

ARKA-ARKAYA FORMASYONDAKİ F1 ARAÇLARININ BİRBİRLERİNE OLAN ETKİLERİNİN AERODİNAMİK YÜKLER AÇISINDAN İNCELENMESİ

PREPARED BY	EDITED\CHECKED BY
E. Can Uçar Aday Mühendis	M. Ahmet Kozanoğlu Lider CFD Mühendisi

Özet

Formula 1 yarış araçları serbest akış (freestream) altında çalışacak şekilde, maksimum potansiyelde performans göstermek üzere tasarlanmakta ve optimize edildiğinden dolayı, 2 aracın arka-arkaya seyir halinde olduğu bir formasyonda (drafting), arkadaki yarış aracının genel olarak aerodinamik yüklerinin azaldığı bilinmektedir.

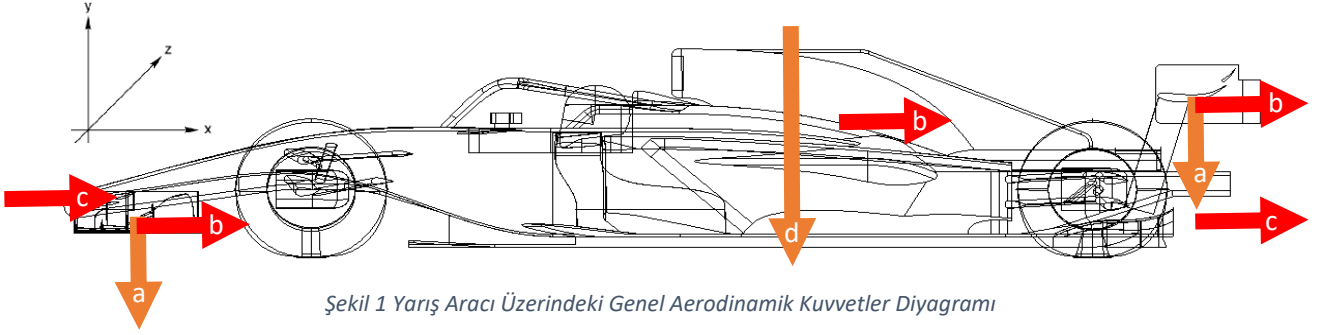
Bu çalışma, 2017 FIA (Fédération Internationale de l'Automobile) regülasyonlarına uygun [1] genel bir Formula 1 yarışında yer alan arka-arkaya formasyonda seyreden araçların oluşturduğu türbülanslı akışın, arkadaki aracın sürüklenme kuvvetine olan etkisini, CFD analizleri ve teorik olarak açıklamayı hedeflemektedir.

Giriş

Son yıllarda, Formula 1 yarışı, iyi tasarlanmış yarış aracına sahip olan takımın kazandığı, mühendislerin sporu haline gelmektedir. Bunun başlıca nedenlerinden biri, arabaların karmaşık aerodinamik tasarımlarının sağladığı, araçların düşük sürüklenme kuvvetlerine (drag force) maruz kalması ve sürüş dinamiklerine uygun yere basma (downforce, lift force) kuvvetlerinin optimum olarak üretilmesidir.

Aracın sahip olduğu komponentlerden, girift yüzeylerden dolayı ve akışın istikrarsızlaşması, farklı hızlarda olan akış taneciklerinin birbiri ile olan etkileşimi, yarış araçlarının yüksek süratler ile seyretmesi vb. sebeplerden dolayı arkasında türbülanslı bir hava akımı üretmektedir. Arkadaki aracı etkileyen aerodinamik sebepler genel olarak bu şekilde açıklanabilir.

Bu durum özellikle virajlarda, sollama fazında ve arka arkaya belirli bir takip mesafesi ile hareket eden grup halindeki araçlar için önemlidir. Çünkü araçlar virajı daha yüksek bir hızda alabilmek için, sollama anında ani hızlanmak için, arka-arkaya seyir formasyonunda takip mesafesini koruyabilmek için, araçlar mümkün olduğunca optimum aerodinamik kuvvetlere ihtiyaç duyarlar. Bu kuvvetler yukarıda belirtilen sebepler ile kararsızlaşabilir. Bu kararsızlaşma neticesinde yarış aracı ürettiği motor gücünü yere iletmekte verimsizleşebilir. Araç yere olan basma kuvvetinin kaybı ve araç üzerine gelen türbülanslı akışın olumsuz etkilerinden kaynaklı yoldan çıkabilir.



- a: Yere basma Kuvveti (liftforce).
- b: Yüzey sürtünmesinden kaynaklı sürüklenme kuvveti (Skin Fraction Drag Force).
- c: Basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti. (Pressure Force, Base Coefficient).
- d: Venturi etkisinden kaynaklı yere basma kuvveti.

Genel anlamda aerodinamik kuvvetlerin düşüşü, aracın sürüklenme kuvvetinin de düşmesi anlamına gelmektedir. Bu durum aracın ivmelenebilmek için daha az enerji harcayacağı anlamına gelse de, üretilen basma kuvvetinin düşüşü, motor gücünün yere iletilmesini verimsizleştirecektir. Bu durumda aerodinamik verimliliği dikkate almak gerekmektedir.

$$\eta = \frac{C_L}{C_D}$$

Burada C_L kaldırma katsayısıdır. Yarış araçları için bu kuvvet yere basma kuvveti olarak anılır. Yere basma kuvveti katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

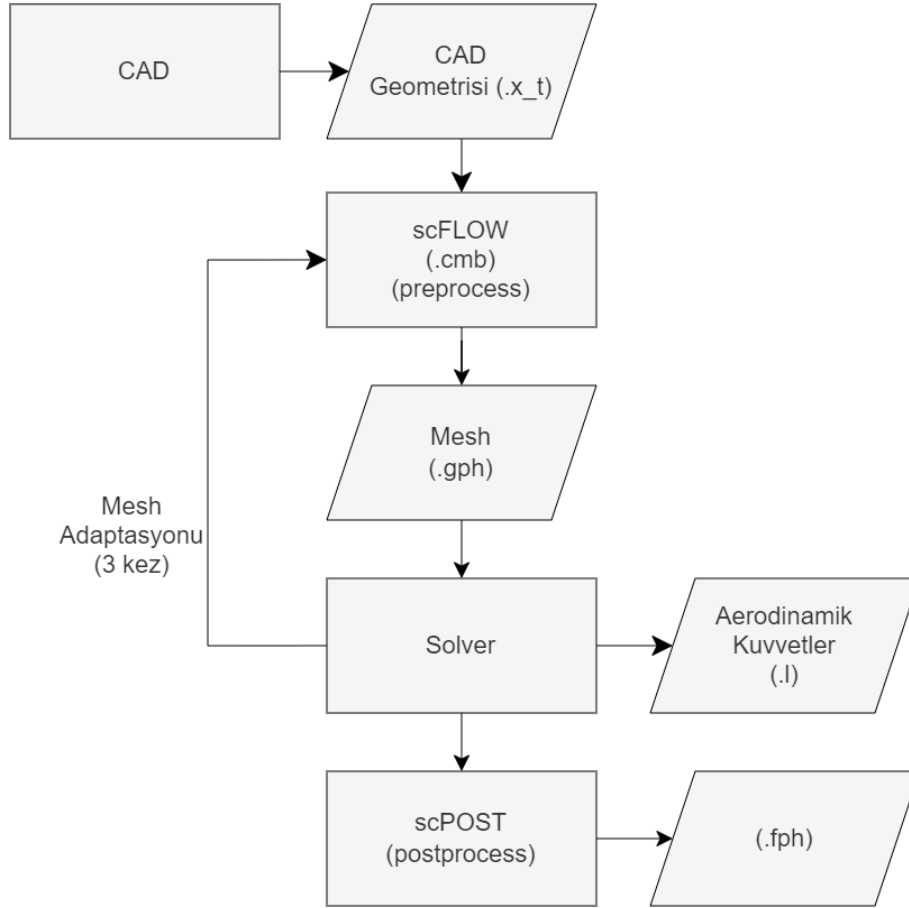
$$C_L = \frac{2F_L}{\rho v^2 A} = \frac{2 \sum F_y}{\rho v^2 A}$$

Burada C_D sürüklenme katsayısıdır. Aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho v^2 A} = \frac{2 \sum F_x}{\rho v^2 A}$$

Yöntem ve İş Akışı

CFD (Computational Fluid Dynamics), akışkanların davranışını çözmek ve analiz etmek için sayısal yöntemler ve algoritmalar kullanan akışkanlar mekaniğinin dalıdır ve hesaplamalar CFD yazılımları üzerinden çözümlenmektedir. Bu yazıda kullanılan CFD yazılımı, BİAS Mühendislik bünyesinde bulunan Cradle CFD içindeki scFLOW modülü ile gerçekleştirilmiştir.



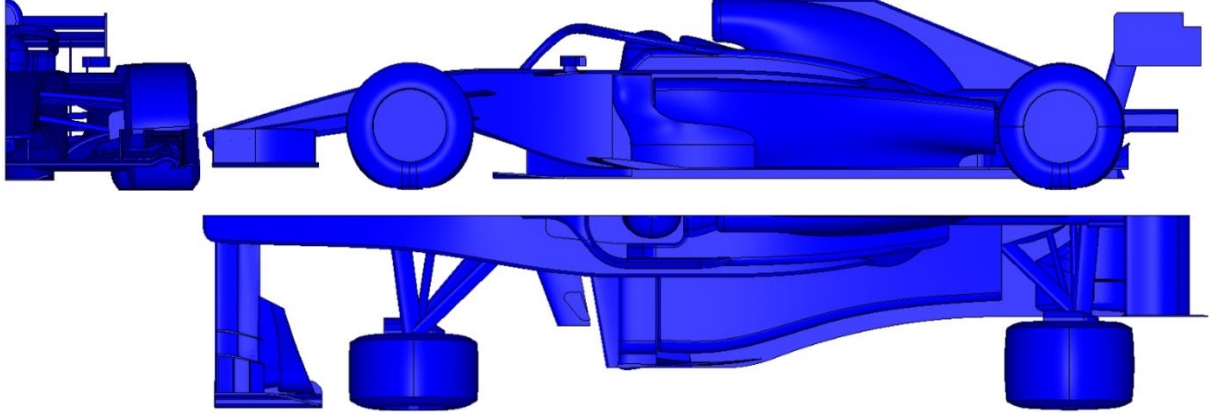
Şekil 2 İş Akış Şeması

Validasyon çalışması, sonuçların rölatif olarak, modeller arası sonuç farkları karşılaştırılacağından dolayı yapılmamış, öncelikle tek bir F1 araç modeli kurulmuş, model üzerinde y^+ ve mesh eleman sayısının analiz üzerinde etkili olmadığı noktayı bulabilmek için (Mesh Independence Study) mesh adaptasyon analizi yapılmıştır. Sonrasında yapılan çalışmalar içindeki en yüksek mesh elemanına sahip çalışma dikkate alınmıştır.

Sonrasında, aynı y^+ yaklaşım değeri ve lokal mesh ayarları ile F1 araçlarının arka-arkaya 0.25L aralıkta seyir halindeki formasyonda iken CFD analizi yapılmış, bu analizler neticesinde arka-arkaya seyir formasyonunun, arkadaki araca olan etkisi incelenmiştir.

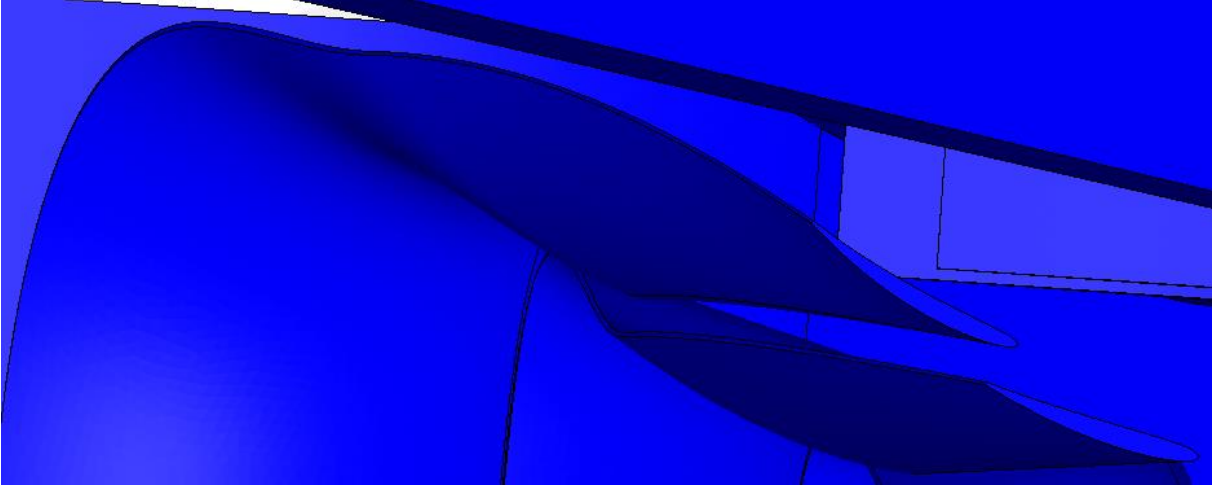
Geometri

Kullanılan CAD (Computer Aided Design) geometrisi, 2017 regülasyonlarına [1] uygun şekilde modellenmiş, gerçekçi, genel boyutlara ve komponentlere sahip bir Formula 1 aracıdır. Araç, 5.22 m uzunluğunda, 1m yüksekliğinde, 2.01 m genişliğinde boyutlara sahiptir. Aracın simetrik yapısı nedeniyle, yarım olarak modellenmiş, CFD analizi simetrik sınır koşulu ile tanımlanmıştır. Post process görüntüleri araç aynalanarak oluşturulmuştur.



Şekil 3 Analizi yapılan F1 Aracının Genel Görünümü

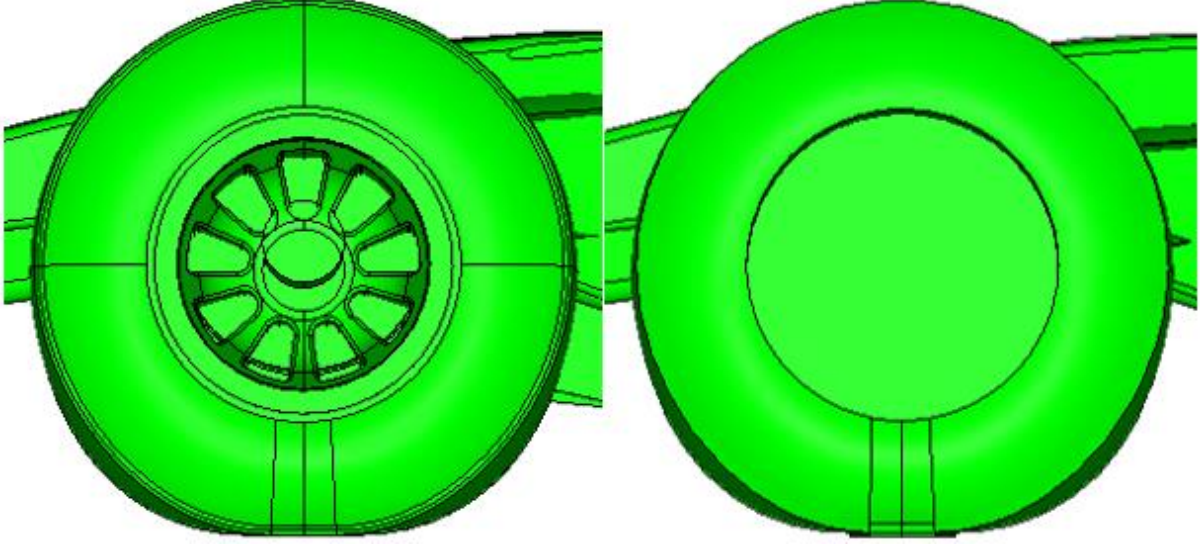
Analizler için “polyhedral” mesh ağının oluşturulması kararlaştırıldığından dolayı, modelde geometri temizliği yapılmıştır.



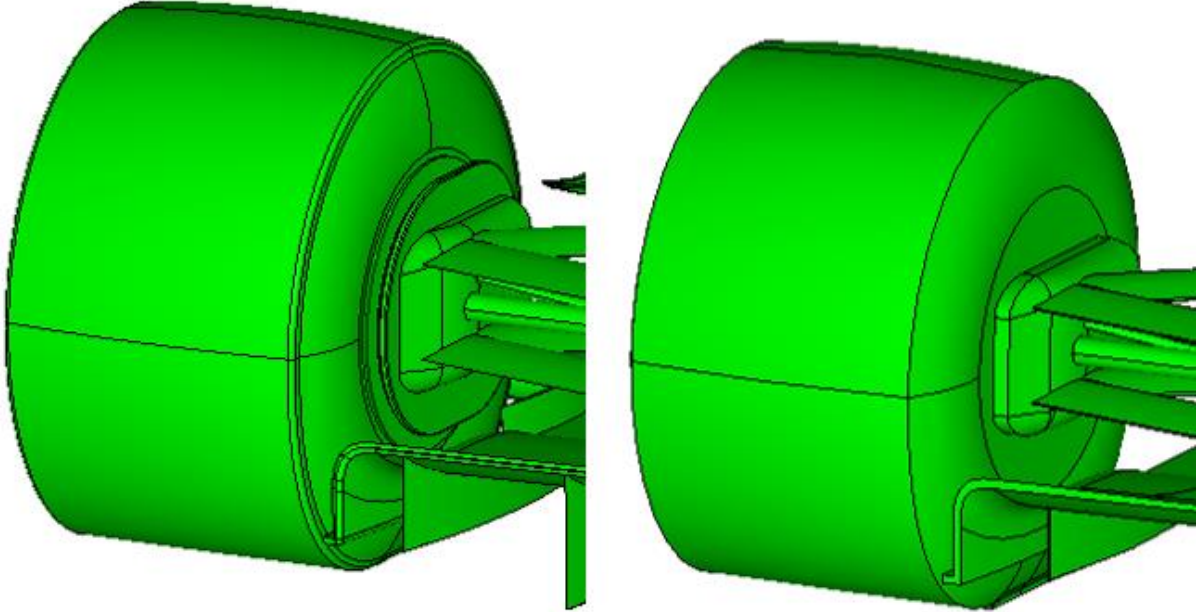
Şekil 4 Bütün kanatların ve süspansiyon askı kollarının firar kenarları mesh kalitesini arttırmak amacıyla 2mm içe olacak şekilde pahlanmıştır.

Yarış aracının soğutma radyatörü tamamen geometriden çıkarılmış, hava kutusu giriş (intake box) ve egzoz çıkışı duvar olarak tanımlanmıştır.

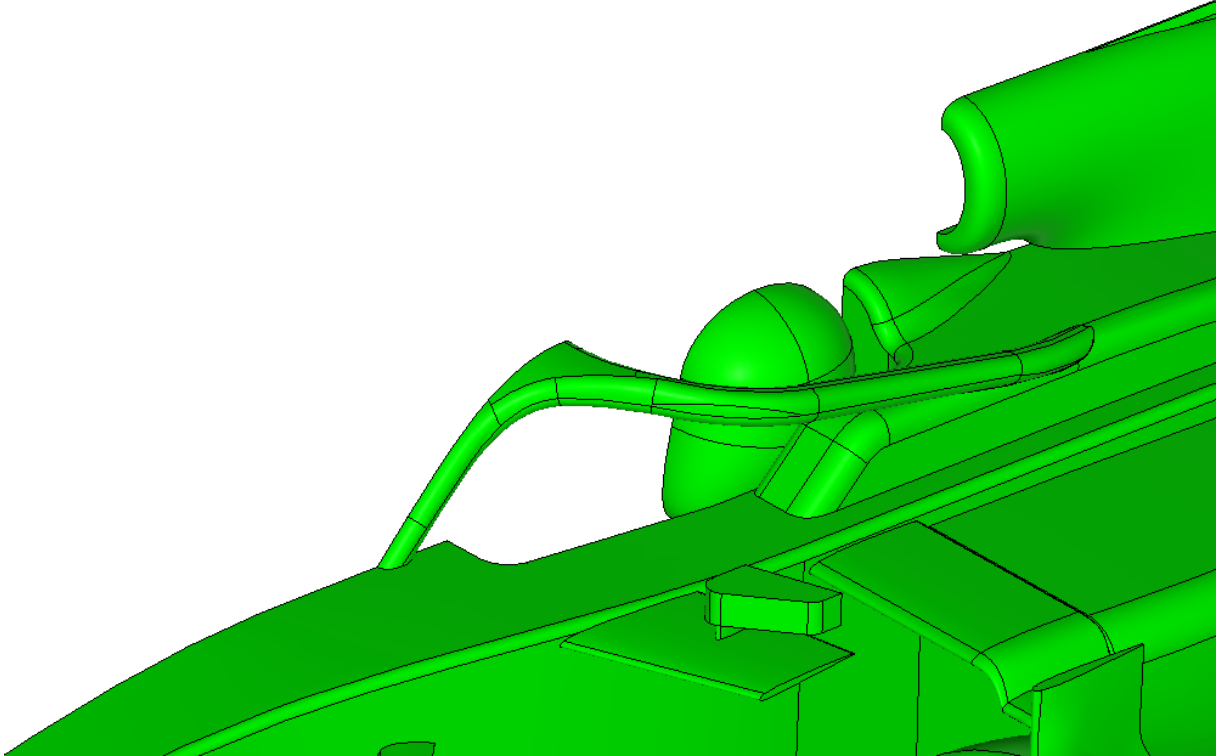
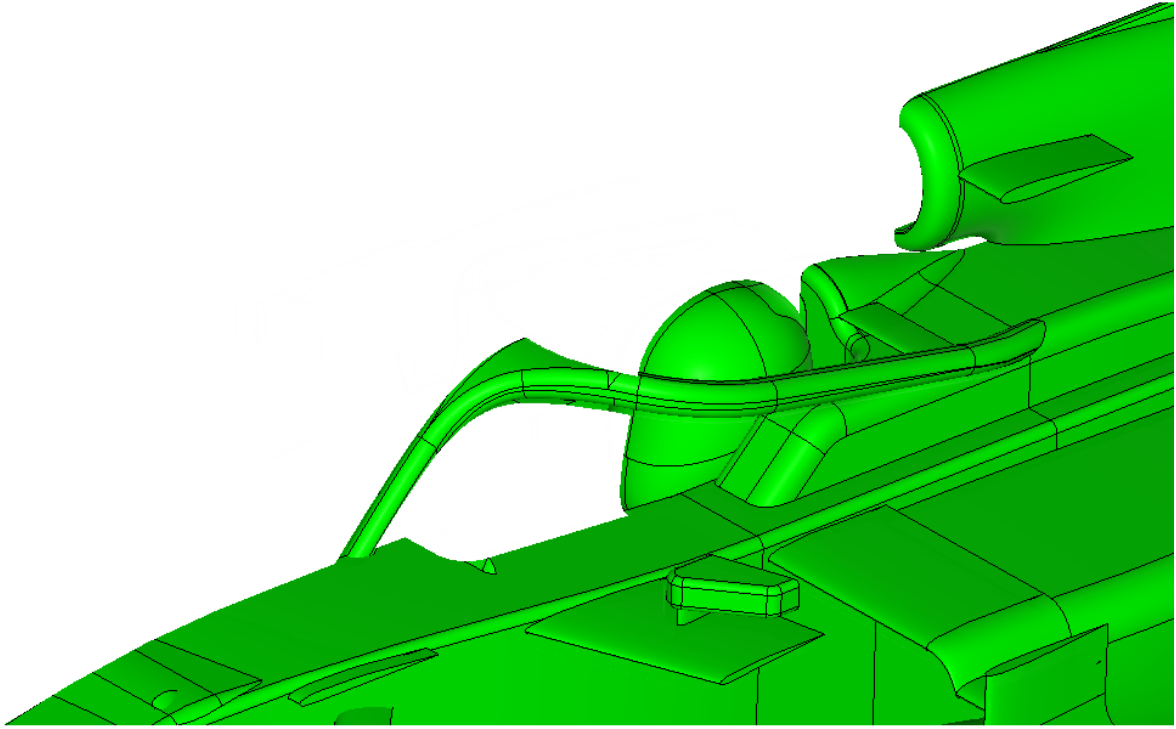
Analiz ve araştırma sonucuna büyük etkisi olmayacak geometrik unsurların, “polyhedral” mesh ağı oluşturulacağından dolayı, temizlenmiş ve basitleştirilmiştir.



Şekil 5 Tekerleklerin Basitleştirilmesi (önceki sol, düzeltilmiş hali sağ)



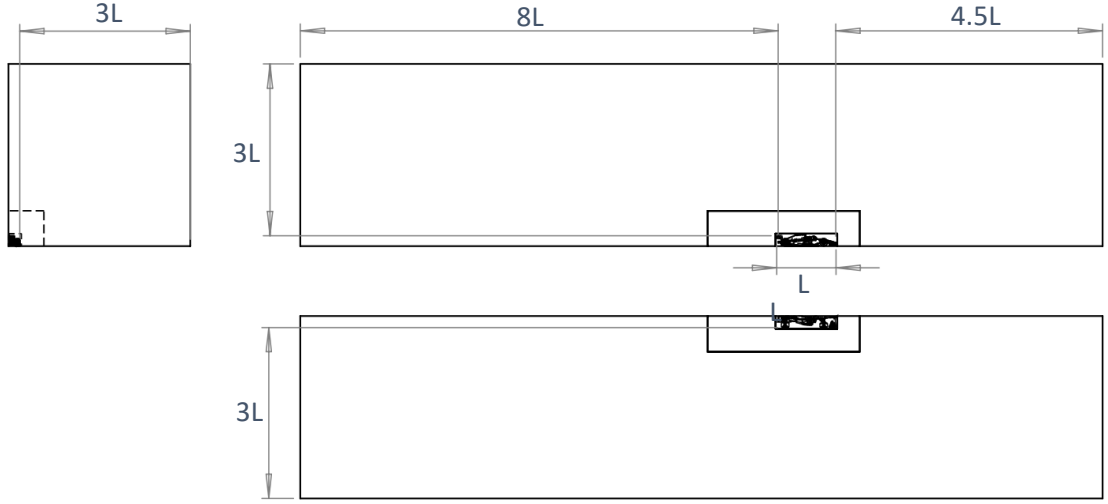
Şekil 6 Fren Sistemlerinin Basitleştirilmesi (önceki sol, düzeltilmiş hali sağ)



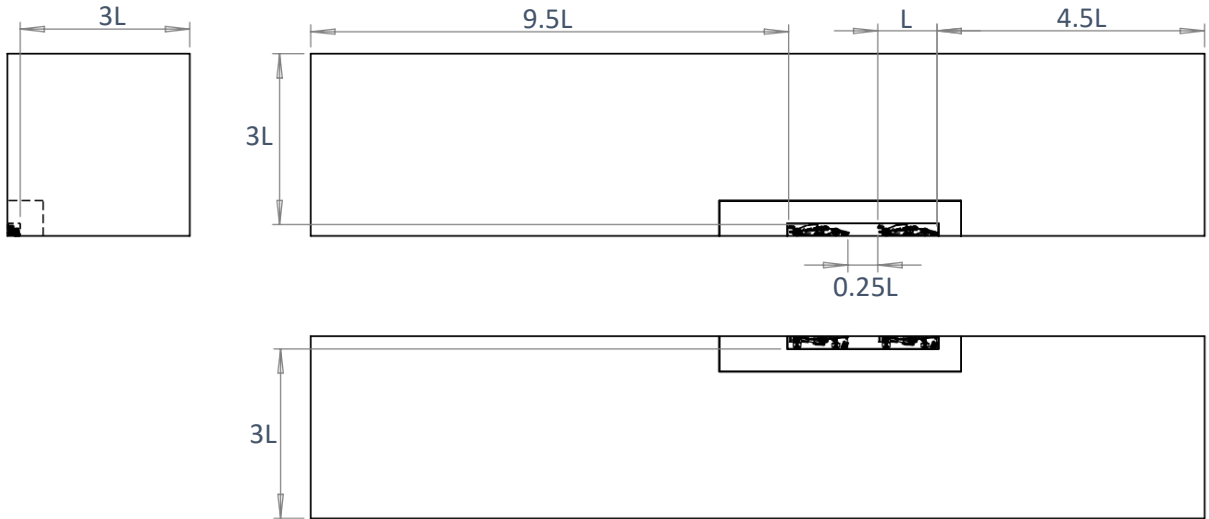
Şekil 7 Gövde Üzerinde Çeşitli Geometrik Temizlik Görüntüsü (Temizlenmemiş Üstte, Temizlenmiş Altta)

Kontrol Hacmi

Kontrol hacmi, yarış araçlarının arkasındaki türbülanslı akışı yakalanabilmesi ve duvar etkilerinin elimine edilebilmesi için uzun tutulmuş, literatür araştırmaları sonucunda [2] aşağıda görüldüğü üzere oluşturulmuştur. Mesh elemanı sayısını çözüm süresi açısından kontrol edebilmek hem de lokal olarak mesh elemanı boyutunu belirtebilmek adına çoklu bloktan oluşan (Multiblock Meshing) kontrol hacmi oluşturulmuştur. “L” olarak ifade edilen uzunluk aracın boylamsal uzunluğu olan 5.22m’dir.



Şekil 8 Tek F1 Aracının Kontrol Hacmi Boyutları



Şekil 9 Arka-Arkaya Seyir Formasyonundaki 2 F1 Aracının Kontrol Hacmi Boyutları

MESH

Mesh Ağı Seçimi

Mesh yapısı, geometri temizliği aşamasının zaman alıcı olması ve karmaşık yüzeylerin varlığı gibi nedenlerle, literatürde "Cartesian Grid" olarak adlandırılan "Voxel Fitting" mesh yapısıyla oluşturulması öngörülmekteydi. Ancak, "Voxel Fitting" mesh yapısıyla oluşturulan ağ, çok sayıda mesh elemanı içereceği (tek araç modeli için yaklaşık 30 milyon) ve bunun çözüm süresini uzatacağından dolayı, geometri temizliği yapılarak daha düşük sayıda eleman sayısına (3 milyon) sahip, "polyhedral" tipi mesh ağı oluşturulmuştur. Kaynakların etkili kullanılması, bunun etkili değerlendirilebilmesi için aşağıda her iki mesh ağı için karşılaştırmalı bir tablo oluşturulmuştur. İş süresi, analiz bilgisayarının kabiliyeti doğrultusunda hesaplanmıştır.

MESH TİPİ	AVANTAJ	DEZAVANTAJ	İŞ SÜRESİ
"VOXEL FİTTİNG"	Geometri temizliği gerektirmez ya da çok az gerektirmektedir.	Mesh elemanı sayısı çok fazla olduğundan çözüm süresi görece daha uzun olacaktır.	15 gün.
"POLYHEDRAL"	Daha düşük mesh elemanı sayısı ile ağı oluşturabilmek mümkündür. Bu nedenle çözüm süresi daha kısadır.	Geometri temizliği gerektirir.	5 gün.

Burada hangi mesh ağının analiz için uygun olup olmadığını belirleyen en etken faktör, hesaplama bilgisayarının kabiliyetidir. Bu bağlamda bu çalışmada, iş süreleri göz önüne alındığında "polyhedral" mesh ağı oluşturularak analizler çözümlenmiştir.

Platform

Çözüm yapılan bilgisayar, Windows 10 işletim sistemli, 64 Gb Bellek, 40 çekirdekli, 2.20 Ghz işlemci saat hızına sahip bir iş istasyonunda toplamda 10 saatte çözümlenmiştir.

Mesh Özellikleri

Mesh ağı oluşturulur iken y+ yaklaşımı kabul edilerek sınır tabaka oluşturulmuştur. Sınır tabakada bulunan mesh elemanlarının taban uzunluğu-yükseklik oranı yarış aracı üzerinde maksimum 20 olacak şekilde hesaplanmış, y+ bu doğrultuda 50 olarak kabul edilmiştir. Y+ hesaplamasında referans uzunluk olarak aracın boylamsal uzunluğu (5.22m) alınmıştır. 5 katman sınır tabaka örülmüştür.

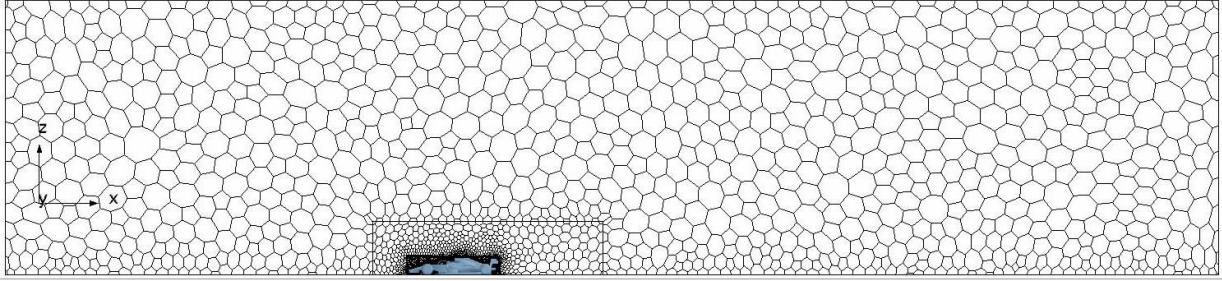
Mesh Adaptasyon Analizi (Mesh Adaptation Analysis)

Mesh adaptasyon analizi, hem mesh elemanından bağımsız noktayı tespit etmek hem de kontrol hacmi içerisindeki ani basınç ve hız değişimlerini, girdapları yakalayabilmek için 2 kademe olacak şekilde, toplamda 3 analiz yapılmıştır. Mesh elemanı sayısı son analizde başlangıç mesh ağına oranla 2 kat artacak şekilde belirlenmiştir.

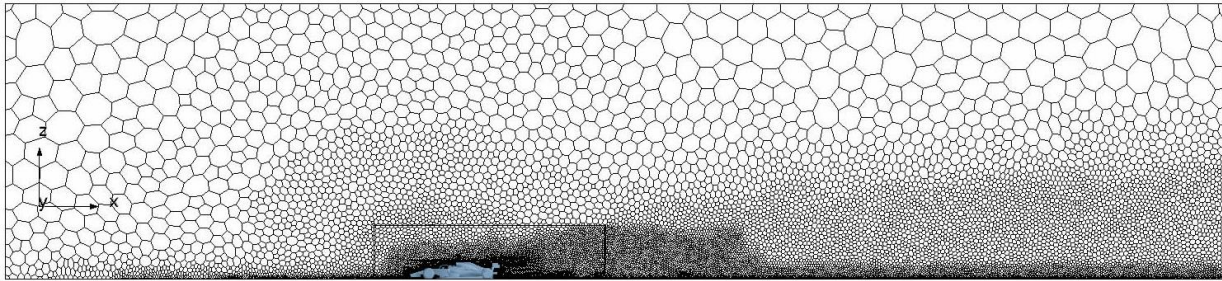
Tek Araç Modeli

	Başlangıç Mesh Ağı	Adaptif Mesh Ağı 1	Adaptif Mesh Ağı 2
Eleman Sayısı	1.9 Milyon	4.67 Milyon	5.8 Milyon
C_D	1.59	1.55	1.55
% Hata	-	%2.58	%0

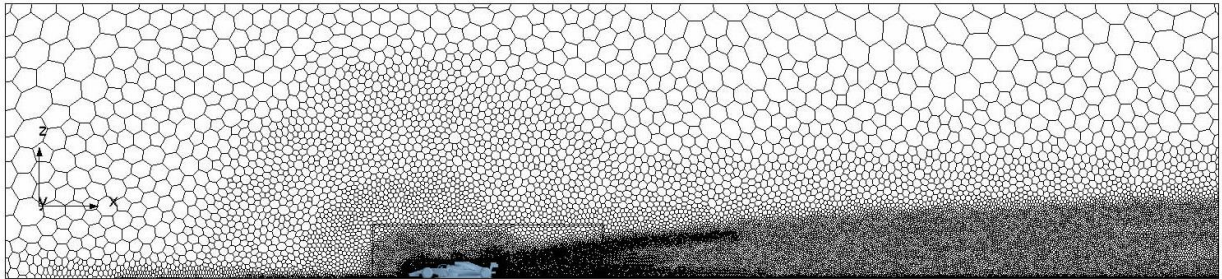
Yapılan mesh adaptasyon analizi neticesinde, 4.67 milyon mesh elemanı tek araç modeli için sonucun değişmediği, mesh elemanından bağımsız noktadır.



Şekil 10 Tek Araç Modeli Başlangıç Mesh Ağı



Şekil 11 Tek Araç Modeli Adaptif Mesh Ağı 1

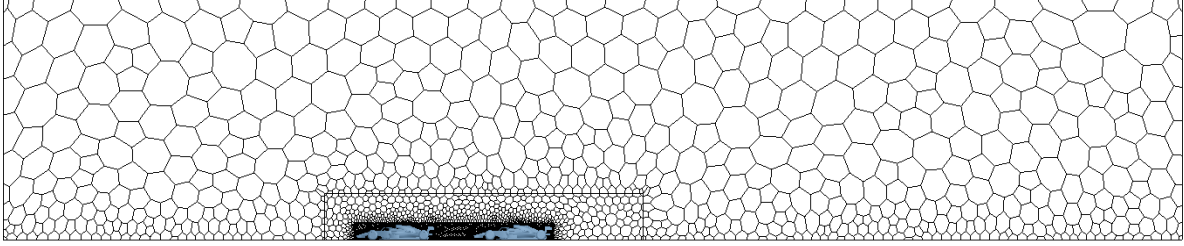


Şekil 12 Tek Araç Modeli Adaptif Mesh Ağı 2

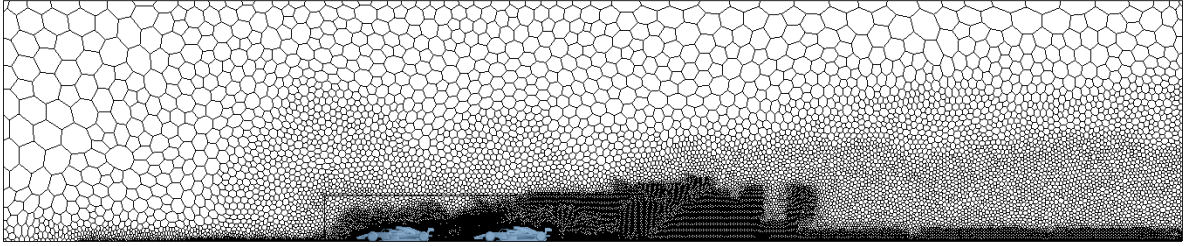
Çift Araç Modeli

	Başlangıç Mesh Ağı	Adaptif Mesh Ağı 1	Adaptif Mesh Ağı 2
Eleman Sayısı	3.2 Milyon	7.8 Milyon	10.9 Milyon
C_{D} Arkadaki Araç	(yakınsamadı)	1.01	1.00
% Hata	-	-	%0.01

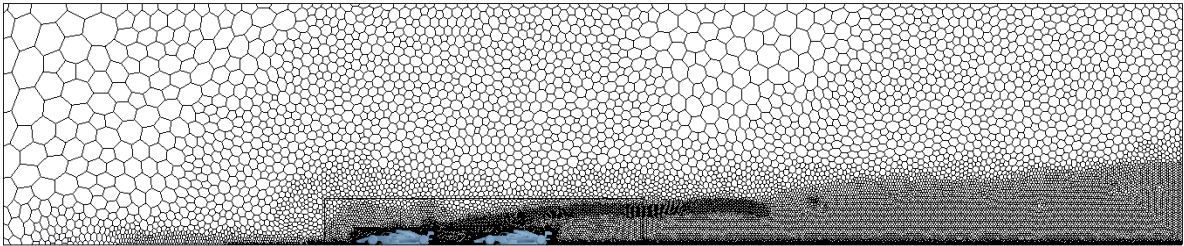
Yapılan mesh adaptasyon analizi neticesinde, 7.8 milyon mesh elemanı çift araç modeli için sonucun değişmediği tespit edilmiştir.



Şekil 13 Çift Araç Modeli Başlangıç Mesh Ağı



Şekil 14 Çift Araç Modeli Adaptif Mesh Ağı 1



Şekil 15 Çift Araç Modeli Adaptif Mesh Ağı 2

Sınır Şartları

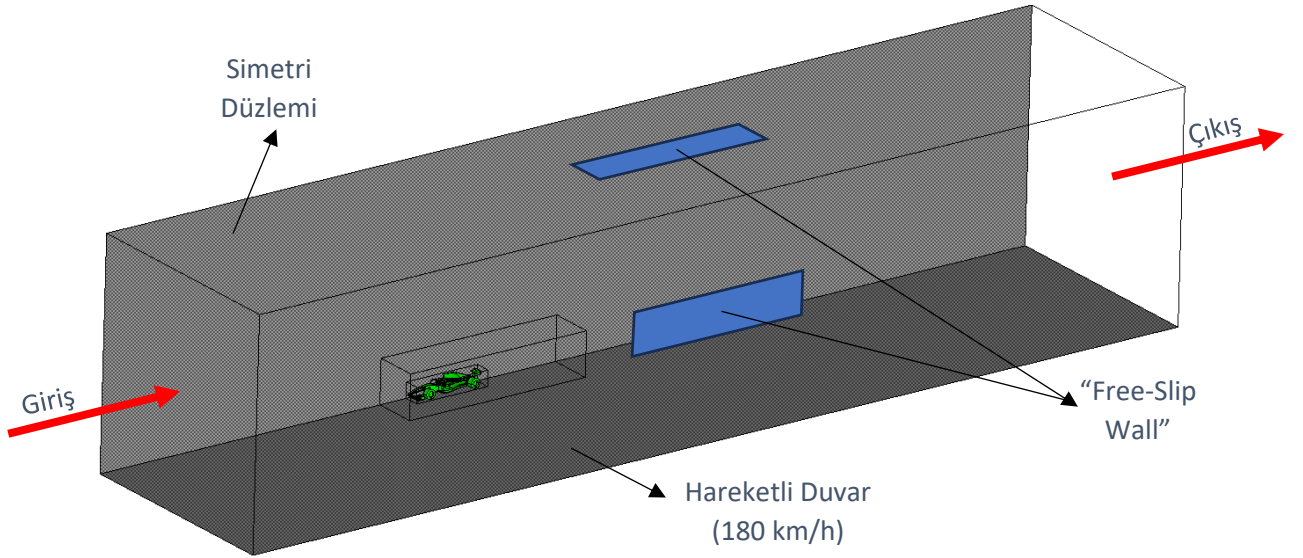
Araç Hızı	180 km/h
Akışkan	Hava (20°)
Akışkan Yoğunluğu	1.225 kg/m ³
Türbülans Yoğunluğu	%15
Dinamik Viskozite	1.81e-5
Referans Uzunluk	5.2225m
Reynolds	1.8e+7

Referans uzunluk olarak aracın x yönündeki uzunluğu alınmıştır [3]. Yer çekimi kuvveti hesaplandı.

Türbülans Yoğunluğu (Turbulence Intensity)

Türbülanslı akışlar oldukça karmaşık ve kaotik olduğundan, rastgele dalgalanmalarla modellenir. Türbülansı doğru bir şekilde yakalamak, CFD simülasyonlarında güvenilir ve gerçekçi sonuçlar elde etmek için çok önemlidir. Türbülans yoğunluğu, bu dalgalanmaların büyüklüğünün bir ölçüsüdür.

Burada, modelin yüksek türbülans yoğunluğu içerdiği göz önünde bulundurularak, %15 türbülans yoğunluğu girilmiştir. [4]

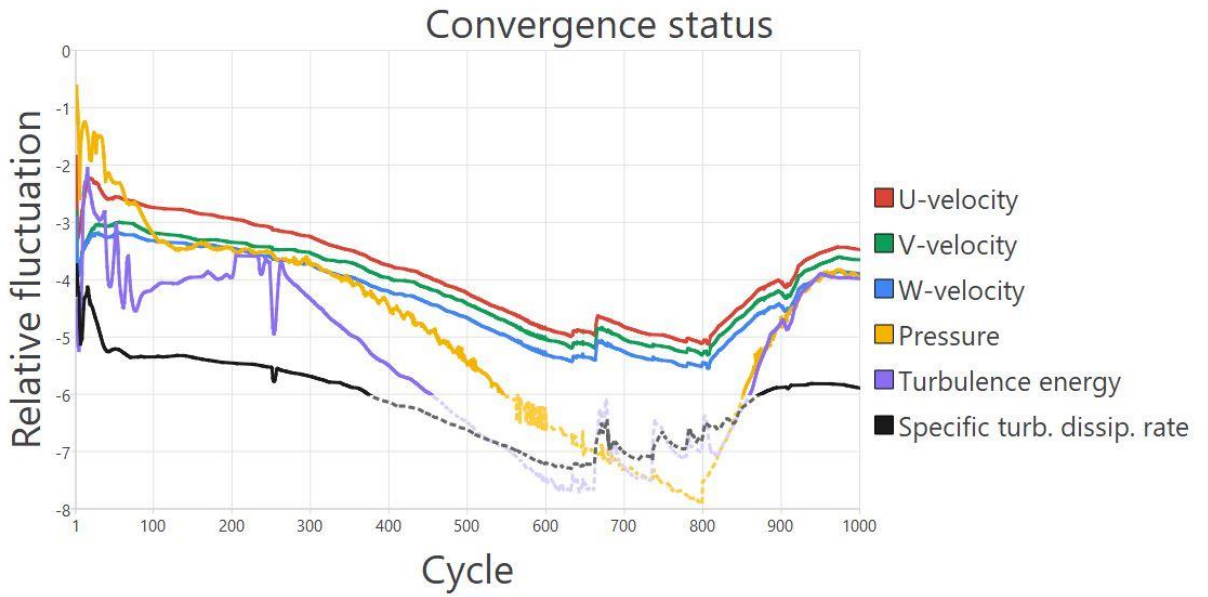


Şekil 16 Kontrol Hacmi Genel Görünüm

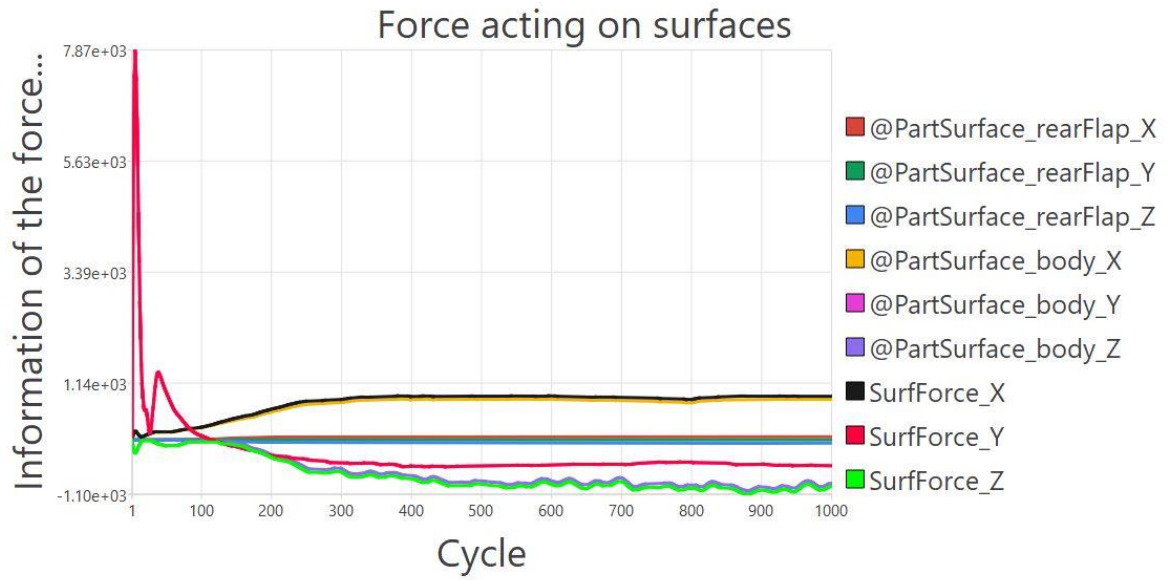
Çözücü (Solver)

Türbülans modelleri arasında, k- ω SST modeli, sınır katmanda k-e modellerine göre daha iyi sonuçlar verdiği için tercih edilen bir modeldir. Bu model, daha hızlı bir çözüm sunmasının yanı sıra, yakınsama ve k-e ile Spart Allmaras modellerine kıyasla daha iyi sonuçlar ortaya koymaktadır. [5]

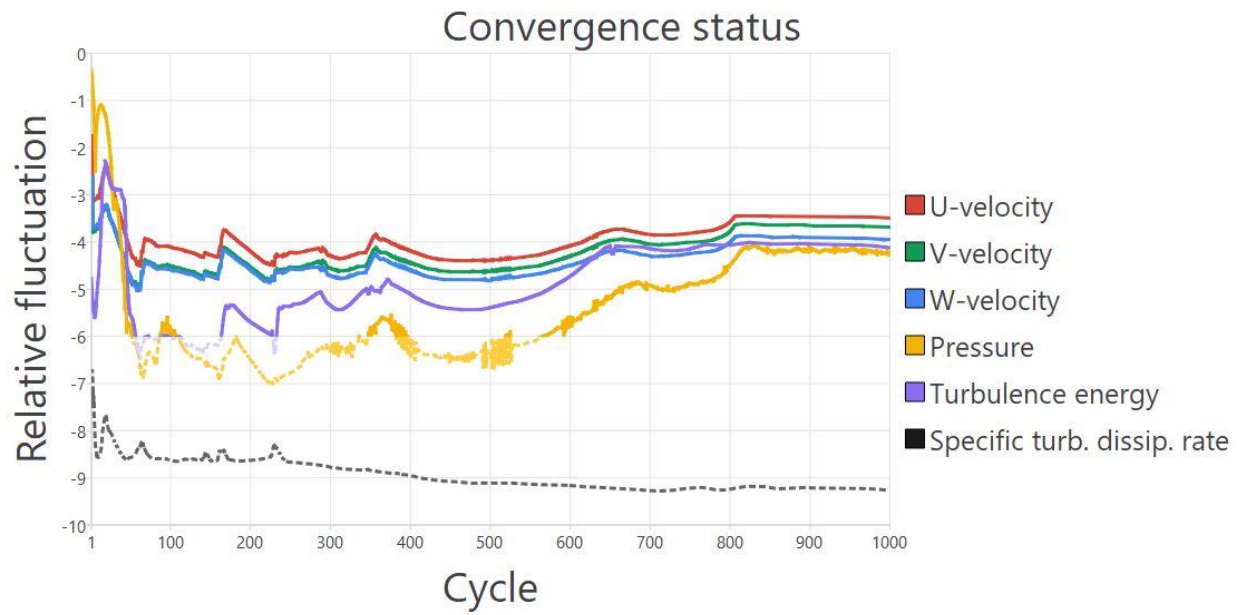
Çözücü Tipi	RANS – Daimî Durum (Steady State)
Türbülans Modeli	k- ω SST
	Momentum denklemi
	Süreklilik denklemi ($m_{sistem} = sbt$)
	Basınç Esaslı ($\rho = sbt$)
Yer Çekimi	Açık
Atmosferik Basınç	101325 Pa
Accuracy of Time Derivate Terms	Second Order



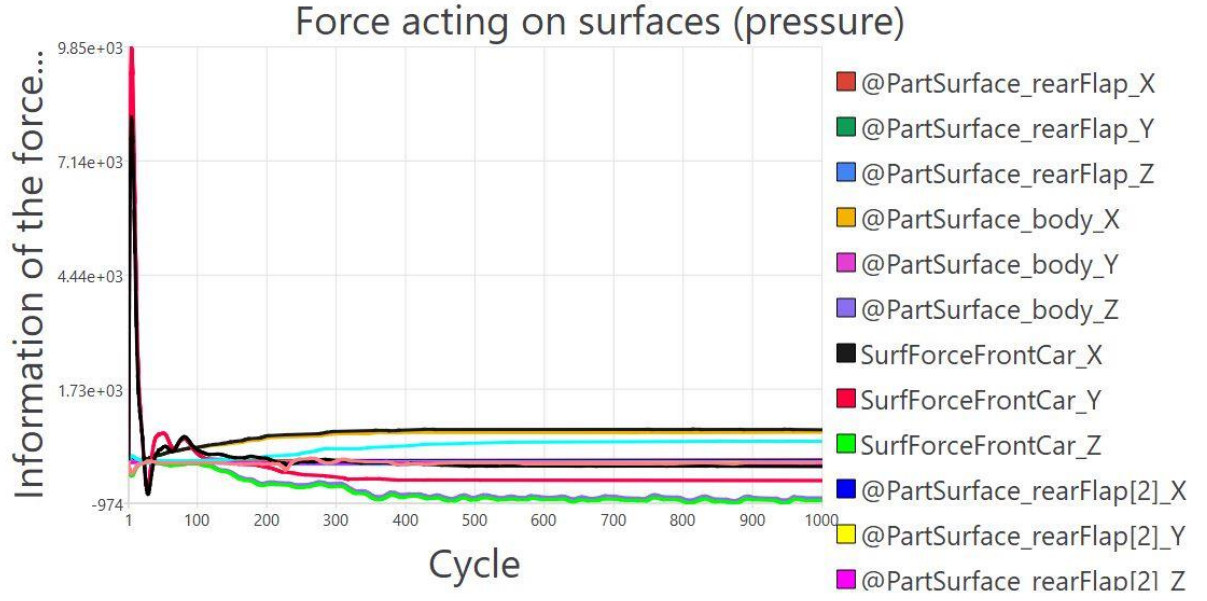
Şekil 17 Tek Araç Modeli İterasyon-Residual Grafiği



Şekil 18 Tek Araç Modeli İterasyon-Yüzey Basınçları Grafiği



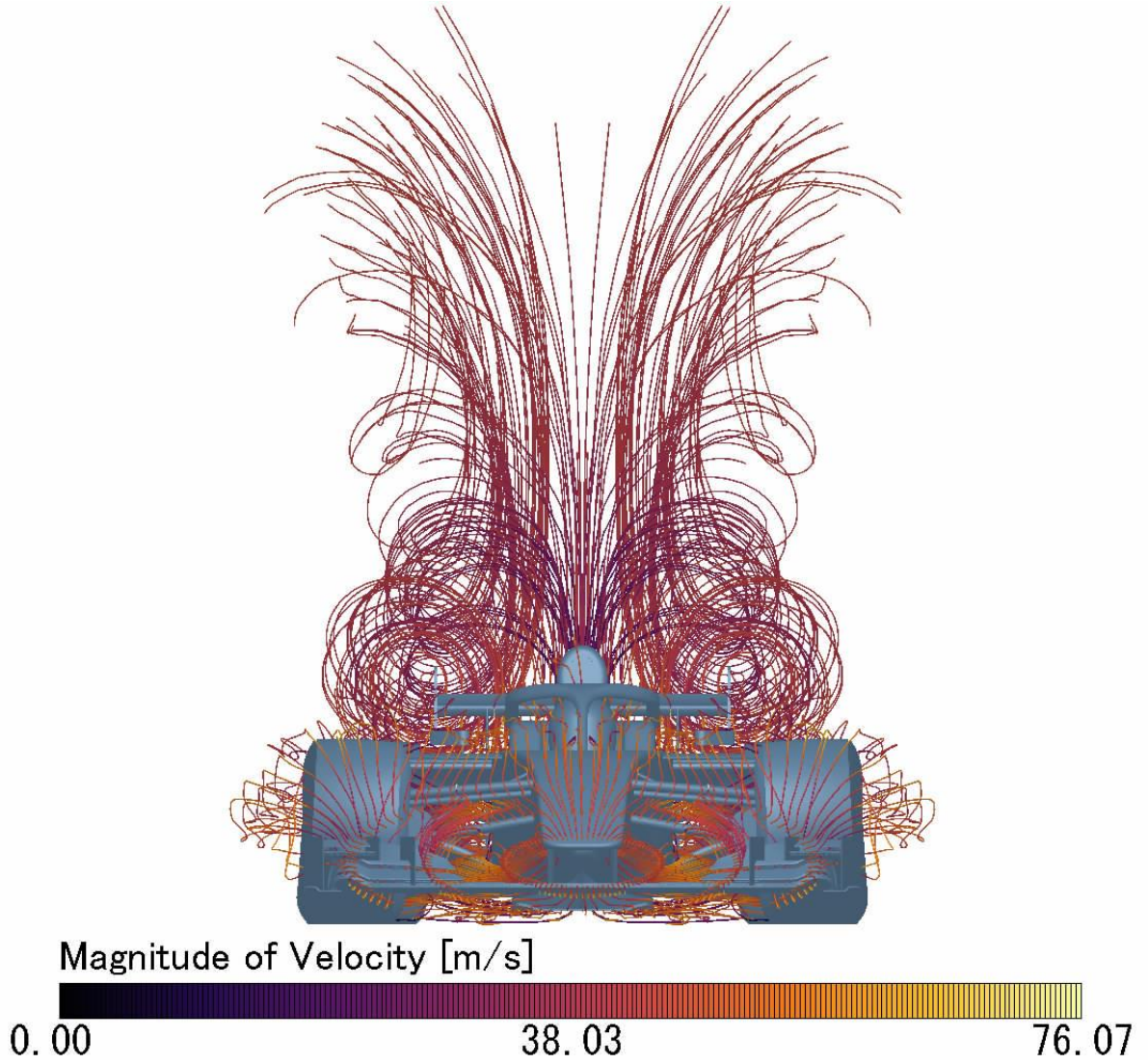
Şekil 19 Çift Araç Modeli İterasyon-Residual Grafiği



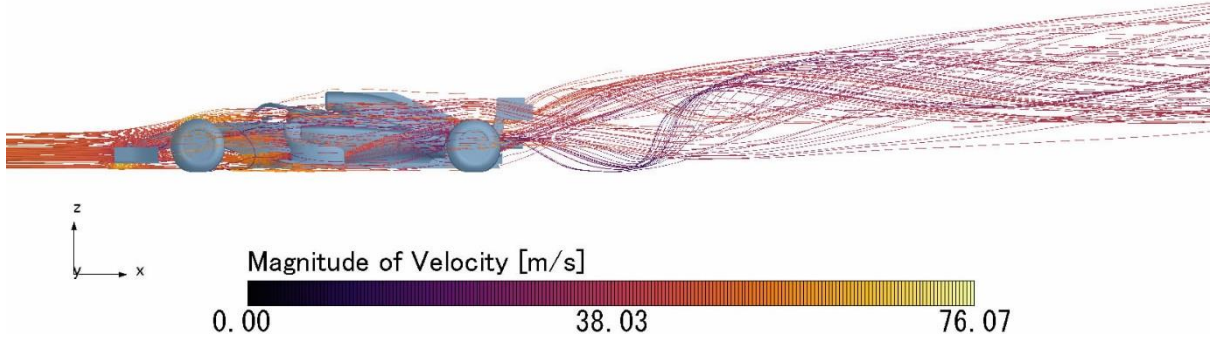
Şekil 20 Çift Araç Modeli İterasyon-Yüzey Basınçları Grafiği

Sonuç ve Bulgular

F1'de Türbülansın oluşmasının ana nedenlerinden biri, Formula 1 araçlarının şekil ve tasarımlarında yatan aerodinamik prensiplerdir. Bu araçlar, yüksek hızlarda optimize edilerek tasarlanır. Örneğin, kanatlar, hava kanalları ve difüzörler gibi aerodinamik bileşenler, aracın yol tutuşunu artırmak, sürüş performansını iyileştirmek için tasarlanmıştır. Ancak bu bileşenler, araçların arkasında türbülans oluşumuna neden olur. Aşağıda gösterilen şekilde aracın bileşenlerinin neden olduğu girdaplar açıkça görülebilmektedir.

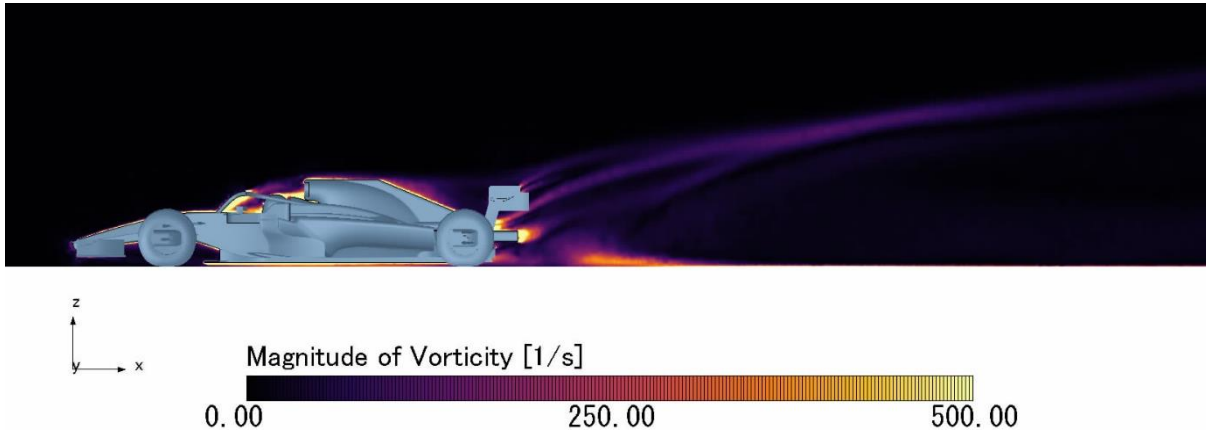


Şekil 21 Tek Araç Modeli Önden Görünüş Akış Çizgileri ve Hız Görüntüsü [6]

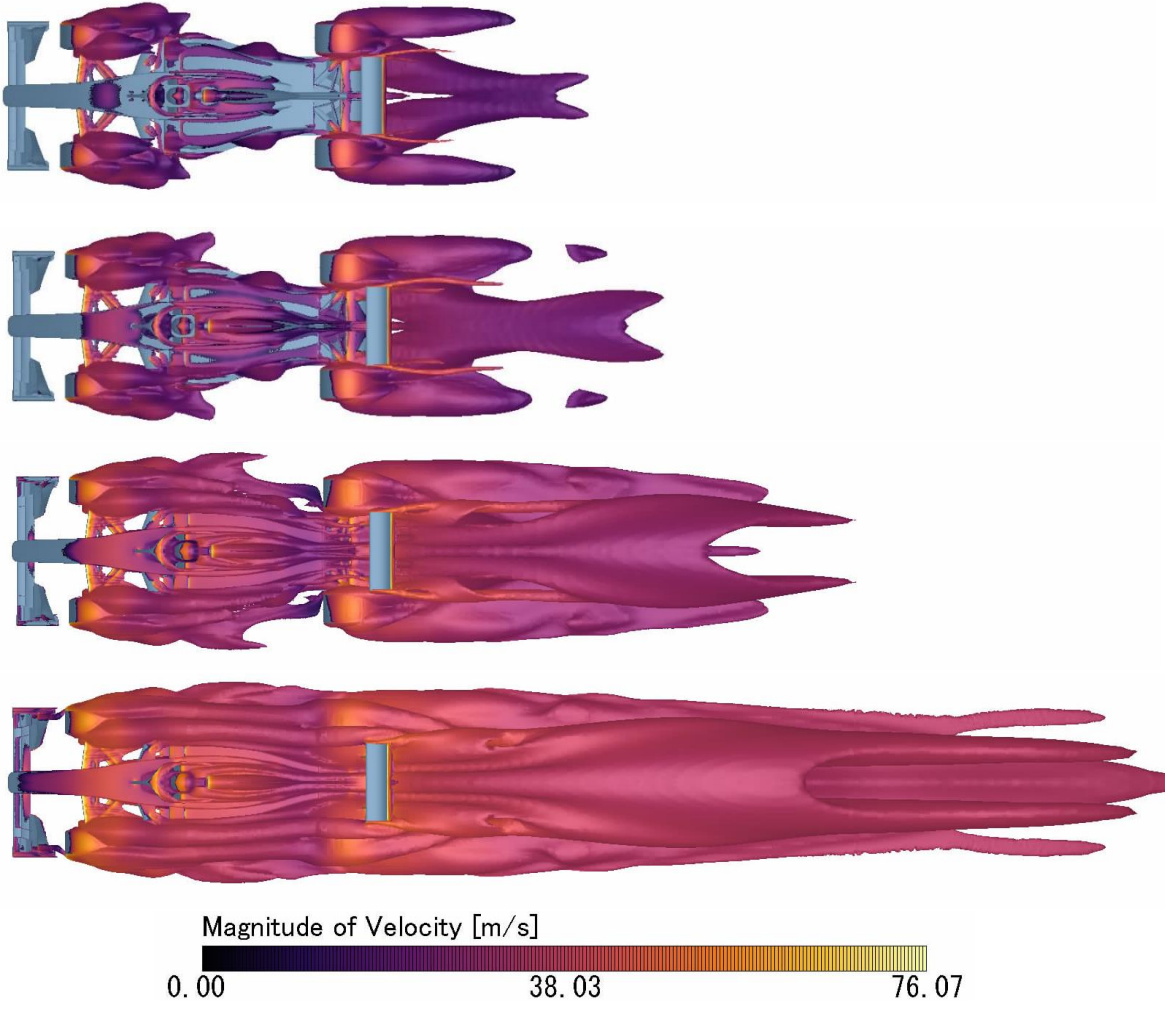


Şekil 22 Tek Araç Modeli Yandan Görünüş Araç Arkasında Oluşan Girdaplar ve Hız Görüntüsü

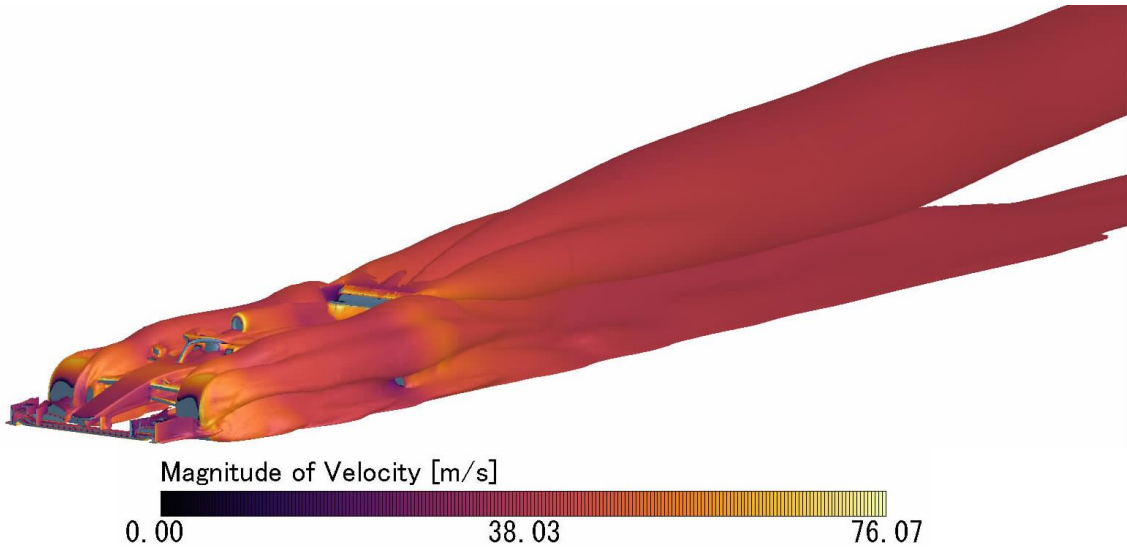
Oluşan girdapların başlıca nedeni, aracın arkasından ayrılan hava tabakasının yüksek hızlı ve düşük basınçlı bölgeye dönüşmesidir. Bu hızlı hava tabakası, arkadaki düşük basınç bölgesine doğru yönelirken, hava akımında dönüşlü hareketler ve girdaplar oluşur. Bu girdaplar, arkadaki hava akımının dönmesine ve dolaşmasına yol açar. Bu akışkanın araç gövdesiyle olan etkileşiminin bir sonucudur. Gövde üzerinde ve aracın arkasında girdap oluşumu gözlenebilmektedir.



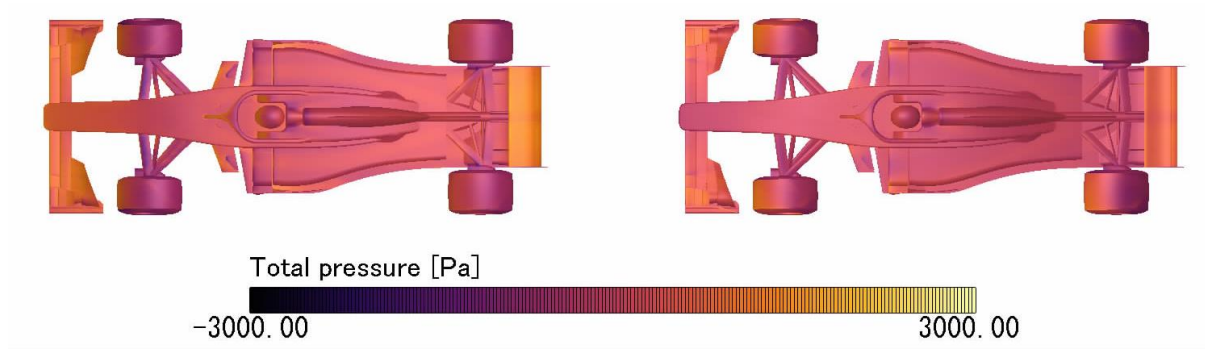
Şekil 23 Tek Araç Modeli Yandan Görünüş Araç Arkasında Oluşan Girdap Frekans Konturu



Şekil 24 Eş Toplam Basınç Yüzeyleri ve Hız Konturu Üstten Görünüş (yukarıdan aşağıya 100Pa, 250Pa, 500Pa, 1000Pa)

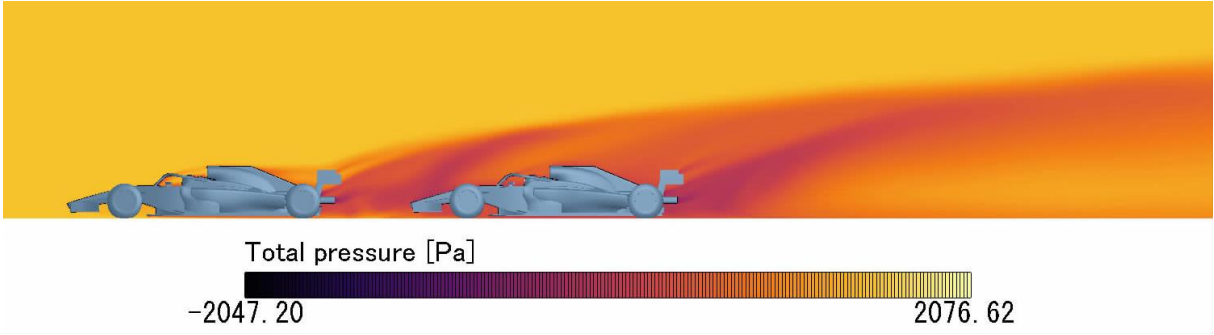


Şekil 25 Eş Toplam Basınç Yüzeyleri (1000Pa) ve Hız Konturu



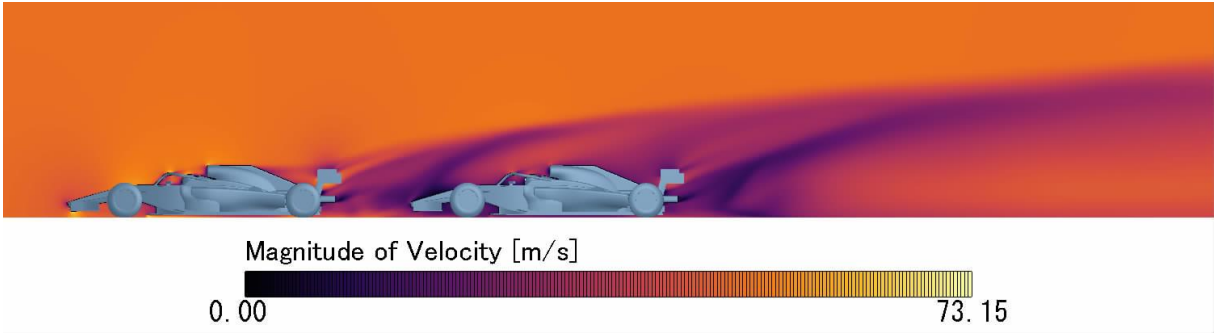
Şekil 26 Çift Araç Modeli, Gövdeler Üzerinde Oluşan Basınç Dağılım Konturu

Arkadaki aracın daha düşük basınca maruz kaldığı gözükmemektedir. Bu arkadaki aracın daha düşük basınç bölgesinde olmasından kaynaklanmaktadır. Aşağıdaki şekilde bu gözlemlenebilmektedir.

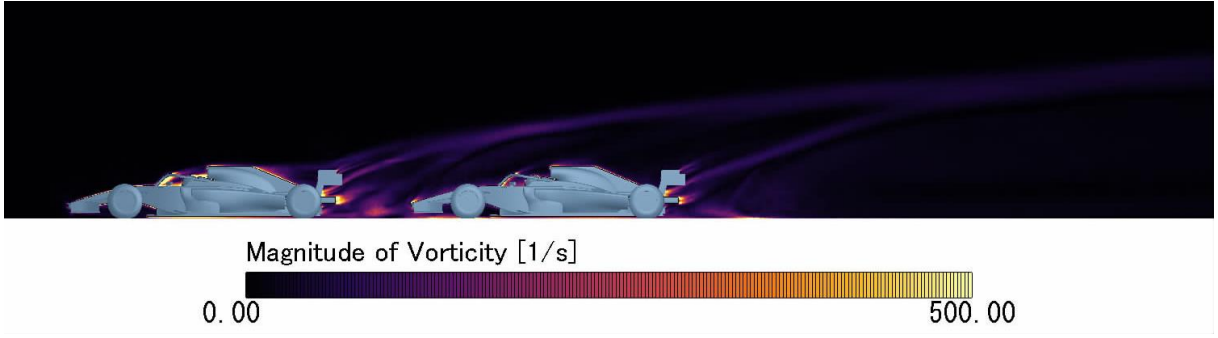


Şekil 27 Çift Araç Modeli, Toplam Basınç Dağılımı

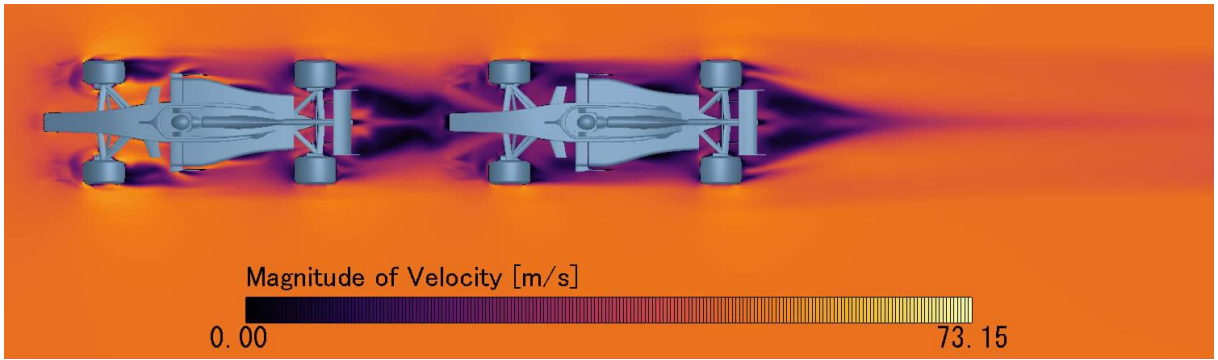
Bu alçak basınç bölgesinde olan arkadaki araç, daha düşük hava direnci ve daha düşük bir sürüklenme kuvvetine maruz kalır.



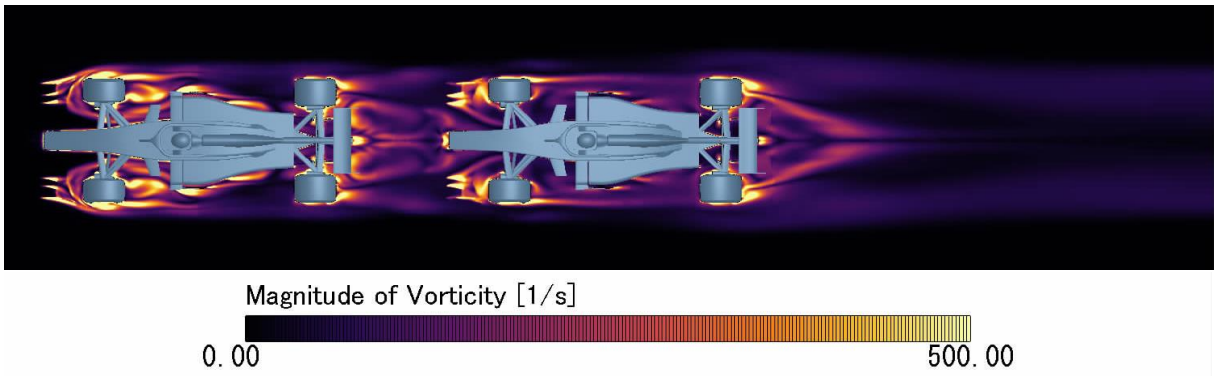
Şekil 28 Çift Araç Modeli, Hız Dağılımı



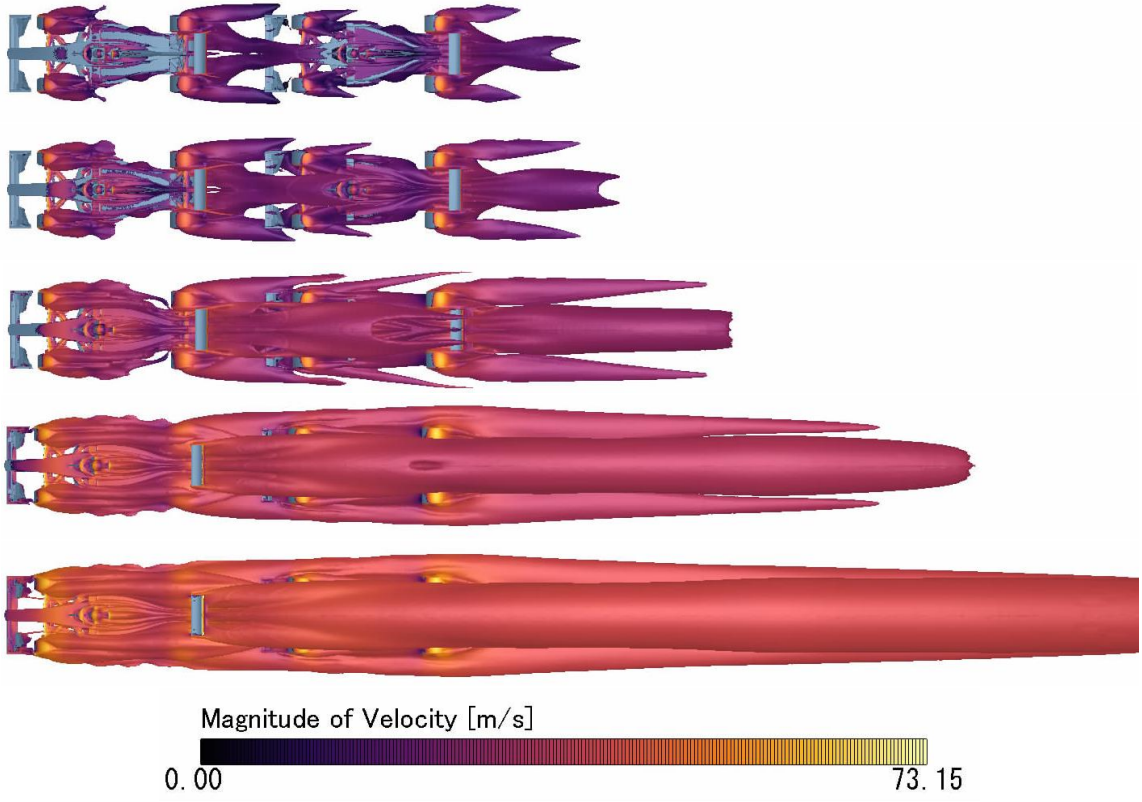
Şekil 29 Çift Araç Modeli Yandan Görünüş Araç Arkasında Oluşan Girdap Frekans Konturu



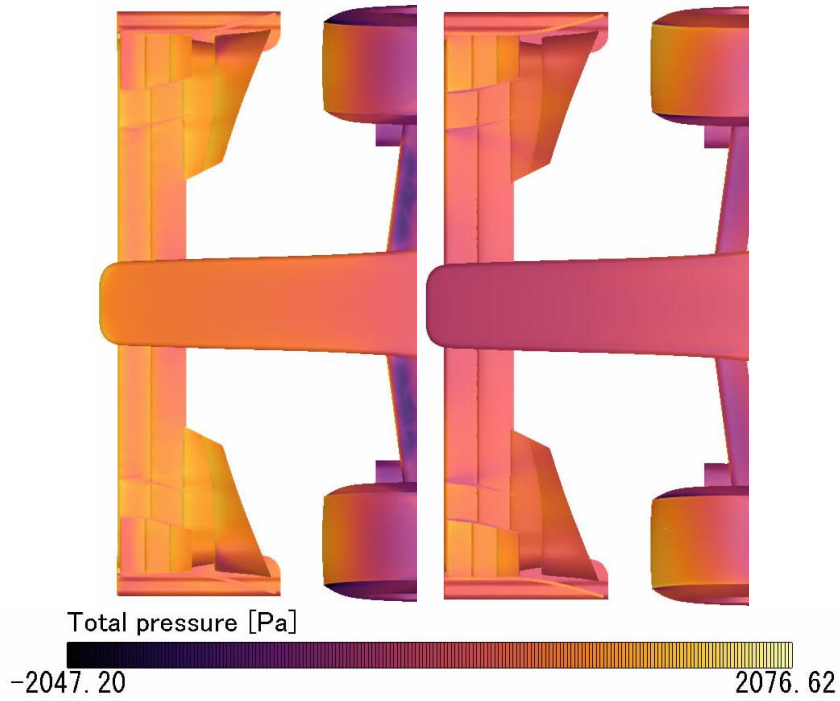
Şekil 30 Çift Araç Modeli Üstten Görünüş Hız Konturu



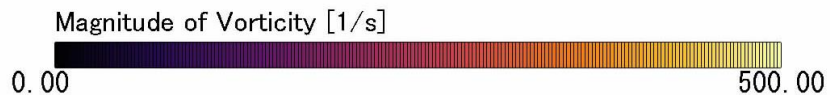
Şekil 31 Çift Araç Modeli Üstten Görünüş Girdap Frekans Konturu



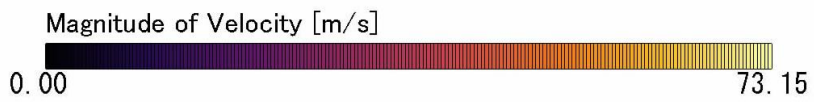
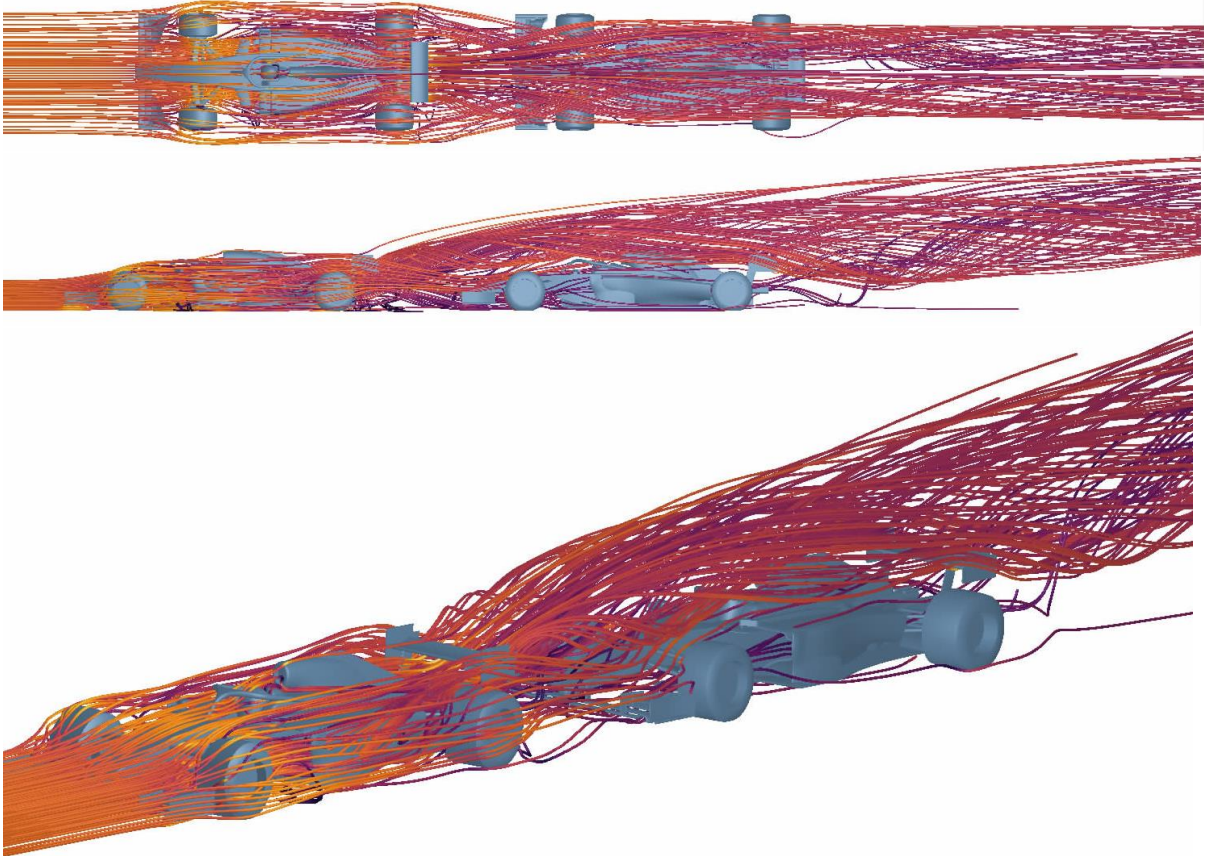
Şekil 32 Çift Araç Modeli Eş Toplam Basınç Yüzeyleri ve Hız Konturu Üstten Görünüş (yukarıdan aşağıya 100Pa, 250Pa, 500Pa, 1000Pa)



Şekil 33 Çift Araç Modeli, Ön kanatlar Üzerinde Oluşan Basınç Dağılımı (öndeki araç sol, arkadaki araç sağ)



Şekil 34 Çift Araç Modeli, Araçlar Arasındaki Girdap Etkileşimi, Girdap Frekans Konturu



Şekil 35 34 Çift Araç Modeli, Araçların Etkileşim Girdapları ve Hız Görüntüsü

Sonuç

	C_D	C_L	$\eta (C_L/C_D)$
Tek Araç Modeli	1.55	1.67	1.07
Çift Araç Modeli Öndeki Araç	1.46	1.60	1.09
Çift Araç Modeli Arkadaki Araç	1.00	0.74	0.74

Sonuç olarak, çift araç modelinde arkada giden aracın, dramatik bir şekilde sürüklenme kuvvetinin düştüğü görülmüş, önde giden aracın ise arkada giden araçtan da etkilenerek hem sürüklenme kuvvetinin düştüğü ama basma kuvvetinin aynı kaldığı görülmüştür. Aerodinamik verimlilik açısından önde giden aracın arkada giden araçtan görece etkilenmediği, ancak arkada giden aracın önde giden aracın etkilerinden dolayı sürüklenme kuvveti düşse de aerodinamik verimliliği de kayda değer şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak arkadaki aracın daha az enerji ile hareket edebilmesi mümkün olmuştur.

Bunun nedeni, alçak basınç alanının arka aracı etkili bir şekilde öne doğru çekerek" havada daha az dirençle yol almasını sağlamasıdır. Sonuç olarak, arkadaki araç daha yüksek hızlara ulaşabilir veya daha düşük motor gücüyle aynı hızı koruyabilir.

Sürücüler başka bir aracı yakından takip ederek sürüklenme kuvvetinin azalmasından faydalanabilir, bu da potansiyel olarak sollama yapmalarına veya düz bir hatta ani hızlanmalarda avantaj elde etmelerine olanak tanır. Formula 1 de dahil olmak üzere motor sporlarında yaygın olarak kullanılan bu teknik ile sürücüler bu aerodinamik etkiden yararlanmak için araçlarını stratejik olarak konumlandırırlar. Motor sporlarında bu stratejiye "drafting" denilmektedir.

Kaynakça

- [1] «2017 FORMULA ONE TECHNICAL REGULATIONS - FIA,» [Çevrimiçi]. Available: 2017 FORMULA ONE TECHNICAL REGULATIONS - FIA. [Erişildi: 2017].
- [2] J. Broniszewski ve J. Piechna, «. A fully coupled analysis of unsteady aerodynamics impact on vehicle dynamics,» Eng. Appl. Comput. Fluid Mech., 2019.
- [3] R. C. Alex Guerrero, Aerodynamic Study of the Wake Effects on a Formula 1 Car, MDPI, 5 Ocak 2020.
- [4] «cdf-online,» [Çevrimiçi]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity. [Erişildi: 23 Temmuz 2022].
- [5] F. Menter, M. Kuntz ve R. Langtry, Ten years of industrial experience with the SST turbulence model., Turbulent Heat Mass Transfer, 2003.
- [6] M. V. Dyke, An Album of Fluid Motion, The Parabolic Press, 1982.
- [7] «CFD Online. Turbulence Length Scale-CFD-Wiki,» [Çevrimiçi]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_length_scale.
- [8] M. Soso ve Wilson, «P. Aerodynamics of a wing in ground effect in generic racing car wake flows,» Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng., 2006.
- [9] M. Nakagawa, S. Kallweit, F. Michaux ve T. Hojo, «Typical velocity fields and vortical structures around,» SAE Int. J. Passeng., 2016.