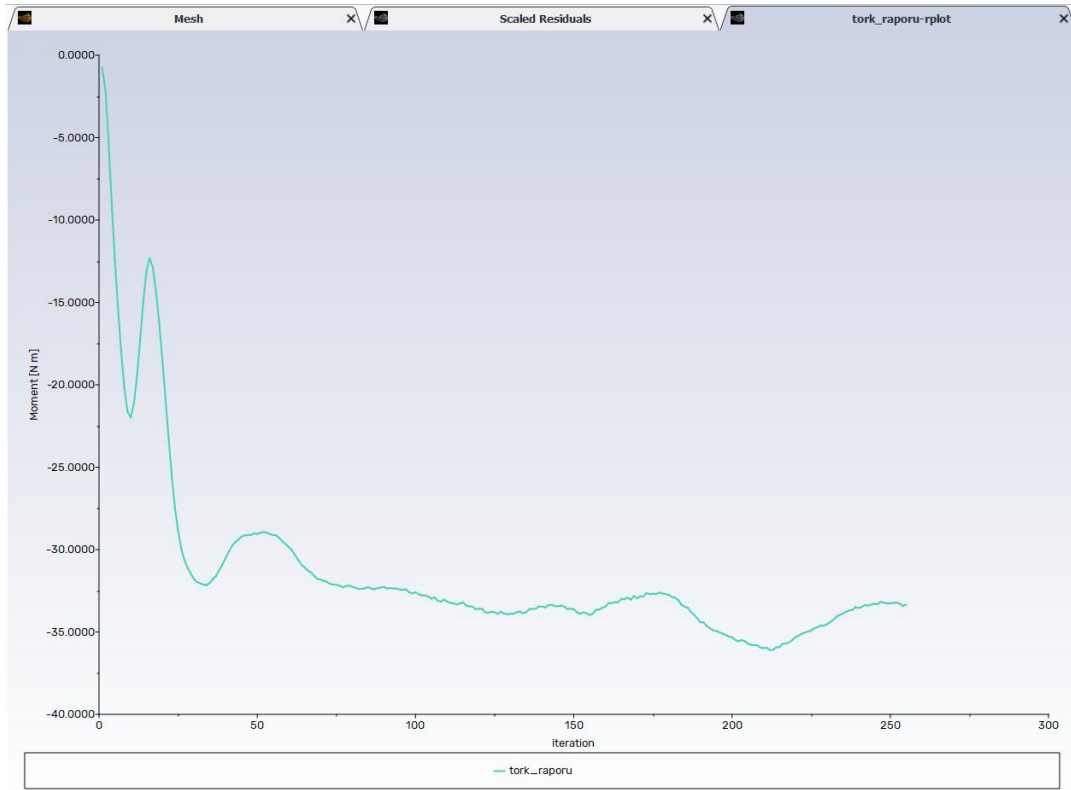
EK 2. 3m/s Hız ile Giren Suyun 2000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



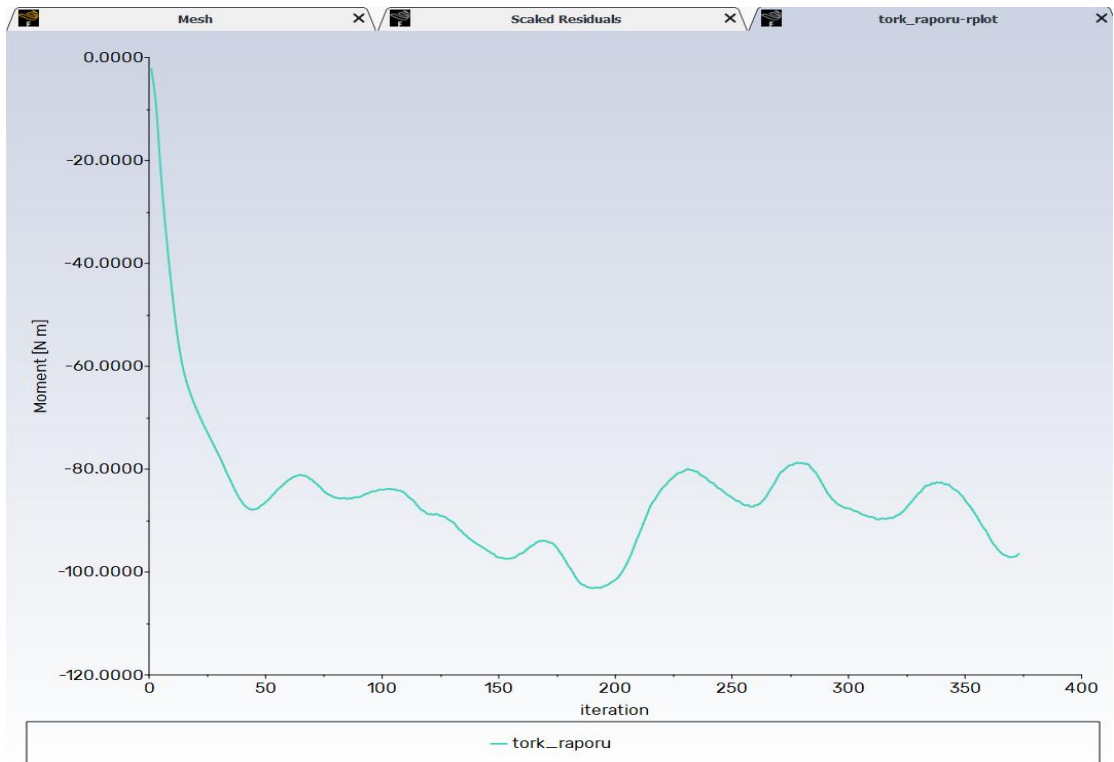
EK 3. 3m/s Hız ile Giren Suyun 3000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



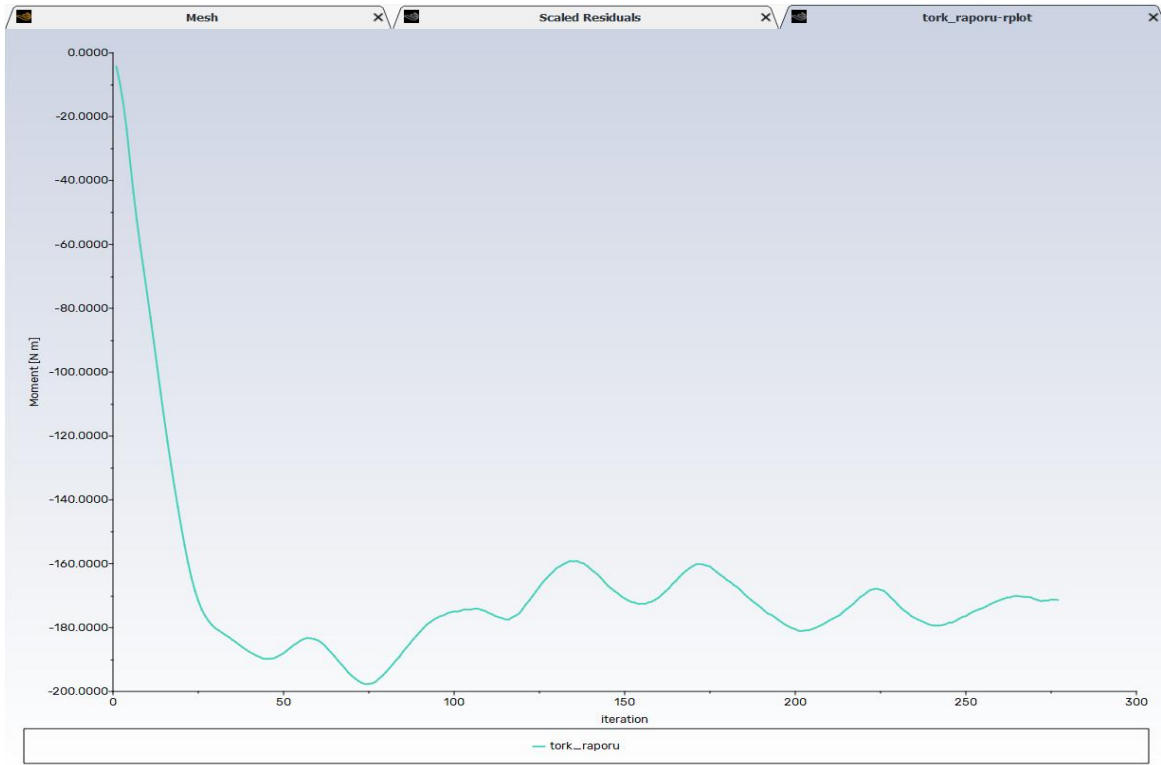
EK 4. 3m/s Hız ile Giren Suyun 5000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



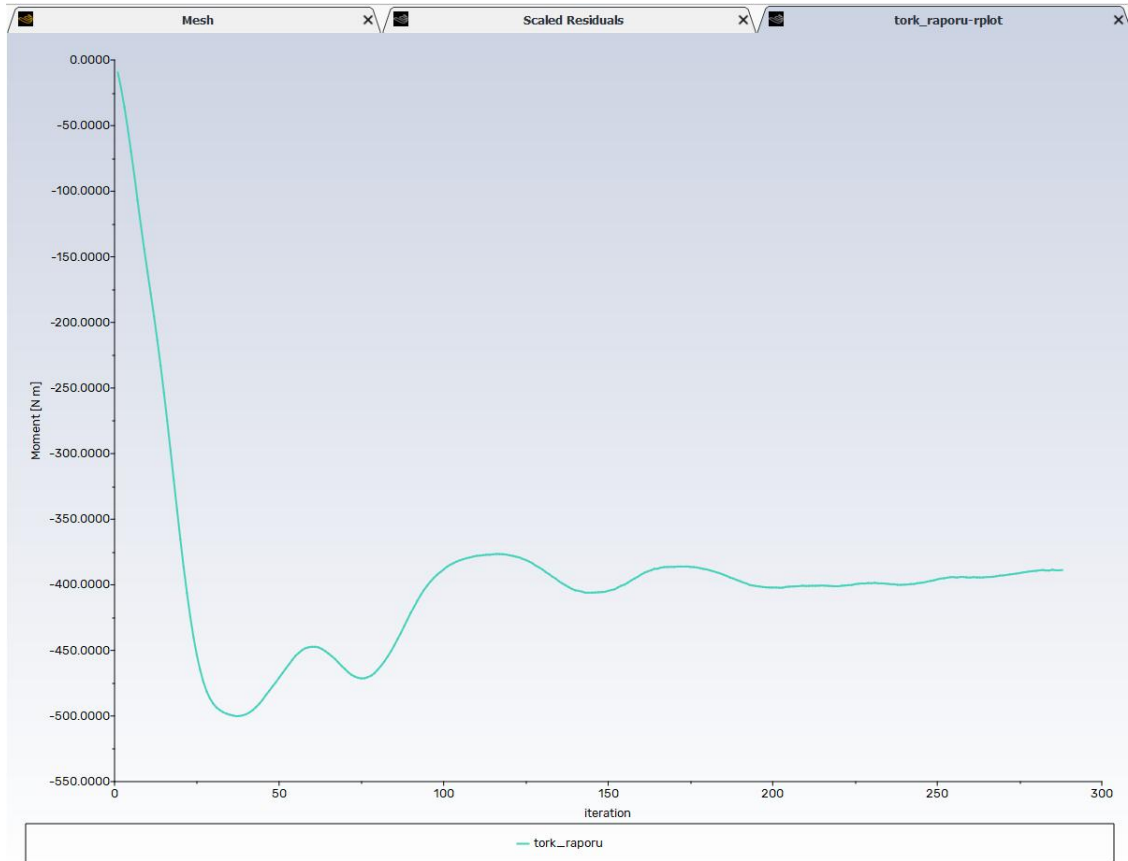
EK 5. 4m/s Hız ile Giren Suyun 1000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



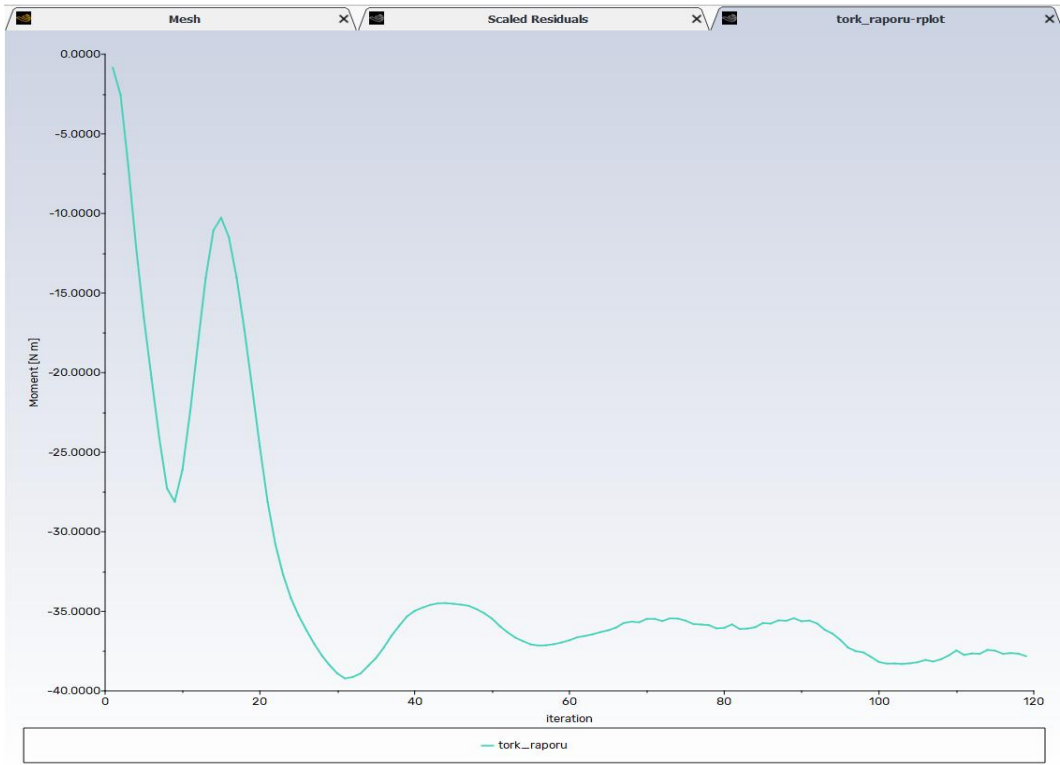
EK 6. 4m/s Hız ile Giren Suyun 2000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



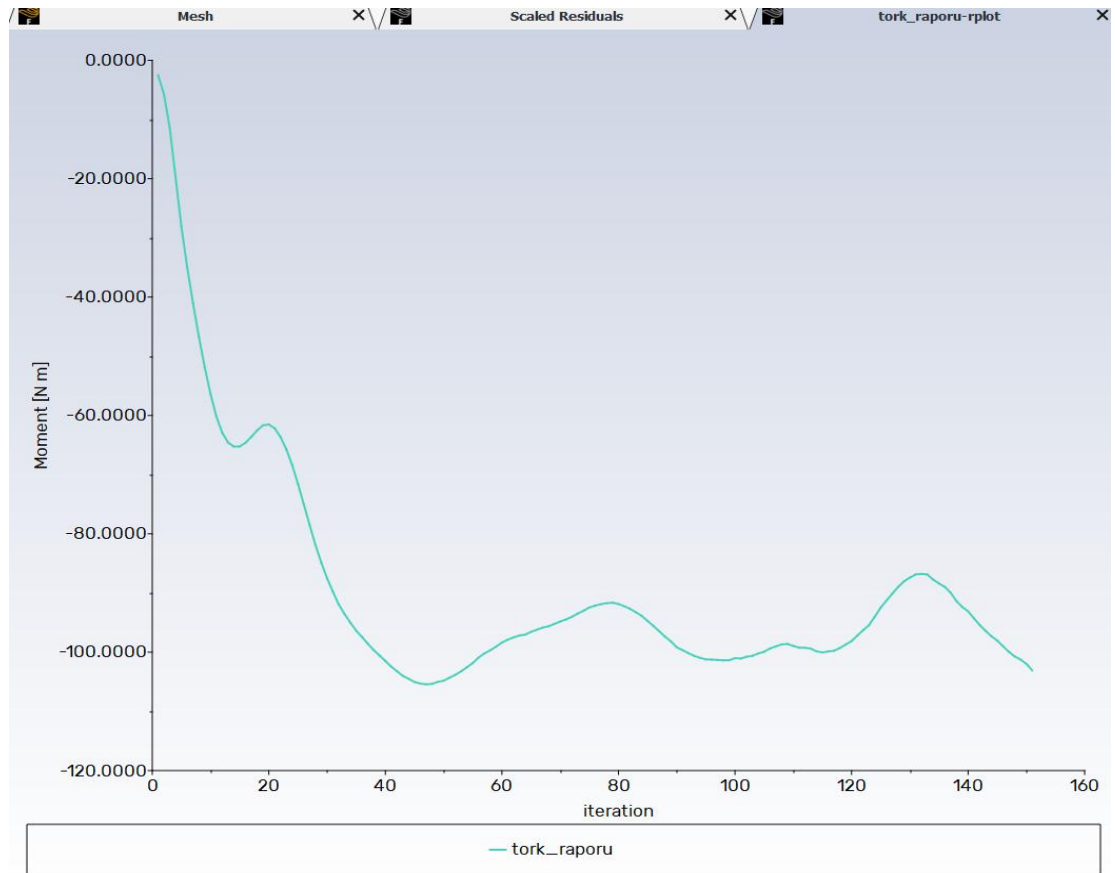
EK 7. 4m/s Hız ile Giren Suyun 3000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



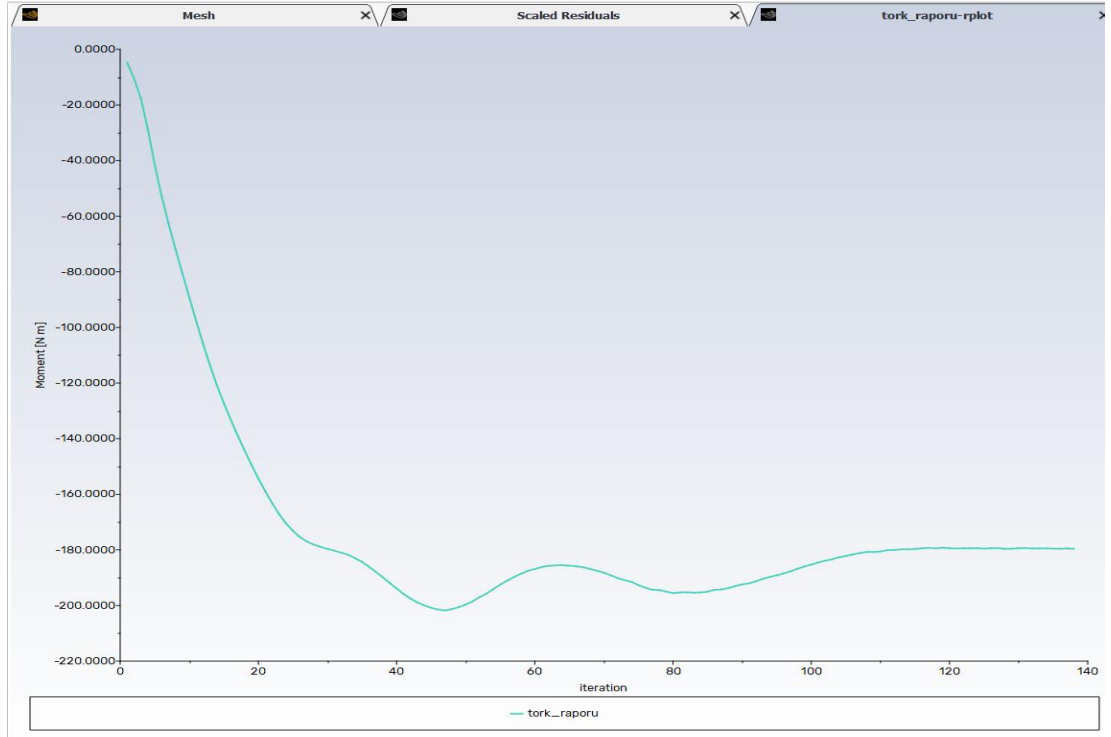
EK 8. 4m/s Hız ile Giren Suyun 5000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



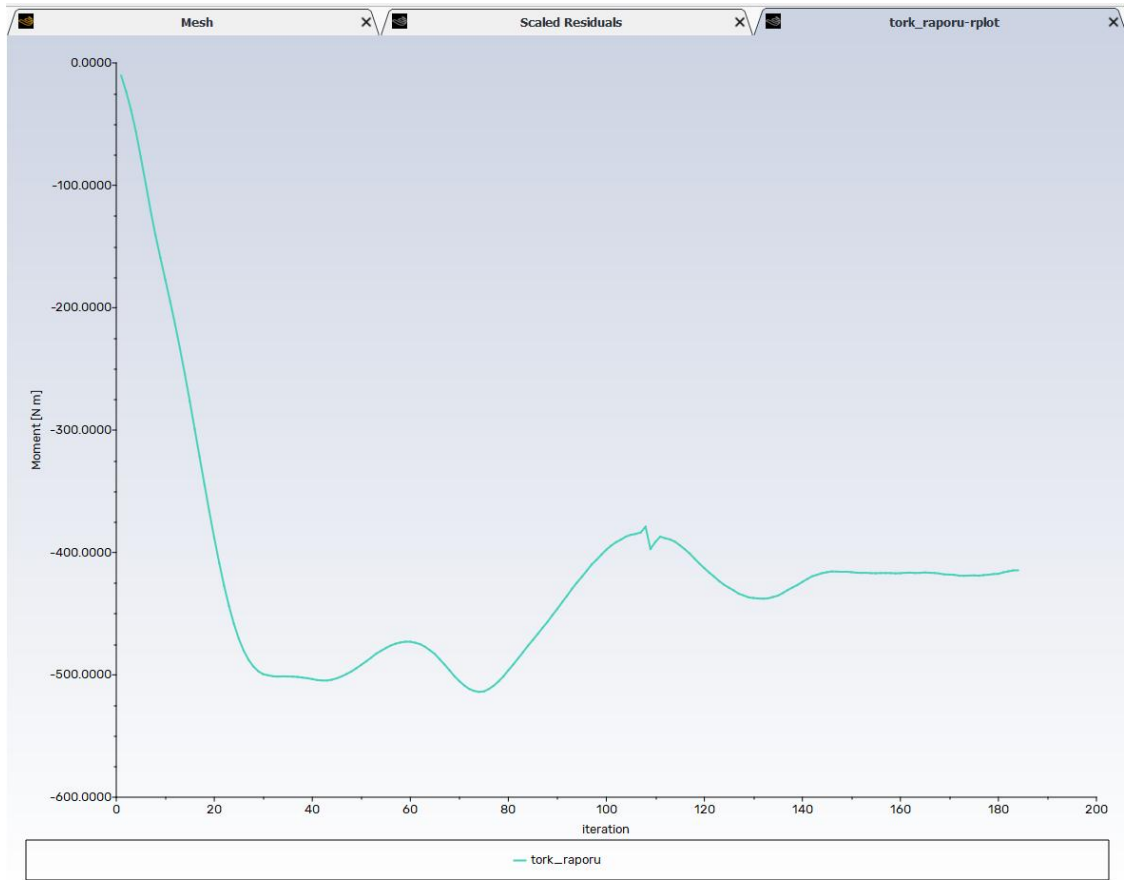
EK 9. 5m/s Hız ile Giren Suyun 1000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



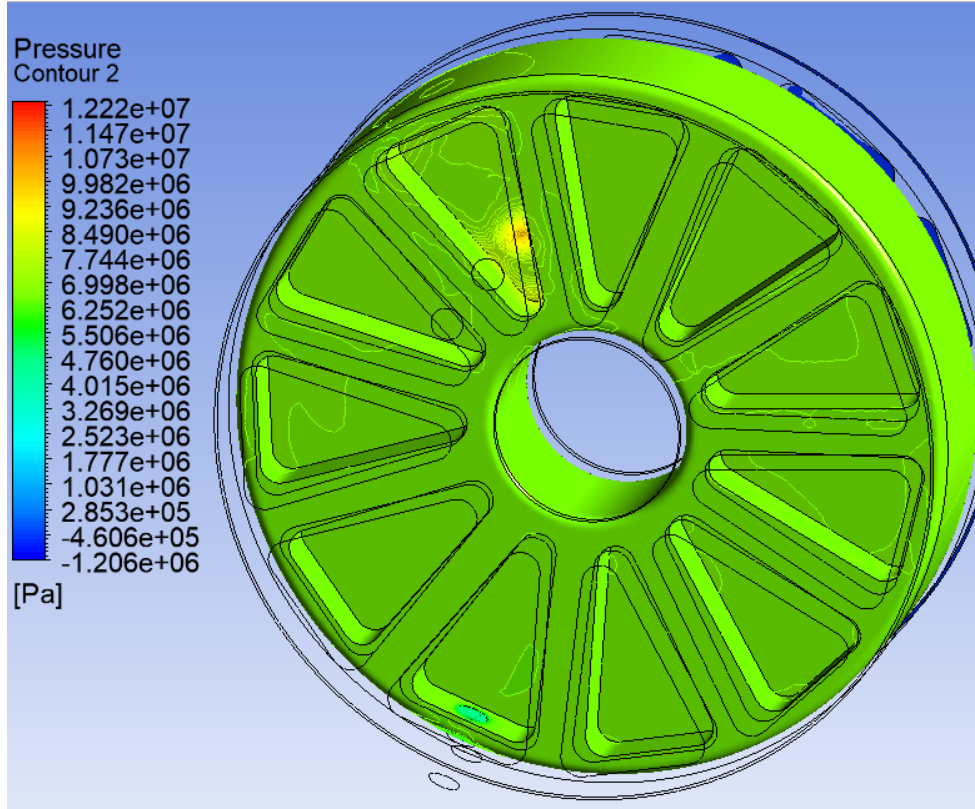
EK 10. 10.5m/s Hız ile Giren Suyun 2000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



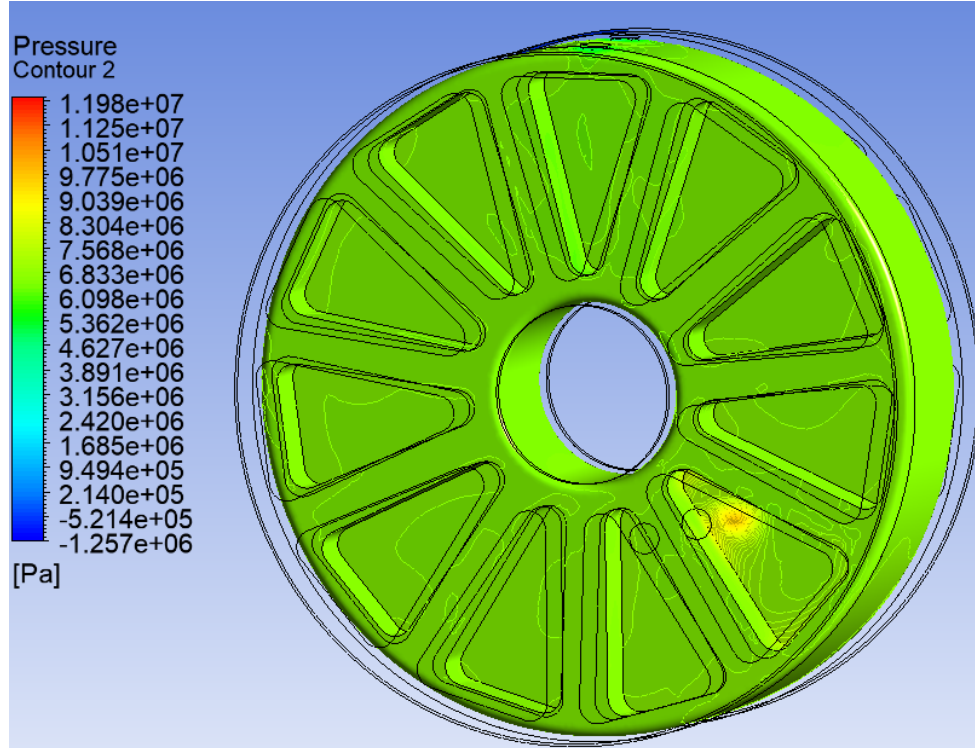
EK 11.5m/s Hız ile Giren Suyun 3000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



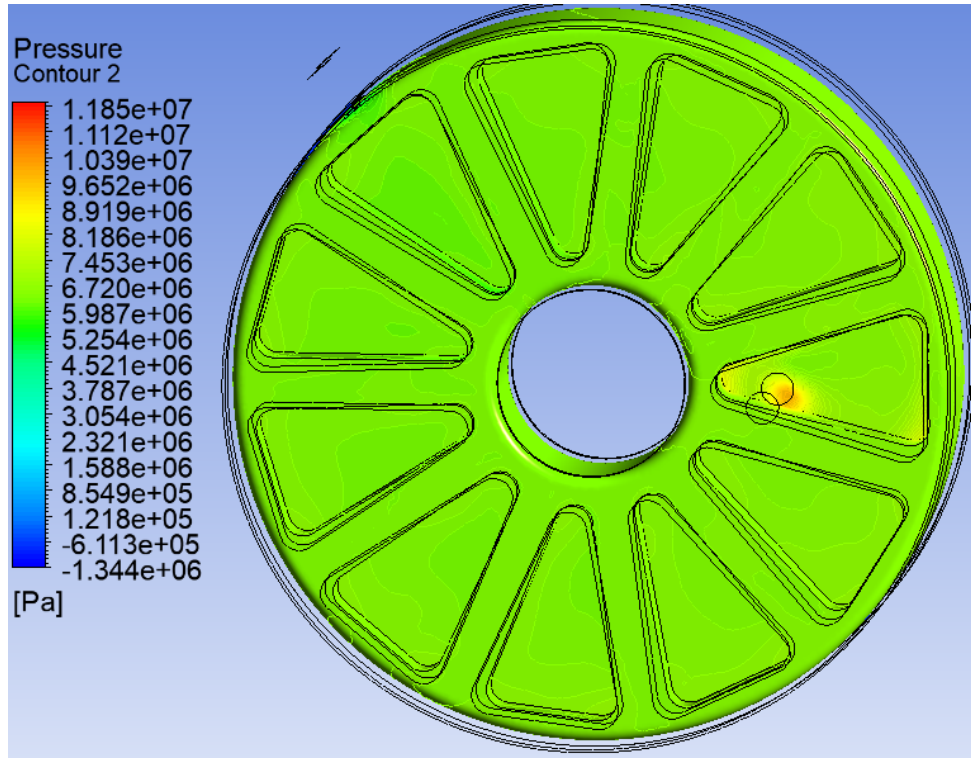
EK 12.5m/s Hız ile Giren Suyun 5000 Devirdeki Canlı Tork Grafiği



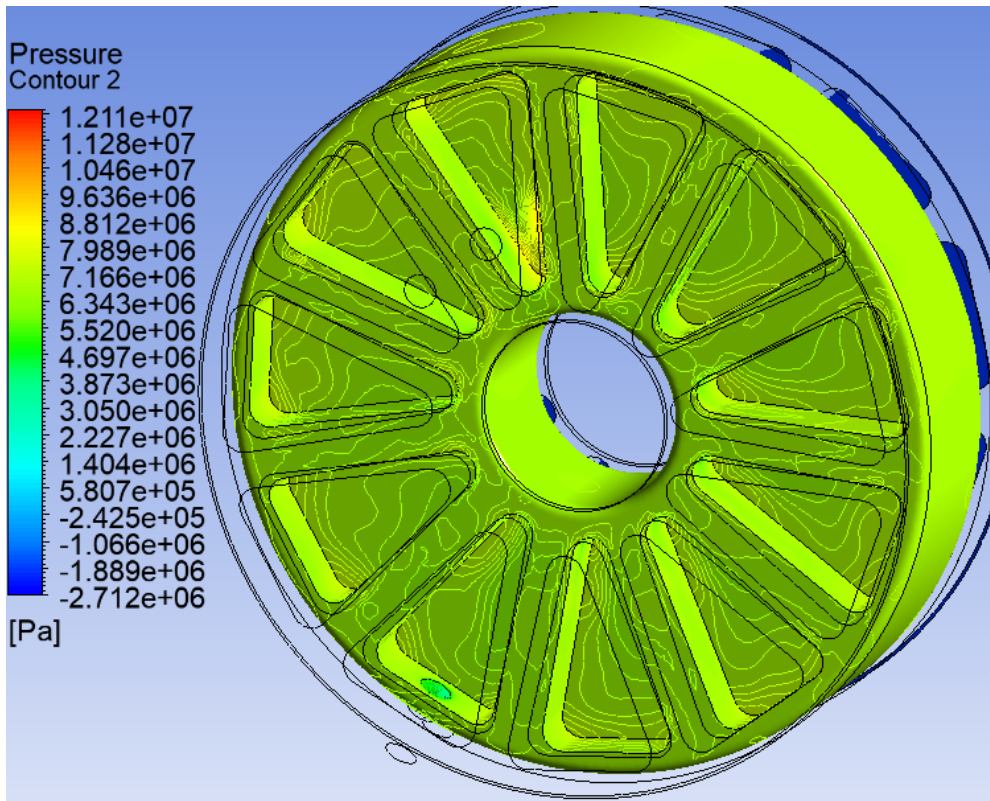
Ek 13 3m/s Hız ile Giren Suyun 1000 Devirdeki Basınç Değerleri



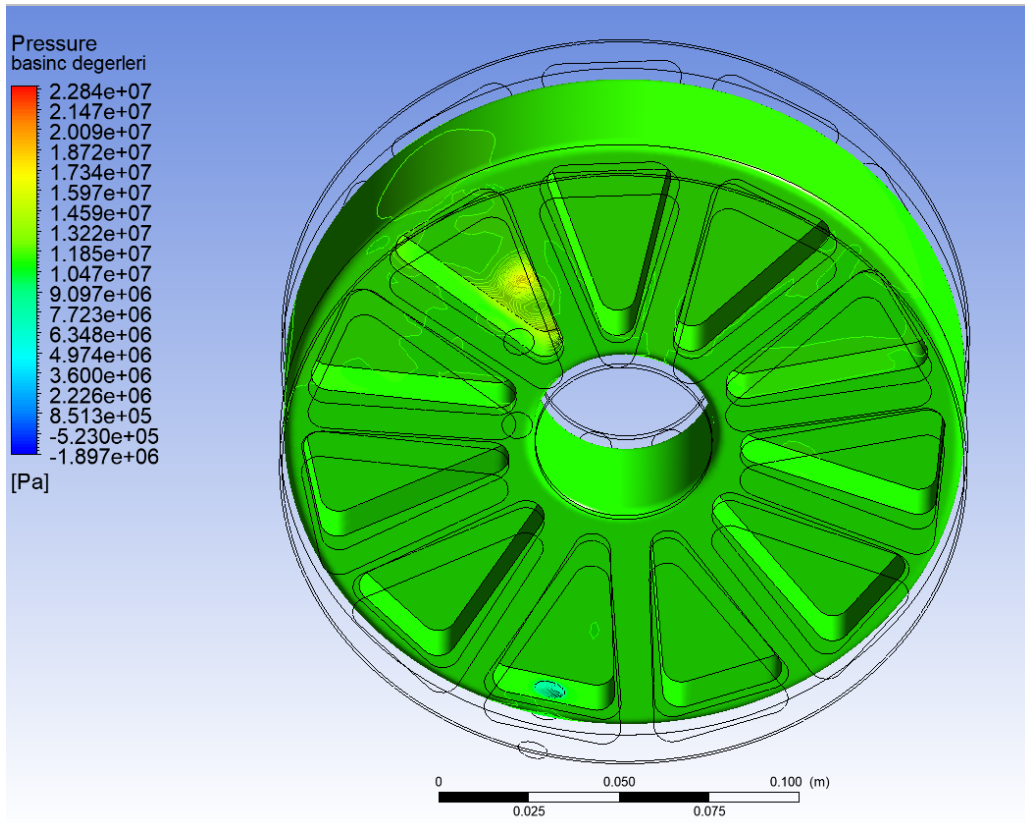
Ek 14 3m/s Hız ile Giren Suyun 2000 Devirdeki Basınç Değerleri



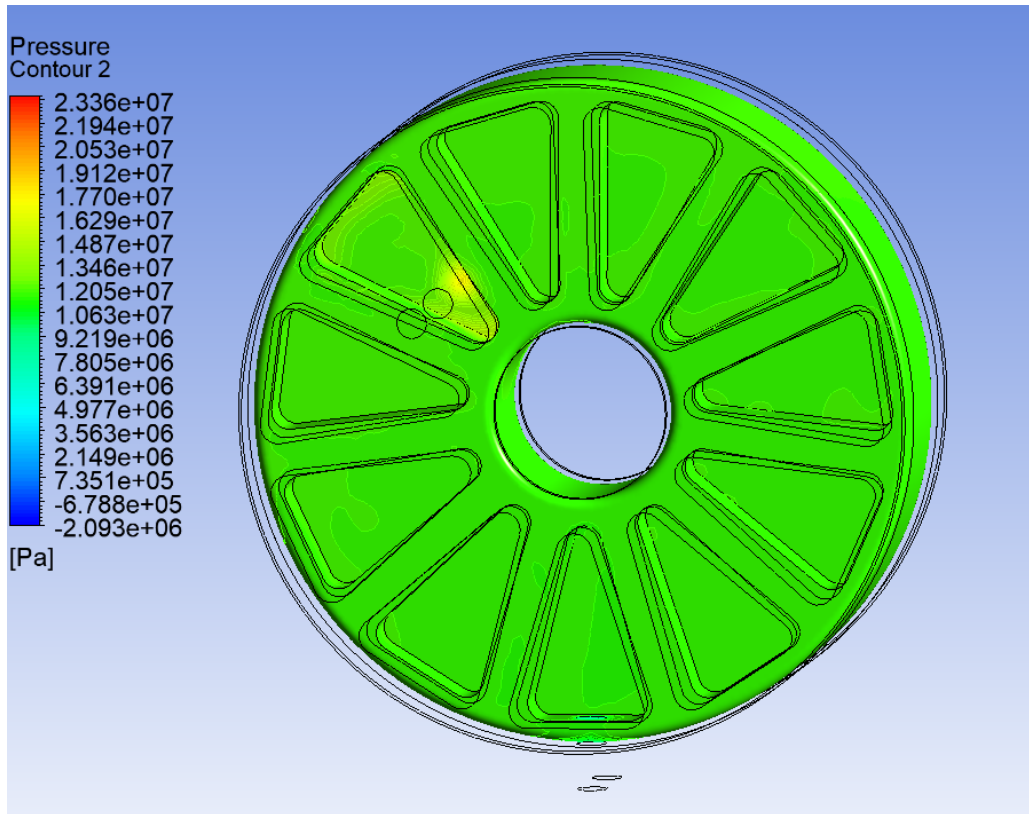
Ek 15 3m/s Hız ile Giren Suyun 3000 Devirdeki Basınç Değerleri



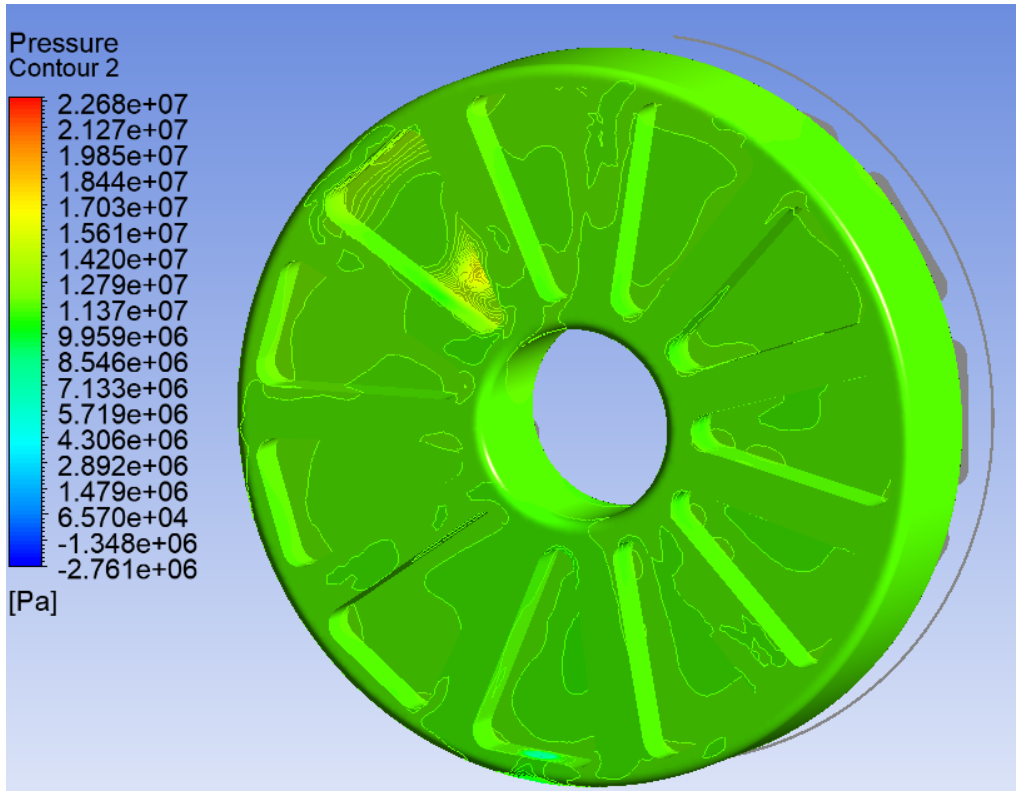
Ek 16 3m/s Hız ile Giren Suyun 5000 Devirdeki Basınç Değerleri



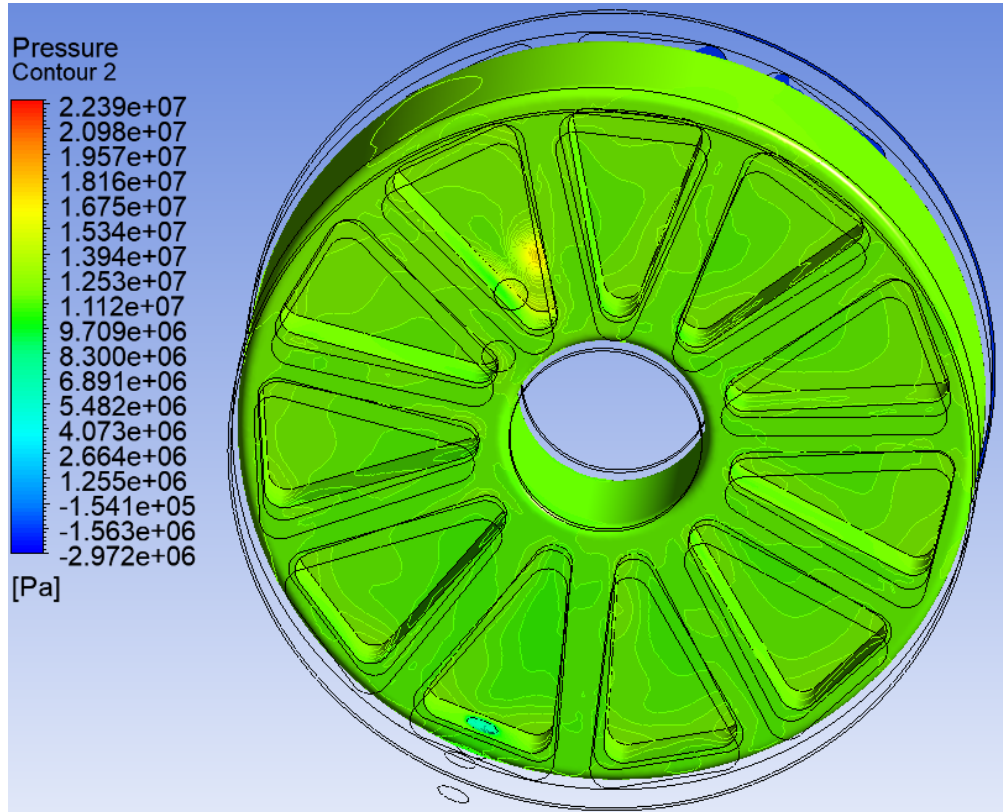
Ek 17 4m/s Hız ile Giren Suyun 1000 Devirdeki Basınc Değerleri



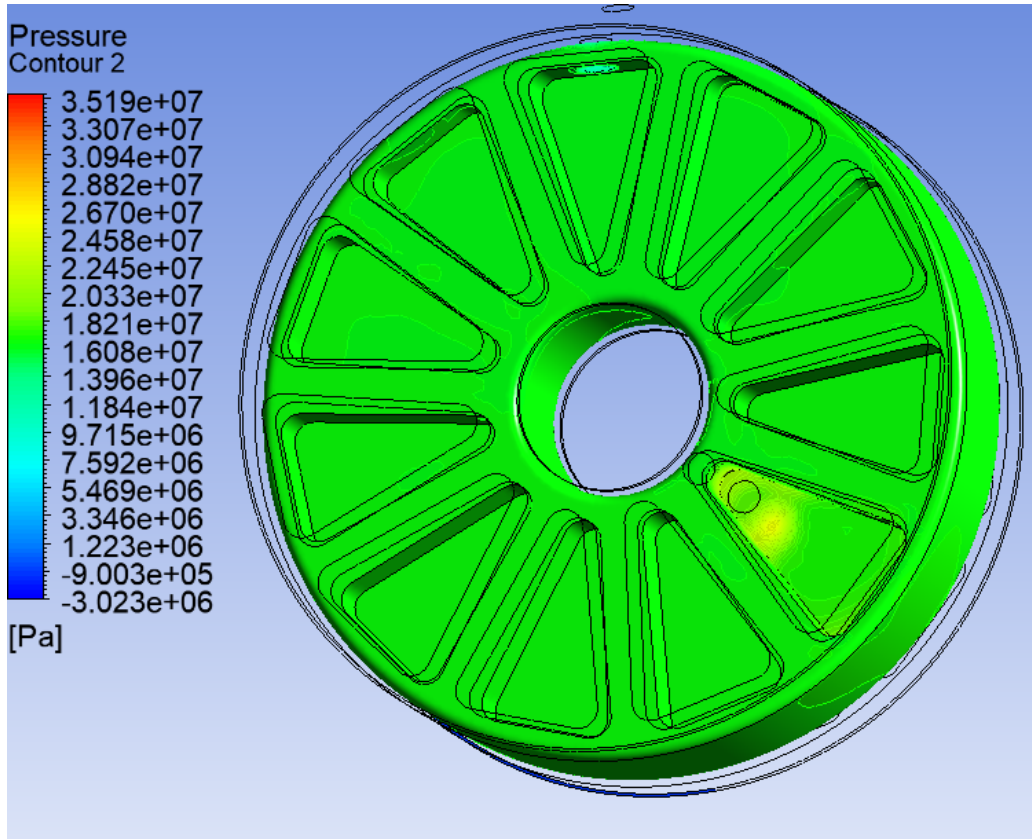
Ek 18 4m/s Hız ile Giren Suyun 2000 Devirdeki Basınc Değerleri



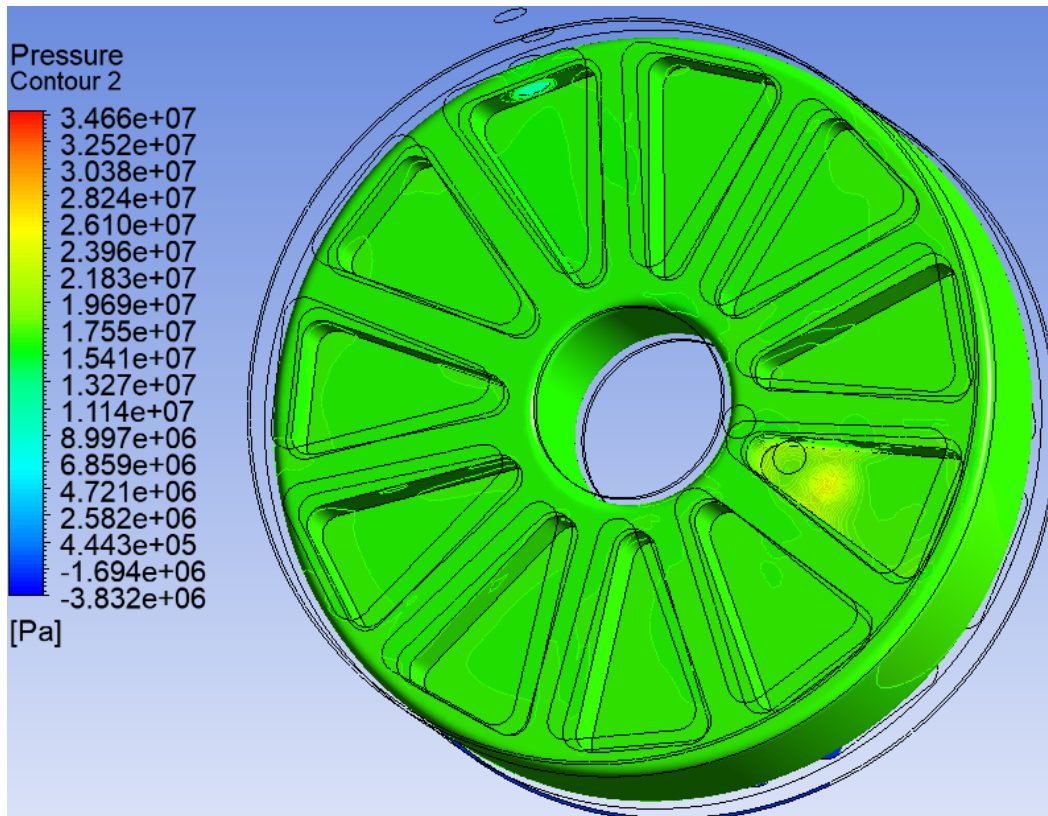
Ek 19 4m/s Hız ile Giren Suyun 3000 Devirdeki Basınç Değerleri



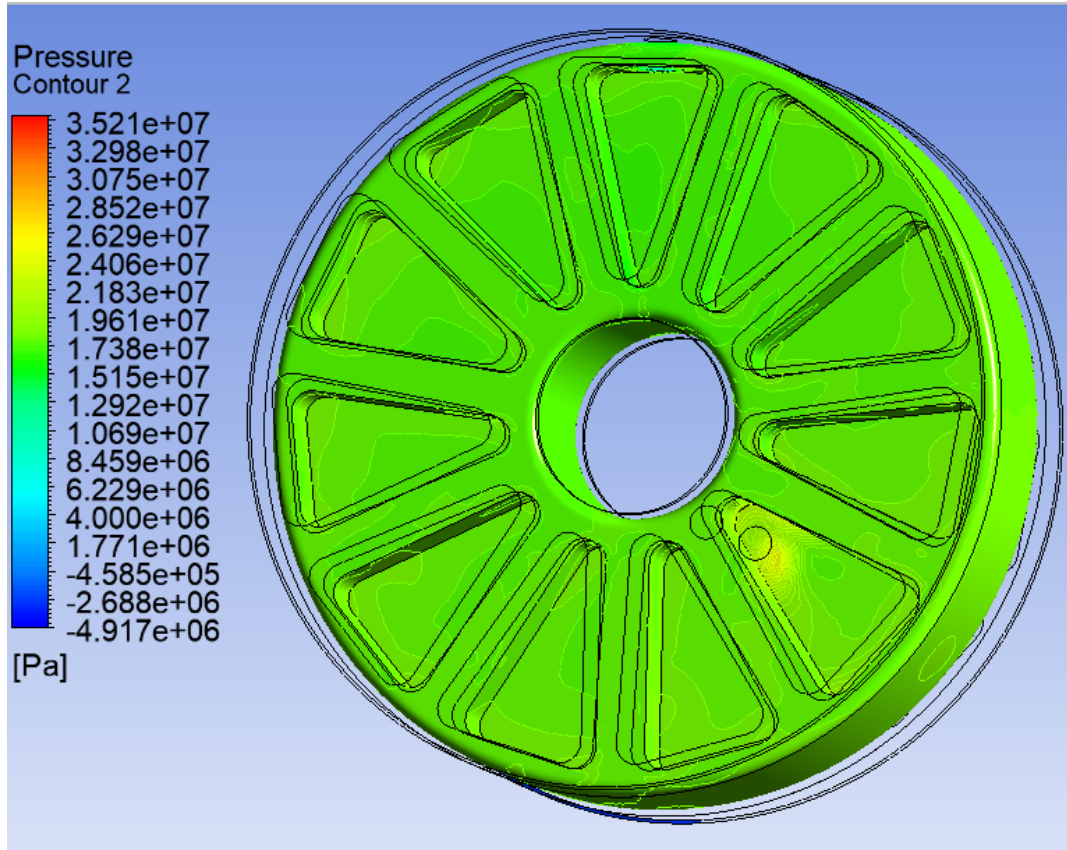
Ek 20 4m/s Hız ile Giren Suyun 5000 Devirdeki Basınç Değerleri



Ek 21 5m/s Hız ile Giren Suyun 2000 Devirdeki Basınç Değerleri



Ek 22 5m/s Hız ile Giren Suyun 3000 Devirdeki Basınç Değerleri



Ek 23 5m/s Hız ile Giren Suyun 5000 Devirdeki Basınç Değerleri