# Formula 1 Araçlarının Aerodinamik Tasarımı

Gürkan Caner Birer [ *Bilgisayar Mühendisi*

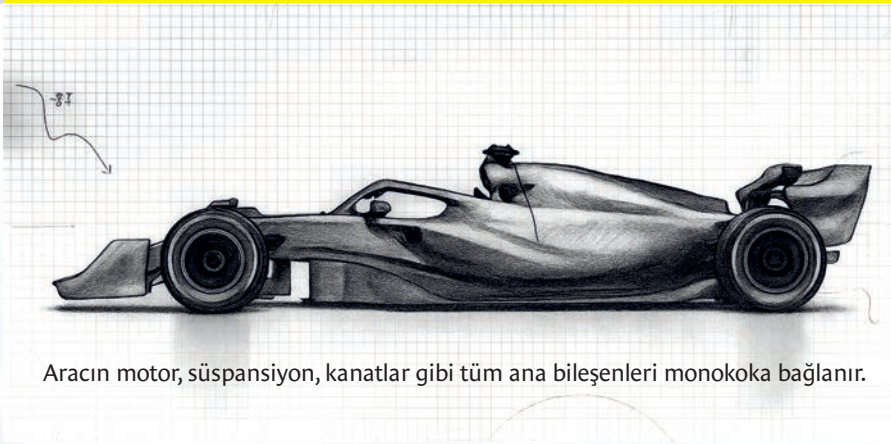
Formula 1, hızın ötesinde bir dünya. Her an, her vida, her karar büyük bir anlam taşıyor. Bu spor, bilim ve mühendisliğin dans ettiği bir sahne. Riskler devasa, hata payı ise yok denecek kadar az. İşte bu yüzden Formula 1, saatte 370 kilometre hızla mükemmelliği arayan eşsiz bir gösteri. Âdeta bir hız senfonisi! *Bilim ve Teknik* Mayıs 2025 sayısında Formula 1'in temellerini ve uygulanmaya başlanan bazı kural değişikliklerini ele almıştık. Haziran 2025 sayısında yayımlanan ikinci bölümde özellikle son dönemdeki yeniliklere ve Formula 1 arabalarını bu kadar özel kılan başlıca teknolojik gelişmelere odaklanmıştık. Formula 1 hız senfonisi yazı serisinin bu ayki bölümünde ise Formula 1 araçlarının tasarım, özellikle de aerodinamik tasarım detaylarını inceleyeceğiz.

daskul / iStock

Formula 1 araçlarının tasarımı, yüksek teknoloji ve mühendisliğin zirvesini temsil eder. Aracın tasarımı malzeme bilimi, aerodinamik ve yapısal mühendisliğin mükemmel bir kombinasyonudur. Gövdenin temelini oluşturan şasi, tek parça karbon fiber monokok yapıdadır ve sürücünün etrafında bir koruma hücresi görevi görür. Bu monokok sadece 35 kg ağırlığında, çelikten iki kat güçlü ve beş kat hafiftir. Çok katmanlı karbon fiber dokular ve bal peteği desenli takviyelerle elle üretilen monokok, yüksek hızlarda oluşan devasa aerodinamik yüklere ve çarpma anındaki şiddetli darbelere dayanacak şekilde tasarlanır. Örneğin Giancarlo Fisichella, 1997'de Silverstone'da 227 km/sa hızla kaza yapıp 0,72 saniyede durmasına rağmen sadece hafif bir sakatlıkla yürüyerek kurtuldu. 12 kat karbon fiber dokunun kat kat el ile yerleştirilip otoklavda pişirilmesiyle oluşan monokok şasisinin üretim maliyeti yaklaşık 700 bin dolar civarındadır.

Modern bir Formula 1 aracının gövdesi, karbon fiber kompozitlerin yanı sıra Zylon gibi özel malzemelerle de güçlendirilir. Aracın toplam ağırlığı (sürücü dahil, yakıt hariç) 798 kg civarındadır. Takımlar bu sınırı yakalamaya çalışır. Minimumun altına inebilirlerse şasiye stratejik konumlarda balast ekleyerek ağırlık dağılımını mükemmelleştirirler. 2022'de değişen kurallarla araçlar tarihin en ağır Formula 1 araçları oldu ve çoğu takım minimum 795-798 kg sınırının üstünde kaldı, Alfa Romeo ise sınırı tutturabilen tek ekipti.

"Halo" kokpit koruması yaklaşık 7 kg'dır ve minimum ağırlık sınırını yükseltmiştir.



Aracın motor, süspansiyon, kanatlar gibi tüm ana bileşenleri monokoka bağlanır.

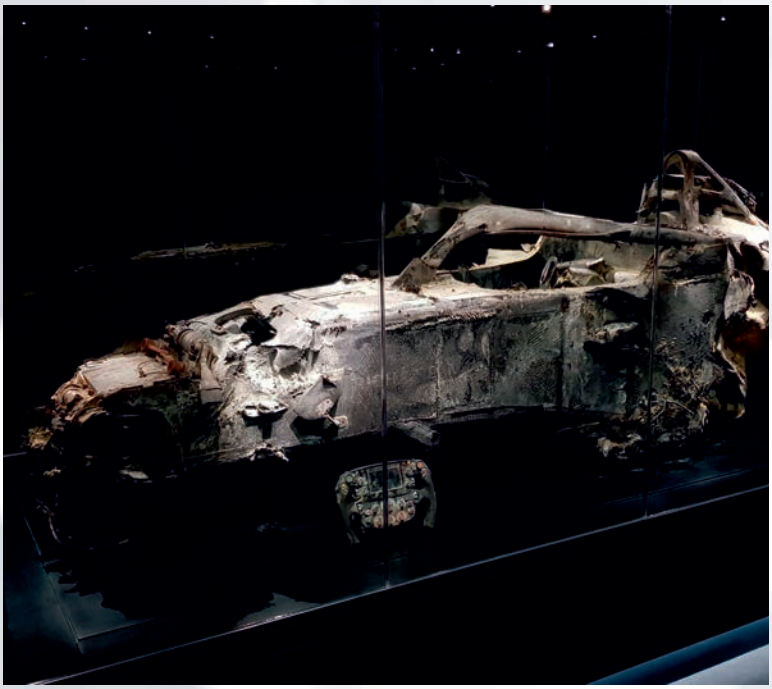
Formula 1 mühendisleri, aracın ağırlık merkezini olabildiğince aşağı çekmek ve ideal dengeyi yakalamak için her parçayı hassas biçimde konumlandırır. Örneğin motor ve şanzıman sadece güç aktarmakla kalmaz aynı zamanda şasiye entegre taşıyıcı yapının bir parçasıdır. Süspansiyon kolları ve dikmeler gibi elemanlar da titanyum ve karbon fiber gibi malzemelerle üretilerek hem hafiflik hem dayanıklılık sağlanır. Günümüz araçlarının aerodinamik tasarımı da şasiyle bütünleşiktir: Burun yapısından yan pontonlara kadar her kısım rüzgâr tüneli verilerine göre şekillendirilir.

Tasarım sürecinde bilgisayar destekli mühendislik büyük rol oynar. Takımlar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve sonlu eleman analizleri ile parçaları sanal ortamda test edip optimize eder. Hatta üç boyutlu (3D) yazıcılar sayesinde rüzgâr tüneli modelleri ve prototip parçalar hızlıca üretilip denenir.

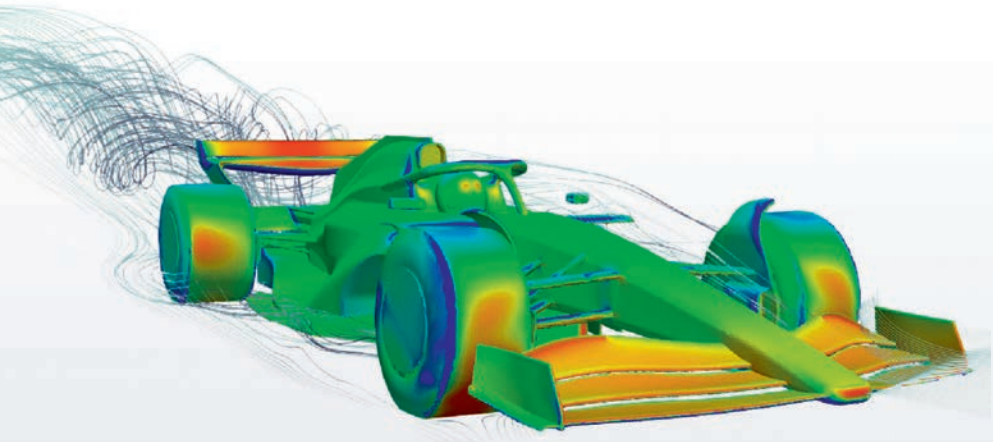
Örneğin McLaren, yılda 9000'den fazla parçayı 3D yazıcılarla üreterek tasarım döngüsünü hızlandırmakta. Bu hızlı prototipleme, yeniliklerin pistte veya tünelde vakit kaybetmeden sınanmasına olanak tanır.

Üç boyutlu yazıcılarla parçaların üretimini gösteren bir videoyu izlemek için https://youtu.be/dSgJ9Hp7Wnw adresini ziyaret edebilir veya aşağıdaki kare kodu akıllı cihazınıza okutabilirsiniz.

Lazer tarayıcılarla parçaların üç boyutlu modellerinin çıkarılmasını gösteren bir videoyu izlemek için https://youtu.be/I5EwsQHpZYw adresini ziyaret edebilir veya aşağıdaki kare kodu akıllı cihazınıza okutabilirsiniz.

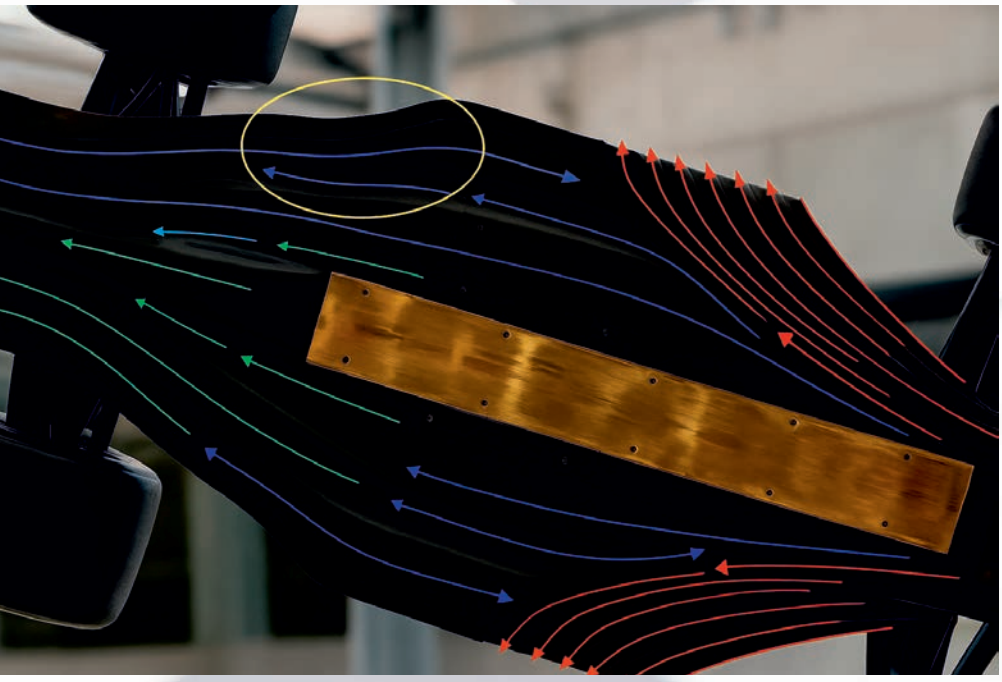


2020 Bahreyn Grand Prixde Romain Grosjean'ın bariyerlere şiddetle çarpıp alevler içinden çıkabilmesinde monokok yapının büyük rolü vardı. Araçtan geriye kalanlar müzede sergileniyor.



# Aerodinamik

Bir Formula 1 aracı, hızını ve yol tutuşunu büyük ölçüde aerodinamik tasarımına borçludur. Aşağı basma kuvveti (downforce) sayesinde Formula 1 araçları âdeta pistlere yapışır ve yüksek hızda dahi virajları inanılmaz süratlerle dönebilir. Modern bir Formula 1 aracı, maksimum hızda yaklaşık 5G'lik bir basma kuvveti üretebilir. Yani kendi ağırlığının 5 katı kadar bir kuvvetle yere basar. Bu muazzam aerodinamik tutuş sayesinde tavan düz gidecek kadar (teoride tavana yapışabilecek kadar) yere basma kuvvetine ulaşılır. Kanatlar ve gövde şekilleri uçak kanadının tersine çalışarak aracın üzerine doğru kuvvet uygular. Böylece lastiklere binen yük artar ve mekanik tutuş yükselir. Bir Formula 1 aracının performansının büyük bölümü ürettiği basma kuvvetine bağlıdır. Nitekim karmaşık ön kanat tasarımlarının amacı bu kuvveti maksimize etmektir.



Aracın tabanında Venturi tünelleri olarak bilinen oyuklar hava akışını yönlendirir

Aerodinamik tasarım, sadece maksimum aşağı basma değil aynı zamanda sürüklenme direnci (drag) ile mücadeleyi de içerir. Mühendisler, yüksek hızda aracı yavaşlatan hava direncini azaltırken virajlarda yere basma kuvvetini artırma arasında ince bir denge kurar. Bu nedenle araçlar pistten piste farklı aero ayarlarla kullanılır. Uzun düzlükleri olan Monza gibi pistlerde daha düşük kanat açıları (düşük aşağı basma, düşük drag), bol virajlı Monaco gibi yerlerde ise yüksek kanat açıları tercih edilir. Ayrıca DRS (Drag Reduction System) gibi yenilikler düzlüklere çıkıldığında arka kanadı açarak geçici olarak sürüklenme direncini düşürüp hız kazandırmak için tasarlanmıştır.

2022 sezonunda yürürlüğe giren yeni aero kuralları, yer etkisi (ground effect) denilen prensibi ön plana çıkarmış ve araç

tabanını basma gücü üretiminin merkezine koymuştur. Araçların tabanındaki Venturi tünelleri ve geniş difüzörler, bir "ters kanat" gibi çalışarak aracın altındaki havayı hızlandırıp basıncını düşürür. Bu sayede önden akan hava, büyük oranda aracın altında yüksek basma gücü üreterek geçer. Ancak 2022'de bu radikal değişiklik beklenmedik bir etki doğurdu: Zıplama (porpoising) adı verilen yüksek hızda aracın yaylanıp sekme sorunu. Birçok takım, özellikle sezon başında bu dalgalanmayı azaltmak için araç yüksekliklerini ve süspansiyon sertliklerini ayarlamak zorunda kaldı. Sezon ilerledikçe aerodinamik iyileştirmelerle bu sorun büyük ölçüde çözüldü.

Aerodinamik geliştirme, Formula 1'de bitmek bilmeyen bir yarıştır. Takımlar her yarışta neredeyse yeni bir kanat veya yeni bir gövde detayı ile gelir. 2017'de değişen kurallarla ön ve arka kanatlar daha karmaşık çok elemanlı yapılar hâline gelmişti ve bu parçaların tasarımı küçük bir ekip için bile milyonlarca dolar tutan bir Ar-Ge alanıydı. 2022'de kurallar sadelik yönünde değiştirilip kanatlarda "süpürgelik" ve karmaşık parça sayısı azaltılsa da takımlar yine yaratıcılıklarını konuşturarak çeşitli çözümler buldular. Örneğin

Rüzgâr tüneli

bazı araçlar, ön burnunda hava kanalı (S-duct) kullanarak akışı yönetirken bazıları yan ponton tasarımında devrimsel yaklaşımlar denedi. Aston Martin'in 2025 aracı AMR25'in aerodinamik yüzeylerinin %90'ından fazlası bir önceki yıla göre yenidir. Burun, kanatlar, yan ponton ve taban tasarımında kapsamlı değişiklikler yapılmıştır.

Rüzgâr tünelleri ve sayısal akış simülasyonları (CFD), aero tasarımın bel kemiğidir. Takımlar, %60 ölçekli modelleri rüzgâr tünellerinde test ederek kanat profillerini, difüzör ve yan etek şekillerini optimize eder. Geçmişte büyük takımlar, tünellerini 7/24 çalıştırıp binlerce saat test yapabilirken günümüzde rekabeti dengelemek için aerodinamik test kapasitesini kullanım hakkına sıkı kısıtlamalar getirilmiştir. Örneğin 2021'den itibaren yürürlüğe giren Aerodinamik Test Kısıtlaması ile şampiyonada üst sıralardaki ekiplere rüzgâr tüneli testleri için verilen süre azaltılırken alt sıralardakilere daha fazla hak tanınmıştır. Bu sayede şampiyonada alt sıralarda yer alan takımlara araçlarını geliştirme fırsatı verilir. Bir Formula 1 aracının her yarış öncesinde 100'den fazla farklı aerodinamik ayar simülasyonlarda test edilir, ancak bunlardan yalnızca birkaç tanesi pistte kullanılmak üzere seçilir.

Flo-vis, hava akışının aracı nasıl etkilediğini anlamak için kullanılan bir" tür boya. Antrenman turlarında araca sürülür ve sonrasında kızılötesi ışık kullanılarak ayrıntılı şekilde fotoğraflanır.

Aerodinamik kafes, metal bir çerçeveye yerleştirilmiş çok sayıda pitot tüpünden (havanın akış hızını ölçmeye yarayan cihaz) oluşur. Takımlar, bu tür cihazları kullanarak pist testlerinde hava akışının ayrıntılı ölçümlerini yapar. Elde edilen veriler, rüzgâr tüneli ve CFD simülasyonlarının sonuçlarıyla karşılaştırılarak simülasyonlarda kullanılan aerodinamik modellerin doğruluğu geliştirilir. Bu sayede yüksek hızda aracın etrafındaki hava akımı optimize edilerek daha fazla yere basma kuvveti elde etmek ve araca etki eden sürüklenme kuvvetini azaltmak mümkün olur.

Rüzgâr tüneli testleri dışında hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonları da aerodinamik tasarımların geliştirilmesinde kritik rol oynar. Günümüzdeki takımlar, süper bilgisayarları kullanarak saniyede milyonlarca hesaplama yaparak aracın etrafındaki hava akımını son derece ayrıntılı biçimde simüle edebilir. Bu simülasyonlar, aracın etrafındaki hava akışını dijital ortamda görselleştirip kanat veya gövde tasarımında yapılması

planlanan değişikliklerinin etkisinin, üretimden önce tahmin edilmesini sağlar. Elbette simülasyonlar gerçek testlerin yerini tutmaz. Bu yüzden pist üzerinde flow-vis boyası veya aerodinamik kafes (aerodynamic rake) gibi yöntemlerle veri toplanır. Takımlar, antrenman turlarında araçların üzerine floresans yaparak yeşil ışık yayan bir boya sürerek hava akımının aracın etrafında nasıl ilerlediğini gözlemler veya aracın arkasına, havanın akış hızını ölçen sensörlerden oluşan bir aerodinamik kafes takarak hava akış hızının aracın farklı noktalarındaki dağılımını belirler.

Formula 1 araçlarında aerodinamik açıdan geçmişten günümüze büyük ilerlemeler kaydedildi. 1970'lerin sonunda Lotus 79 gibi araçlar, aracın altındaki hava basıncını düşürerek yol tutuşunu önemli ölçüde artımış ve bu tasarım Mario Andretti'ye şampiyonluğu kazandırmıştı. Yer etkisini maksimuma çıkarmayı amaçlayan tasarımlar 1980'lerde güvenlik nedeniyle yasaklansa da bu prensip 2022'de yeni tasarımlarla yeniden uygulanmaya başlandı. Günümüzde bir Formula 1 aracının tabanı, yere basma kuvvetinin büyük kısmını üretirken ön ve arka kanatlar, aracın etrafındaki hava akımını yönlendirerek aerodinamik dengeyi sağlamaya yardımcı olur. Bir arka kanat, küçük boyutuna rağmen
8 farklı parçadan meydana gelebilir ve maliyeti
150 bin dolara ulaşabilir.

Formula 1'de aerodinamik, hızın ardındaki kilit etkendir. Ön kanattan difüzöre kadar aracın her yüzeyi hava ile etkileşime girerek aracın yere dayha iyi tutunmasını sağlamak ve araca etki eden sürüklenme kuvvetini azaltmak için tasarlanır. Doğru aerodinamik denge,

virajlarda kazanılan saniyeler ve düzlüklerde ulaşılan hızda 20-30 km/sa artış anlamına gelir. Bu nedenle takımlar için aerodinamik geliştirme yarışı, pistteki yarış kadar çekişmeli ve sürekli bir mücadeledir.

Formula 1 yazı serisinin önümüzdeki ay yayımlanacak dördüncü bölümünde, modern Formula 1 araçlarının güç üniteleri ve lastiklerinin yanı sıra pit stop stratejilerinin ve mekanik ekiplerin rolünü ele alacağız. ■

**Kaynaklar**


• Motor Sport Magazine – "How much does an F1 car cost?", şasi ağırlığı ve malzeme bilgisi, https://bit.ly/3F9P0gI
• F1 Chronicle – "What is a Monocoque?", monokok üretimi ve kaza örneği, https://bit.ly/3FbAxRo
• Aston Martin AMR25 teknik özellikleri, 2025 şasi ve ağırlık verileri, https://bit.ly/3FeKs8R
• Motorsport.com – "How much does an F1 car weigh in 2023?", Halo ve ağırlık artışı bilgisi, https://bit.ly/3QRZlQX
• 3Dnatives – "What Role Does 3D Printing Play in Formula 1?", 3B baskı ile parça üretim rakamları, https://bit.ly/4hmvf2S
• National World – "How much downforce can an F1 car produce?", modern F1 downforce ~5g bilgisi, https://bit.ly/3QUUL4u
• Wikipedia – "Downforce", aşağı basma kuvvetinin prensipleri ve etkisi, https://en.wikipedia.org/wiki/Downforce
• RacingNews365 – "Aerodynamics in F1", zemin etkisi taban (floor) işlevi ve porpoising açıklaması, https://bit.ly/3QVo9aM
• Formula1.com – "Sliding scale aero testing", rüzgâr tüneli kısıtlamaları ve yüzde değerleri, https://bit.ly/4byV52k

Ingram Publishing / Alamy