

## TAŞIT TASARIMINDA HAD KULLANILABİLİRLİĞİ

**Hayrettin YÜKSEL**

[hyuksel@balikesir.edu.tr](mailto:hyuksel@balikesir.edu.tr) Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 10145-Balıkesir

### ÖZET

Günümüzde motorlu taşıtların daha aerodinamik bir yapıda olması isteği, taşıtın ön ve arka projeksiyon alanı formlarında aerodinamik tasarım çalışmalarının önemini arttırmıştır. Taşıt seyrinde ortaya çıkan türbülanslı hava hareketinin taşıtın geometrik yapısı ile ilişkisi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tekniği yardımıyla bir test modeli üzerinde incelenmiştir. Bu çalışmada teorik HAD hesaplama tekniği ile rüzgar tünelineki deneysel araştırmalar karşılaştırıldı. Teorik HAD' ın gerçeğe yakın sonuçları daha hızlı bir şekilde verdiği görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Otomobil, türbülans, modelleme, aerodinamik tasarım, HAD

### ABSTRACT

Nowadays, demand for more aerodynamic cars focused the studies on improved back and front profiles of the vehicles. The turbulent movement of air flow around the car profile was investigated by using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique on a test model. In this study, the theoretical CFD technique is compared with experimental air tunnel tests. It was shown that theoretical CFD technique produced nearly realistic results in a faster way.

**Keywords:** Car, turbulence, modeling, aerodynamic design, CFD

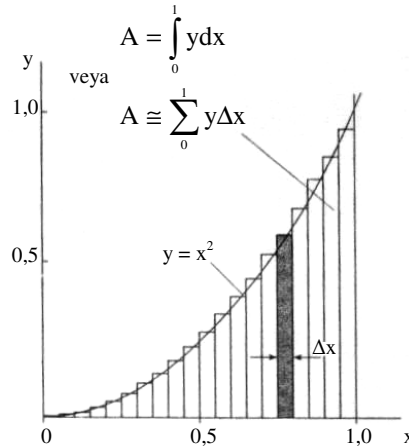
### 1. GİRİŞ

Motorlu taşıtlarda aerodinamik kuvvetlerin hesaplamaları mühendislerin çokça hesapladıkları yapısal gerilmeler ve deformasyonlar gibi son zamanlarda oldukça ilgi odağı olmuştur. İkinci Dünya Savaşı'nın patlak vermesiyle hava taşıtları çevresindeki akışların analizinde dikkate değer önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Fakat kara taşıtları hava taşıtlarına göre daha karmaşık bir akış yapısı içerir. Bunun nedeni iki hava akış tipi arasında iki büyük önemli farkın olmasıdır. Birincisi hava taşıtındaki akışların tamamen yüzeyin büyük bir kısmına etkimesi, ikincisi ise akışların ya simetrik eksenli oluşu, yani büyük bir yolcu uçağının silindirik gövdesindeki gibi, ya da hemen hemen iki boyutlu

kanat ve kuyruk yüzeylerinin genelindeki gibi olmaya meyilli oluşudur. Motorlu taşıtlarda, akışlar üç boyutludur ve akış alanı ayrılma etkilerinin hâkimiyeti altındadır. Bu faktörler, uçaklara uygulanan basitleştirilmiş kabullerin pek çoğunun kara taşıtlarına uygulanmasını engellemektedir. Bu zorluklar bilgisayar destekli Akışkanlar Dinamiği Metodlar'ın gelişmesiyle kolaylaşmıştır [1].

Bir taşıttaki aerodinamik kuvvetleri saptamak için, öncelikle yüzey çevresindeki basınç ve akış hızlarını hesaplamak gerekir. Bu hesaplama bir akışkanın hareket denklemleri kullanılarak yapılabilir. Bunlar genellikle bir dizi kısmi diferansiyel denklem takımı şeklinde ifade edilirler. Havacılık uygulamaları için geliştirilmiş önceki analiz yöntemleri, üretilen denklemlerin varsayımları basitleştirilen, basit gövde dış hatlarını içeren ve sadece aerofoil formlar içeren belli başlı şekillere uygulanabilen yöntemlerdir. Bunun yanında bilgisayarlar sayesinde akışkanlar dinamiği problemlerinin sayısal olarak çözülmesi konusu da gelişmiş ve yaygınlaşmıştır. Sayısal yöntemlerin kullanılması ile analitik olarak çözülemeyen diferansiyel denklemler, sayısal olarak çözülmekte ve çeşitli durumlar için detaylı incelemeler yapılabilmektedir [1,9].

Analitik ve sayısal çözüm arasındaki farka bir örnek Şekil 1'de grafikte gösterilmiştir;  $y = x^2$  gibi basit bir ilişkiyi takip eden bir çizginin altındaki alanı bulma problemi göz önüne alınırsa, burada alan analitik bir yöntemle tanımlanabilir; yani  $x^2$  uygun limitlerde entegre edilir, örnekte sınırlar 0 ile 1'dir ve sonuç  $1/3$  birim<sup>2</sup>'dir.

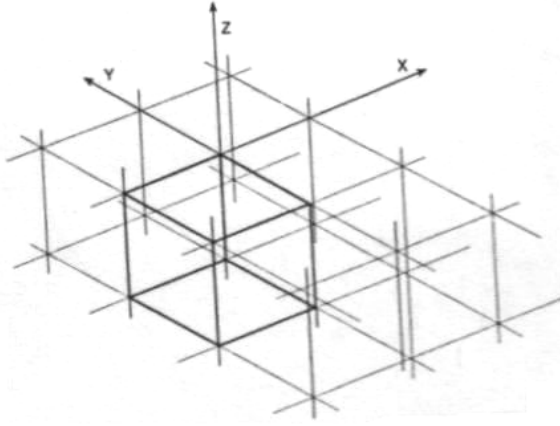


Şekil 1:  $x = 0$  ve  $x = 1$  Sınır Değerlerinde, Çizgi Altındaki Alan Tanımlama Probleminin Analitik ve Sayısal Çözümleri

Alternatif sayısal yaklaşım, eğri altındaki alanı dar dikdörtgenlere bölmek ve her birinin yüksekliğini bulup eni ile çarparak alanı ifade etmek şeklindedir. Tayin edilen sınırlar arasındaki eğrinin altında kalan toplam alan, tüm dikdörtgenlerin alanları toplanarak bulunur. Bu yöntem tam olarak  $1/3$  cevabını vermeyecektir. Fakat her dikdörtgenin ebadını küçülte küçülte doğruluk belli bir  $\epsilon$  mertebesine düşünceye kadar artırılabilir. Bir taşıttın ana hatları gibi daha karmaşık hale gelen bir eğri durumunda, çizgiyi tam olarak veren matematiksel bir ifadeyi bulmak mümkün olmayabilir, işte bu durumda sayısal yaklaşım gerekir [1].

## 2. NAVIER–STOKES DENKLEMLERİ

Uygulamada kullanılmakta olan akışkan hareketi denklemlerinden en geneli “Navier–Stokes” denklemleridir. Bu denklemler içerisinde, türbülans dolayısıyla ortaya çıkan yeni ek gerilme terimleri yer alır, bunlar üç boyutlu eksen takımında basınç, momentum ve viskoz kuvvetler arasındaki ilişkiyi verir. Buna ilaveten bir yerin içine ve dışına doğru akan akışkan miktarları arasında dengeyi sağlayan süreklilik denklemi ve enerjinin değişik formları arasındaki dönüşümü ile ilgili bir enerji denklemi bulunmaktadır. Akım boyunca akışkan, potansiyel, kinetik v.s. bu üç denklem dizisi bir araya getirilince herhangi bir formun etrafındaki akışın herhangi bir yerindeki basınç ve hızlarının tanımlanabilme imkânını sağlar. Karayolu taşıtları için sıkışabilirliğin etkileri (hava yoğunluğu değişimi) ihmal edilebilir, dolayısıyla enerji denklemine ihtiyaç yoktur ve “Navier–Stokes” denklemlerinin basitleştirilmiş “sıkıştırılmaz” versiyonu kullanılır. Bu denklemleri kullanmak için Şekil 2’de görüldüğü gibi akış alanı üç boyutlu bir kafes (ızgara) şeklindeki hücrelere bölünür ve her hücrenin köşesinde veya merkezinde hız, v.b. farklı değişkenlerin değerleri tanımlanır [8].



Şekil 2: Küp Şeklindeki Blokların Kullanıldığı Basit Bir Üç Boyutlu Kafes (Izgara) Sistemi

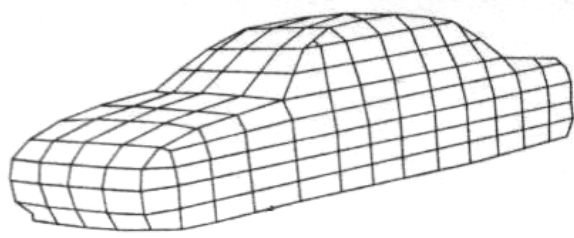
Bir taşıt etrafındaki akışı çözmek ve en küçük türbülans hareketlerin etkisini bulmak için  $10^{18}$  noktali bir kafes gerekeceği yaklaşık olarak hesaplanmıştır. 1990 yılların ortalarına kadar kontrol edilebilen en yüksek kafes nokta sayısı yaklaşık  $10^6$  idi. Bu yüzden taşıt aerodinamiğinde Navier–Stokes denklemlerinin doğrudan sayısal çözümü (DNS) yakın gelecekte gerçekçi değildir. Günümüzde bu teknik, sadece düz bir levha üzerindeki akış gibi çok basit durumlarda kullanılabilir [9].

## 3. SADELEŞTİRME: TÜRBÜLANS VE SINIR TABAKA MODELLEMELERİ

Hesaplama problemi kurtulmak için, bazı mantıklı tahminler ya da yaklaşımlar yaparak denklemleri basitleştirmek gerekir. Bu yollardan biri türbülans hareketini ifade eden terimlerin basitleştirilmesidir. Bu amaçla bir türbülans modeli kullanılır. Model sadece enerjinin akışkan boyunda taşındığı ve harcandığı, oran gibi türbülansın önemli istatistiksel ortalamalı büyüklüklerin etkilerini göz önünde bulundurur [3]. Türbülans modellemesinde; ek gerilme terimlerinin yeni bağıntılar ile tanımlanması sonucunda, türbülans kinetik enerjisi, bu enerjinin yutulma miktarı gibi bazı yeni büyüklükler ortaya çıkar. Bu büyüklüklerin ortaya çıkması yeni denklemlerin oluşturulmasını gerektirir. Bu şekilde üretilen yeni değişkenler ve denklem sayısının eşitlenmesi işlemi “kapatma” olarak

adlandırılır. Günümüzde bilinen bütün türbülans modellerinin geçerli olduğu akış koşulları ve türleri birbirinden farklıdır ve bütün koşullar için geçerli olan bir türbülans modeli henüz geliştirilememiştir. Bir türbülans modelinin geçerliliği; belirli bir problem için yapılan sayısal hesaplama sonuçları ile deneysel ölçümler karşılaştırılarak anlaşılır [10].

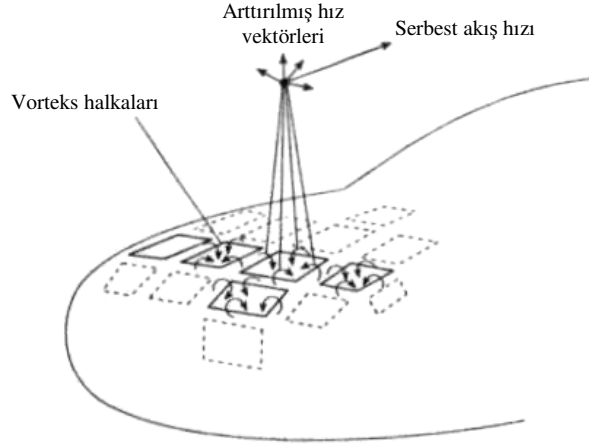
Hareket denklemlerinde sadeleştirmenin yaygın bir şekli potansiyel akış olarak bilinir. Potansiyel akış denklemleri bazı özel durumlar için analitik denklemleri olarak çözülebilir. Fakat mühendislik amaçları için hakkıyla çözülebilen akış problemleri; çeşidi yine bilgisayarlarla genişletilmiştir. Potansiyel akış denklemini kullanan yöntemler, Navier–Stokes veya Euler denklemlerinden birini kullananlara göre çok daha az hesaplama kapasitesi ve hız gerektirir. Ayrıca potansiyel akış yöntemlerinde denklemleri sadece gövde yüzeyindeki noktaların şemalaştırılması ile kafes tipinde tamamlamak gerekir, bu yüzden ihtiyaç duyulan kafes (ızgara), Şekil 3’te görüldüğü gibi yüzeyi kaplayan sadece iki boyutlu bir ağıdır. Bu basit ağ, üç boyutlu bir kafes gerektiren yöntemlerle kıyaslandığında hesaplama yükünü önemli derecede azaltır.



Şekil 3: Potansiyel Akış Paneli Yöntemlerinde İki Boyutlu Bir Ağ Yüzeyin Üzerine Örtülür

### 3.1. Panel Yöntemleri

Potansiyel akış çözüm yöntemlerinin çoğu geniş bir hayali akış elemanlar dizisini kullanır. Bu elemanlar ağ hücrelerinin kenarlarına veya merkezlerine etki ettiği düşünülür. Elemanlar yüzeyin panellerine veya sınır kafesine uygulandığı için bu teknikler, panel veya sınırlayıcı eleman yöntemleri şeklinde adlandırılır. Şekil 4’te girdap halkaları kullanan bir panel yöntemi için yüzey kafesi (ızgarası) görülmektedir. Halkalar kabaca dikdörtgenseldirler. Girdap halkalarının her bir parçası, herhangi bir noktadaki akış hızında küçük bir artışına sebep olmaktadır. Sayısal çözüm, girdap güçlerini yok etmek için geniş bir dizi eşzamanlı denklemleri çözmeyi içerir. Bu işlem bilgisayar tarafından oldukça hızlı yapılabilir, hız ve basıncı sadece yüzeyde değil, akış alanının herhangi bir noktasında da hesaplamak mümkündür [8].



Şekil 4: Girdap Halkalı Bir Panel Yöntemi. Yüzey hayali girdap halkalarının bir kafesiyle örtülür. Uzaydaki herhangi bir noktada hız, serbest akış hızı ile tüm vorteks halkaların her parçası tarafından arttırılmış hız bileşenlerinin bileşkesidir.

Stafford, taşıt şeklindeki bir gövdenin çevresindeki akışı çözmek için girdap elemanlı bir yöntemin kullanımını önermiştir. Sonuç olarak, taşıtın ön cephesindeki basınç dağılımı deneysel ölçümler ile iyi bir uyum göstermiştir. Taşıtın bu geniş motor kaputu, sağ-sol çamurluklar, ön cam ve yan direklerinin birleştiği bölgelerinde potansiyel akış denklemlerinin iyi sonuçlar vermesi beklenir. Çünkü türbülans ve viskozite etkisi azdır. Panel yöntemleri ile ön camın gövdeye birleştiği kısımda oluşan akış için dengeli ayrılmış akış alanların doğrudan tahmini yapılmakta, ancak bunlar akış sahasını kuvvetli bir şekilde etkilememektedir. Bununla birlikte taşıtın arka kısmında akış bir iz idaresi altındadır; bu izde potansiyel akış denklemleri uygulanamamakta, çünkü akış rotasyoneldir ve viskozite etkileri önemlidir. Bundan kurtulmanın yolu, izin şeklini tahmin etmek ve bunu aynı şeklin hayali bir katı gövdesi olarak yerine koymaktır. Sınır tabakasının bazı önemli derecedeki etkilerine, taşıt gövdesi; karoser arkaya doğru az kalınlaştırılarak yaklaşılır [7]. Panel yönteminin asıl dezavantajı; taşıtın arka bölümünde oluşan iz akışının modellenemeyip sadece katı bir tabaka ile değiştirilmesinden dolayı arka projeksiyon formundaki basıncın doğru olarak belirlenememesidir. Bu da en önemli niceliğin, sürüklenmenin, yani itme kuvvetinin, güvenilir bir biçimde tahmin edilemeyeceği anlamına gelir [8].

#### 4. GÜNÜMÜZ TAŞIT TASARIMINDA NAVIER-STOKES ÇÖZÜCÜLERİ

Akışların kompleksliği ve mevcut kuvvet yöntemlerindeki bazı sınırlamalar günümüzde türbülans modelli Navier-Stokes denklemlerinin kullanılabilirliğini cazip hale getirmiştir. Navier-Stokes denklemlerinin kullanıldığı pek çok farklı program paketi vardır; bu paketler ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ticari paketler; taşıtı ve kafes geometrisini tanımlamaya yardımcı olacak yüklemeleri bulundurma avantajına sahiptir. Ayrıca grafiksel çıktı almak için hesaplanan verileri son işleme de tabi tutabilmektedir. Pratikte paket programlarının otomotiv uygulamaları için kullanılması gerektiğinde, daha kompleks denklemlerle uğraşmak zorunluluğu ve türbülans modellerinin çeşitliliği nedeniyle fazla bir deneyim ve özel bir bilgiye gereksinim olduğu anlaşılır [1-3].

Navier-Stokes denklemlerinin kullanılmasıyla ilerlemelere ve program paketlerini çalıştırmadaki deneyime rağmen taşıtlardaki harici akışlar hala esaslı bir mücadeleyi gerektirmektedir. Bununla ilgili başlıca sorunlar şunlardır;

- 1) Mevcut olan popüler türbülans modelleri akışın tüm alanlarında iyi çalışmazlar.

2) İşlemcideki çalıştırma süresine dayalı olarak, yaklaşmakta olan rüzgârdaki türbülansın etkilerini modelleme zor yahut oldukça pahalıdır.

3) Motorlu taşıtlarda, jant kapakları ve karoser-panel eklemleri gibi ince detaylar akış üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir, fakat bunları yeterli derecede kusursuz modelleyebilmek için çok iyi tertiplenmiş büyük bir kafes sistemine ihtiyaç vardır.

4) Gerekli kafes şekillerinin çizilebilmesi, tecrübeli kullanıcılar tarafından uzun bir çalışmayı gerektirir.

5) İyi simülasyonlar çok güçlü bilgisayarlarda, uzun çalışma zamanlarını gerektirir.

6) Tekerleklerin seyir geometrisinde rotasını doğru olarak modellemek zordur.

7) Taşıtların arka formlarındaki iz zamandan bağımsız (kararlı) değildir ve bu, taşıtın etrafındaki akışta düzensizliğe sebep olur ve zamana bağlı akış çözümleri bilgisayar çalışma süresi bakımından çok zaman alıcıdır.

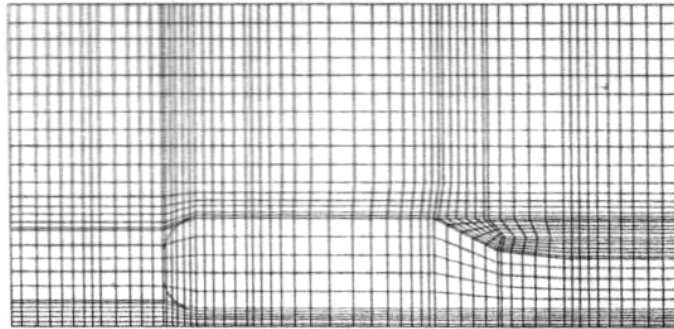
8) Üç boyutlu akışlarda, sınırlayıcı tabaka davranışını modelleme yöntemleri iyi gelişmemiştir ve doğrudan sayısal çözüm pratik değildir.

9) Yukarıdakilerin bir sonucu olarak, ayrılma pozisyonları tam olarak önceden tahmin edilemezler ve bu, çözümün doğruluğunu önemli oranda azaltabilir.

Tüm bu problemlere rağmen araştırmacılar aerodinamik tasarımda aşağıdaki ana hatları verilen alanlarda önemli derecede ilerlemeler kaydetmiştir.

#### 4.1. Kafesler

Aerodinamik tasarım çalışmalarında kullanılan hücre sayısını en aza indirmek için önemli çalışmalar yapılmıştır. Sınır tabakasında olduğu gibi akış özelliklerinin pozisyonuna göre hızla değiştiği alanlarda çok hassas bir ağ şebekesi kullanılmıştır, oysa taşıttan uzaktaki daha az duyarlı bölgelerde daha kaba bir kafes vardır. Şekil 5'te uygun kafes biçimini çizmek için önemli bir tecrübeye ihtiyaç vardır. Ticari paketler normalde farklı yardımlar da içerirler ve genelde bir otomatik kafes (ızgara) çizme programı olarak adlandırılan böyle paketler mevcuttur. Zamanla bu iş programları hem daha deneyimle hazırlanmaya başlanmış hem de kullanımı daha kolaylaştırılmıştır.



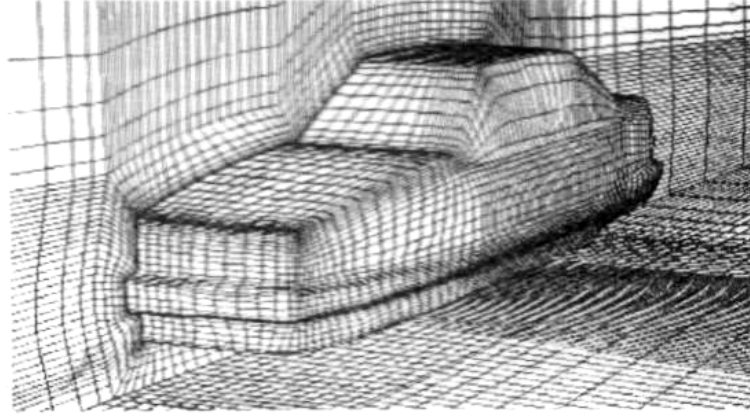
Şekil 5: Akış Özelliklerinin Hızlı Değişiklik Gösteren Bölgelerinde, Hücrelerin Nasıl Daha Küçük Yapıldığını Gösteren Bir Kafesin İki Boyutlu Kısımın Parçası

Önemli bir diğer problem de çözümün doğruluğu, sadece kafesteki hücrelerin yerleşimi ve sayısından ibaret değil, aynı zamanda hücrelerin biçiminden de etkilenir. Ebat ve şekildeki devamsızlıkların hepsi çözüm üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Bilgisayarların hafıza kapasitesi ve işlem hızındaki hızlı artışlar gittikçe daha iyi ağ şebekeleri kullanılmasına imkân vermektedir. Örneğin Şekil 6'da 98.000 hücre kullanılarak modellendirilebilen bir taşıt gösterilmektedir. Her yönde hücre sayısı iki

katına çıkarılsa bile (toplam 782.000 hücre) yüzey çıkıntılarının etkilerini tam doğru olarak modellemek hala yeterince iyi olmaktan uzaktır. Bu durum mümkün olana kadar kullanıcının birkaç çizim daha geliştirilmesi gerekir [1-2].

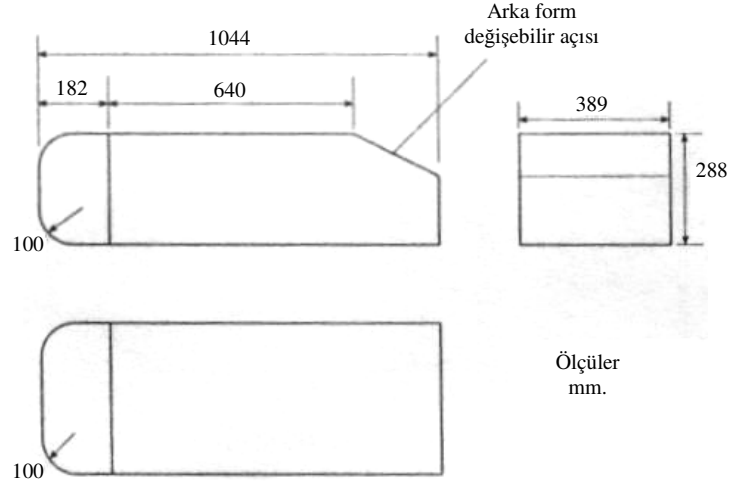
Karayolu taşıtlarında kafes jenerasyonunun bir sorunu formun bütünü, basit görünmesine rağmen geometrik yapının az fakat önemli detaylarının aşırı derecede karmaşık olmasıdır. Gövdenin koordinatlarını tanımlayan veriler Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) sisteminden HAD paketine transfer edilerek hesaplanabilir. Neticede HAD kullanıcısının yükü hafifletilebilir.



Şekil 6: Basitleştirilmiş Bir Volvo 850 Tipi Taşıtta 98.000 Hücreli Bir Kafesin Yüzey Kesişim Çizgileri. Toplam 782.000 Hücre Olacak Şekilde Çizgi Sayılarının Her Koordinat Yönünde İki Katına Çıkarılmasıyla Oluşturulan Bir Ağ Şebekesi

## 5. STANDART TEST FORMU

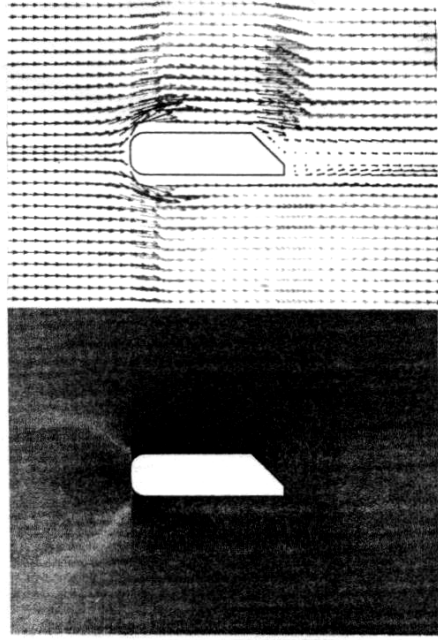
Aerodinamik testlerde ilk zamanlar taşıtların hesaplanmış çözümlerinin doğruluğu ve güvenilirliği hususunda bazı abartılmış iddialarda bulunulmuştur. Standart bir ölçüm sağlamak için muhtelif sabit nokta-referans noktası test şekilleri benimsenmiş olup bunlardan biri Şekil 7’de görülen modeldir. Orijinal olarak hazırlanmış olan bu şekil, arka tarafı hatchback tipli otomobillerde 5°’lik kademelerle değişebilen bir arka görünüş açısına sahip, çok basitleştirilmiş taşıt benzeri bir formdur. Bu şekil, rüzgâr tüneli verilerinin hazır olması ve zor bir test durumunu sağlayabilmesi bakımından çok özel olarak seçilmiştir. Çünkü akış alanı, arka projeksiyon yüzeyindeki ayrılma pozisyonuna karşı çok hassastır. Bir hatchback tipli taşıtta, sürüklenme kuvveti arka projeksiyon açısının artmasıyla başlangıçta düşer. Fakat bunu takiben arka projeksiyon formunda kuvvetli girdaplar şekillenmeye başlayınca sürüklenme de 30°–35°’lik bir arka form açısında en yüksek düzeye ulaşır ve artar, bundan sonra, akış ayrıldığında sürüklenmede de bir azalma olur. Bu konuda, General Motors, Mira, Rover ve diğer motorlu taşıtlar üretim kuruluşlarında daha detaylı olarak benzer şekillerin test modelleri kullanılmıştır [2].



Şekil 7: CFD modellemesi için bir referans testi olarak kullanılan basitleştirilmiş taşıt Ahmed Modeli

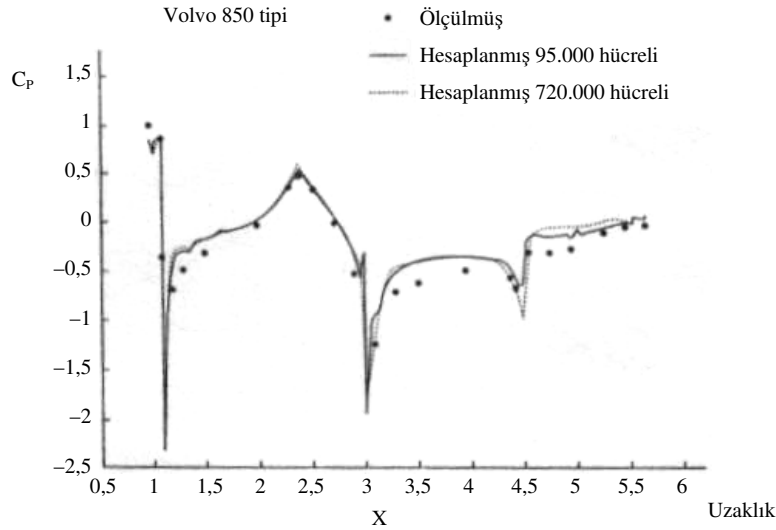
Simcox, Graysmith ve Pearson gibi değişik araştırma grupları CFD'nin Ahmed formuna uygulanmasına karşı olmuşlardır. Graysmith deneysel verileri için hareketli bir bant zemin kullanılmış ve bir dizi doğrulayıcı deneysel test programlarını Mira modeli rüzgâr tüneline kullanabilme avantajını elde etmiştir. Deneysel verilerle karşılaştırmada, taşıtı kaldırma katsayısı  $C_L$  değerinin akışın tespit edilmiş olduğu arka kuyruk lambasının  $30^\circ$  altındaki arka form açısında, bilgisayarla önceden oldukça iyi tahmin edildiği, fakat akışın ayrıldığı  $30^\circ$ 'nin üstünde en iyi kafes hesaplamalarının bile veriyle uyumda başarısız kaldığı görülmüştür. Sürüklenme katsayısı  $C_D$  değerleri, akışın yüzeyi takip ettiği durumda bile  $10^\circ$ 'lik arka ışık konum açısı için % 20'den başlayan ve  $30^\circ$ 'ye doğru % 30'a varan ayrılıklar göstermiştir, diğer bir ifadeyle daha zayıf bir uyum söz konusudur. Genelde araştırmacıların çoğu bu modeli kullanarak sürüklenme katsayısını hesaplamış ve bunun deneysel değerleri ile oldukça zayıf bir uyumun olduğunu göstermiştir. Akışın yüzeyi takip ettiği durumda taşıtın ön cephesindeki merkezi basınç dağılımları genellikle iyi hesaplanabilir; fakat sürüklemenin büyük bir oranda kaynağı olan arka kuyruk formu kuyruk lambasının kritik açısında daha az doğru bir değerde olmaya meyleder. Şekil 8'de  $40^\circ$ 'lik arka konum görünüşündeki durum için merkezi hız vektörleri ve basınç dağılımı görülmektedir [3-4].





Şekil 8: 40°'li arka konumlu projeksiyon alanı için merkez plakadaki hız vektörleri ve basınç hatları

Bütün form şekilleri, hesaplanabilir detaylara karşı Ahmed Modeli kadar hassas değildir. Örneğin Ramnefors çalışmalarında, Volvo 850 tipi taşıt için 164.000 hücre kullandığında HAD ve rüzgâr tüneli sonuçları arasındaki sürüklenme hesaplamalarında % 2'den daha az bir sapma bulmuştur. Merkezi basınç dağılımları Şekil 9'da görülmektedir. Bu çalışmaların bir sonucu olarak yazarların ortak kararı; bir milyon kafes hücresi civarında, tamamen kafes yoğunluğuna bağlı olan hata değerinin, pratik mühendislik amaçları için yeterince küçük değerde olduğu görüşünde olmuştur [6].



Şekil 9: Volvo 850 tipi bir taşıttaki basınç dağılımının hesaplanmış (CFD) ve deneysel verileri (Rüzgâr Tüneli) arasındaki karşılaştırması

### 5.1. HAD Tahminlerini Etkileyen Faktörler

HAD alanında yapılmış çalışmalarda, farklı sayısal şemaların, türbülans modellerinin, kafes geometrisi ve kafes yoğunluğunun çözümleri nasıl etkilediğini anlamak için çeşitli

sistemik hesaplama testleri yürütülmüştür. Genelde şayet diğer bütün faktörler uygun ise kafes yoğunluğunu arttırmak, hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş veriler arasındaki uyumu çoğunlukla güçlendirmektedir. Ancak bu her zaman böyle olmamakta ve daha iyi bir eşleşmenin bir diğerini yok ederken ya da kısmen bozan hata kümesinin birisinden ileri gelip gelmediğini söylemek oldukça zordur. Bütüne ait hesaplanmış sürüklenme değerlerine bakarak karar vermek yanlış yola sevk edebilir. Örneğin Pearson'ın yaptığı çalışmada Ahmed Modelinin önündeki sürüklenmeyi fazla, arka projeksiyon formunda az değerde tahmin etmeyi tesadüfi olarak kısmen eşitlemiş bulunduğu durumlar vardır [4-5].

Sorun çıkaran sadece ağ şebekesinin yoğunluğu değildir; ayrıca kafes şekli de önemlidir. 30°'li bir arka projeksiyon açısına sahip Ahmed Modelinde Pearson bir kafes form şekli için sürüklenme katsayısının 0,619 değeri, bir diğeri içinse, 0,578 değerini bulmuştur [4]. Sayısal şema seçimi, kendi başına sonuç değerleri etkileyebilmektedir. Simcox, aynı test durumu için sürüklenme katsayısı  $C_D$  değerinin, kullanılan şemanın sayısal değişimine göre hesaplanan sonuçları 0,455 ila 0,354 arasında değiştiğini belirtmiştir [7].

Son olarak önemli bir diğer faktör de türbülans modelidir; Ahmed şekli için hesaplanan sürüklenmenin, türbülans modeline karşı ve kullanılan parametrelerin seçimine özellikle kritik arka projeksiyon açısının seçimine karşı çok hassas olduğu görülmüştür.

## 6. SONUÇ

Günümüzde aerodinamik problemler hava taşıtlarından sonra karayolu taşıtlarında da bilgisayar destekli çözüm çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. Bu çalışmalar sadece motorlu taşıtlarla sınırlı kalmayıp rüzgar güllerinde, hızlı trenlerde, ısıtma-havalandırma sistemlerinde, uzay teknolojisinde transonik ve süpersonik hesaplamalarda kullanılmaktadır. Bilgisayarların hız ve bellek kapasitelerindeki artışla birlikte sayısal yöntemlerin kullanımı da yaygınlaşmış, bunun sonucu olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin kullanımı deneysel ve teorik çalışmaların önüne geçmiştir. Ancak HAD hesaplanmış çözümlerin ucuz olduğu düşünülmemelidir. Karmaşık kafes şekillerinin deneyimli kullanıcılar tarafından hazırlanması uzun bir zaman almaktadır. Tipik olarak dikkatli bir şekilde hazırlanacak 1 milyon hücreye kadar olan bir kafes için harcanacak süre 1994'te yaklaşık 3 hafta kadar sürmektedir. Çok iyi kafeslerde, sonuçların bir dizisi büyük kapasiteli bir bilgisayarı bir hafta boyunca tamamen meşgul etmekte, her seferinde geometrik yapıda bir takım küçük değişiklik yapılır, yeni bir denemeye gerek duyulur, hatta bazen yeni bir kafes sistemi de gerekebilir. Diğer yandan küçük bir doğruluk payı ile kabul edilirse; basit kaba kafes sistemleri kullanılabilir ve çalışma sonuçları ucuz bir şekilde hesaplanabilir.

Özetle, düşük doğruluktaki çabuk sonuçlar için HAD Modellemesi nispeten ucuzdur, fakat daha güvenilir verilerin büyük değerlerine ihtiyaç duyulursa, rüzgâr tüneli günümüzde daha iyi bir kaynaktır. Rüzgâr tüneli verilerindeki ihtilaflar, farklı HAD çalışanları tarafından gözlenmiş olan değerlerden genelde çok daha küçüktür. Zamanla HAD sonuçlarının daha ucuz ve daha güvenilir hale gelmesi kaçınılmazdır, fakat iyi bir rüzgâr tüneline sahip hiçbir organizasyon, bu olanaklarının yerine bir bilgisayar kullanımına geçilmesinin pek kolay olacağı düşünülemez. Rüzgâr tünelleri ve bilgisayarların her ikisi de nisbi avantajlara sahiptir ve hatta uzun vadede, muhtemelen alternatif vasıtalar yerine,

gerek rüzgâr tüneli ve gerekse Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi tamamlayıcı vasıtalar olarak gelecekte de kullanılmaya devam edilecektir.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] BARNARD, R. H., **Road Vehicle Aerodynamics Design**, University of Hertfordshire, Harlow Essex, 255–270, (1996).
- [2] AHMED, S. R., RAMM, G., FALTIN, G., **Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake**, SAE 840300, (1984).
- [3] GRAYSMITH J. J., BAXENDALE A. J., HOWELL J. P., HAINES T., Comparison between CFD and experimental results for the Ahmed reference model, **Proc. Vehicle Aerodynamics Conference**, Loughborough, RAeS, pp. 30.1-11, (1994).
- [4] KARTZ, J., Considerations pertinent to race-car wing design, **Proc. Vehicle Aerodynamics Conference, Loughborough**, RAeS, pp. 23.1-7, (1994).
- [5] PEARSON, W. E., MANNERS, A. P., PASSMORE, M. A., Prediction of the flow around a bluff body in close proximity to the ground, **Proc. Vehicle Aerodynamics Conference**, RAeS, pp. 29.1-12, (1994).
- [6] RAMNEFORS, M., PERZON, S., DAVIDSSON, L., Accuracy in drag predictions on automobiles, **Proc. Vehicle Aerodynamics Conference**, Loughborough, RAeS, pp. 28.1-1418, (1994).
- [7] SIMCOX S., JONES, I. P., GU, C. Y., Ramnefors M. and Svantesson J., The use of FLOW-3D for vehicle Aerodynamics, **Proc. Vehicle Aerodynamics Conference**, Loughborough, RAeS, pp.27.1-11, (1994).
- [8] STAFFORD, L. G., **A numerical method for the calculation of the flow around a motor vehicle**, **Advances in Road Vehicle Aerodynamics**, BHRA Fluid Engineering, pp. 167-83, (1973).
- [9] FLETCHER, C. A. J., **Computational Techniques for Fluid Dynamics**, Vol., 1, Springer Verlag, (1990).
- [10] PATEL, M. K., PERICLEOUS, K., CROSS, M., **Numerical Modelling of Circulating Fluidized Beds**, Vol. 1, 161-176, (1993).