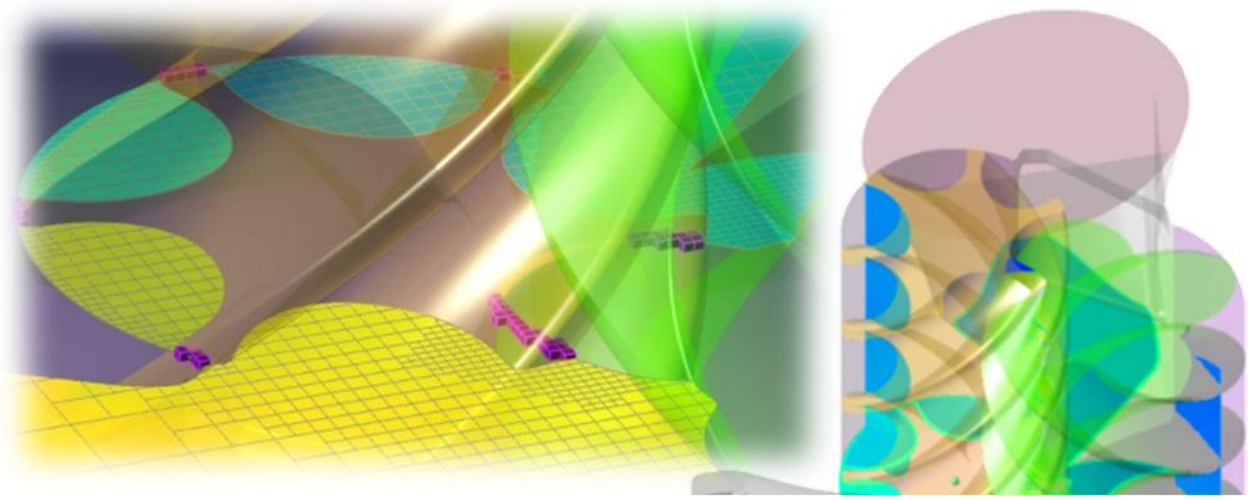


KÜÇÜK BOŞLUKLARDA VE DAR KANALLARDA AKIŞLAR VE SIZINTI SİMÜLASYONLARI

Sinan Soğancı[1]

1. GİRİŞ

HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, CFD[2]), etkin kullanıldığında birçok farklı mühendislik alanında tasarım süreçlerine önemli katkılar sağlayabilmektedir. Yapılan tasarımların hedeflenen performansları sağlayıp sağlayamadığının doğrulanması ile birden çok tasarım alternatifinin karşılaştırılması, HAD simülasyonlarının en önde gelen faydalarıdır.

HAD simülasyonları, havacılık, otomotiv, uzay, gemicilik, medikal, iklimlendirme, endüstriyel ekipmanlar ve benzeri neredeyse akışkan hareketlerinin görüldüğü her alanda fayda sağlama potansiyeline sahiptir. Her bir alanda ve uygulamada özel gereksinimler olmakla beraber, genel anlamda HAD simülasyonlarından etkin faydayı sağlayabilmek ve bunu yaparken süreç verimliliğini korumak için temel ve ortak bazı gereksinimlerden bahsedilebilir:

I. Proje iş akışına ve tasarım sürecine simülasyonun nasıl entegre edileceği ve elde edilen çıktılardan nasıl faydalanılacağı, proje, tasarım ve analiz sorumlularının eşgüdümünde belirlenmelidir.

II. Aynı konu üzerinde; HAD simülasyonlarının yanı sıra fiziksel deneyler ve analitik hesapların birbirleriyle ardışık veya paralel, birbirlerine alternatif veya birbirlerini doğrulayan şekilde konumlanmaları baştan kurgulanmalıdır.

III. HAD simülasyonları genellikle uzun işlem süreleri gerektirdiği için; simülasyon esnasında kullanılacak kaynaklar (analiz mühendisi, donanım, yazılım lisansı ve zaman) başlangıçta dikkatle planlanmalıdır.

[1] Bilgisayar Destekli Mühendislik Takım Lideri, Akana Mühendislik - *sinansoganci@akana.com.tr*

[2] "Computational Fluid Dynamics"

IV. Herhangi bir şekilde modellemeye başlamadan önce belirli alt başlıklar irdelenmelidir:

a. Simülasyonda kullanılacak girdiler ve beklenen çıktılar

b. Beklenen hassasiyet ve buna karşılık sahip olunan kaynaklar (donanım, lisans, zaman vb.)

c. Hesaba katılması gereken fiziksel süreçler ve bunları karşılayan matematiksel modeller

d. Katı model kalitesi ve analize uygunluğu

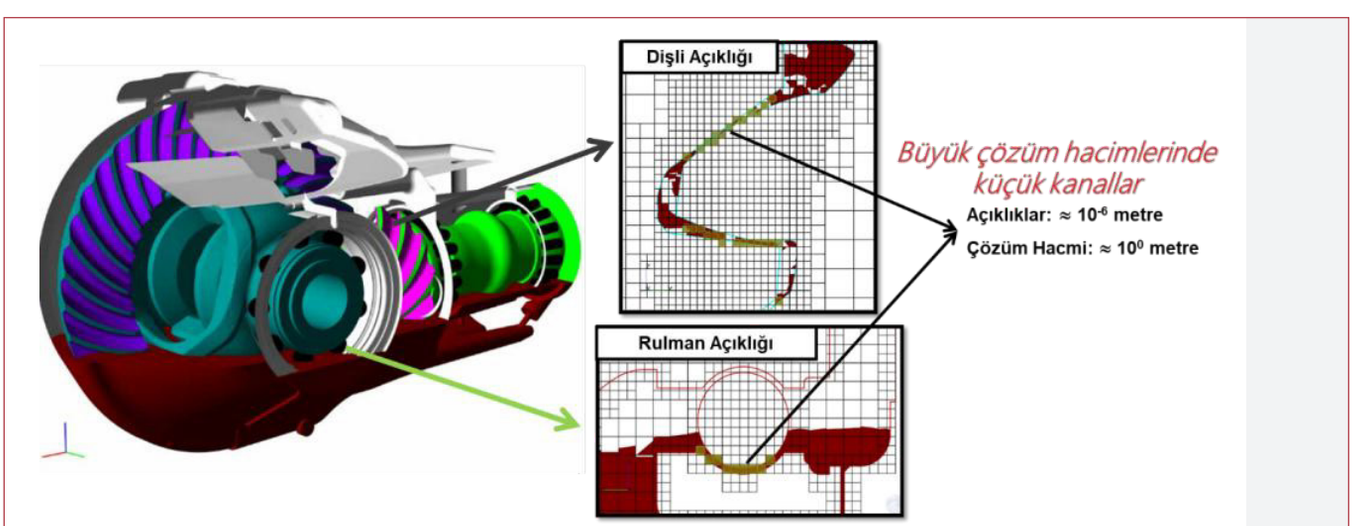
HAD simülasyonlarıyla ilgili ortak gereksinimlere bakıldığında, çoğunun henüz modellemeye başlamadan çalışılması, araştırılması ve tartışılması gereken konular olduğu görülmektedir. Bu esnada; modellemenin olası zorlukları ile bu zorlukların beraberinde getireceği zaman ve/veya sonuç hassasiyeti kayıpları irdelenmelidir. Yapılan değerlendirme sonucunda simülasyon faaliyetine ayrılması gereken kaynak ve sonunda elde edilecek sonuçların hata miktarları öngörülmeli ve söz konusu öngörüler ile proje ve tasarım süreç beklentilerinin örtüştürülmesi hedeflenmelidir. Anlamlı bir örtüşme olmadığı durumlarda, henüz simülasyonlar için yüklü miktarda kaynak ayrılmadan vazgeçilmesi veya simülasyon kapsam ve hedeflerinin değiştirilmesi düşünülmelidir.

Modelleme öncesi olası zorluk ve risklerin incelenmesinde yöntem ve sorgulanması gerekenler belirli olup, konuya göre değişkenliği kısıtlıdır. Öte yandan, her alanda ve hatta aynı alanda farklı proje beklentileri ve farklı miktarlarda kaynak varlığında dikkat edilmesi gerekenler değişkenlik gösterecektir. Küçük boşluklarda ve dar kanallarda akışlar ile sızıntı simülasyonları, özellikle modelleme teknikleri açısından çok boyutluluk, katı model karmaşıklığı ve değişken boşluklar gibi zorluklar barındırmaktadır. Sırasıyla, bu zorlukların üstesinden gelmek içinse özelleşmiş boşluk modelleri, sayısal ağ yöntemleri ve hareketli obje ile FSI[3] (Akışkan-Katı Etkileşimi) modellemelerinden faydalanılmaktadır.

2. SİMÜLASYON ZORLUKLARI

Sabit veya hareketli objeler arasında kalan küçük boşluklar ("clearance") ve oluşan dar kanallardaki akışlar ile sızıntı olarak tanımlanabilecek akışların modellenmesi ve çözülmesi, HAD sürecinin birçok aşamasında zorluklar ve riskler barındırır.

İki obje arasında akışkan bulunan bir bölgenin küçük boşluk olarak ifade edilmesi, çoğu zaman çok boyutluluk ("dimensionality") durumunun varlığına dayanmaktadır. Dar kanalların performans üzerinde çok etkili olduğu vidalı kompresör gibi uygulamalarda, hareketli parçaların arasında yağlama sağlanan dişli kutusu (Şekil 1) ve benzeri tribolojik uygulamalarda, kalp kapakçıkları gibi sürekli açılıp kapanma olan sistemlerde ve daha birçok HAD simülasyonlarına konu olabilecek alanda çok boyutluluğa rastlanmaktadır.



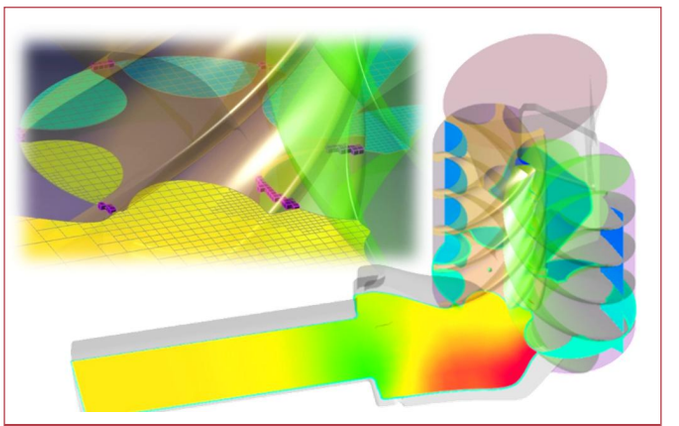
Şekil 1. Otomobil Dişli Kutusu (Çok Boyutluluk Örneği)

[3] "Fluid-Structure Interaction"

Çok boyutluluk görüldüğü durumlarda; aynı çözüm hacmi içerisinde farklı ölçekte boyutların bulunması, özellikle sayısal ağ elemanlarının boyutlandırılması açısından önemli bir problemdir. Dar bir kanal içerisinde akış özellikleri, kanal kesitinin boyutlarından fazlasıyla etkilenecek ve çoğunlukla bu boyutlarla kıyaslanabilir mesafelerde anlamlı değişiklikler gösterecektir. Öte yandan, dar kanaldan çıkıp geniş bir hacme ulaşıldığında, akış özelliklerindeki anlamlı değişiklikler daha uzun mesafelerde beklenecek ve kanal içerisindeki kadar küçük elemanlar gerekmeyecektir. Birçok sayısal ağ oluşturma yönteminin çalışma algoritmaları ve numerik yöntemlerde veri sürekliliği gibi kriterler, dar kanal çıkışından hemen sonra sayısal ağ elemanlarının hızlıca büyümesine izin vermeyecek ve çoğunlukla büyüme oranı (iki komşu sayısal ağ elemanının boyutlarının oranı) iki değerini geçemeyecektir. Dolayısıyla, çok boyutluluk durumu, birçok vakada sayısal ağ oluşturulamamasına sebep olmakta veya ancak çok yüksek sayıda eleman ile sayısal ağ oluşturmayı mümkün kılmaktadır.

Bazı mühendislik uygulamaları ve ürünlerinde performans üzerinde küçük boşlukların önemi büyüktür. Örneğin vidalı kompresörlerde vidalar arası ve radyal boşluklar, genellikle 100 ila 200 mikron mertebelerindedir ve bu boşluktaki akışkan davranışları (basınç ve sıcaklık dağılımları, şoklar vb.) kompresörün verimini ve dayanımını oldukça etkilemektedir (Şekil 2). Bu tip uygulamalarda güvenilir HAD simülasyonları yapabilmek için, küçük boşlukları belirleyen sınırların katı modelde doğru toleransta ifade edilmesi ve buna karşılık HAD çözüm hacminde fiziksel modeli temsil eden boşluğun oluşturulması ("CAD association") gerekmektedir.

Küçük boşlukların performans üzerinde anlamlı etkisi olduğu durumlarda bunların öncelikle katı model aşamasında basitleştirilmeden modellenmesi ve tolerans kaybı olmadan simülasyona aktarılması gereklidir. Bunu takiben HAD yazılımının sayısal ağ uygulamasında aynı toleransa karşılık gelecek kadar küçük sayısal ağ elemanları kullanıldığı takdirde ortaya çıkacak akış hacmi gerçekten yapılan tasarımı temsil edecek ve yapılan simülasyon ile performans değerlendirilebilecektir. Ancak bu durumda kullanılan sayısal eğ elemanları oldukça küçük ve sayısal ağın toplam eleman sayısı ise donanımsal kaynakları zorlayacak kadar yüksek olacaktır.

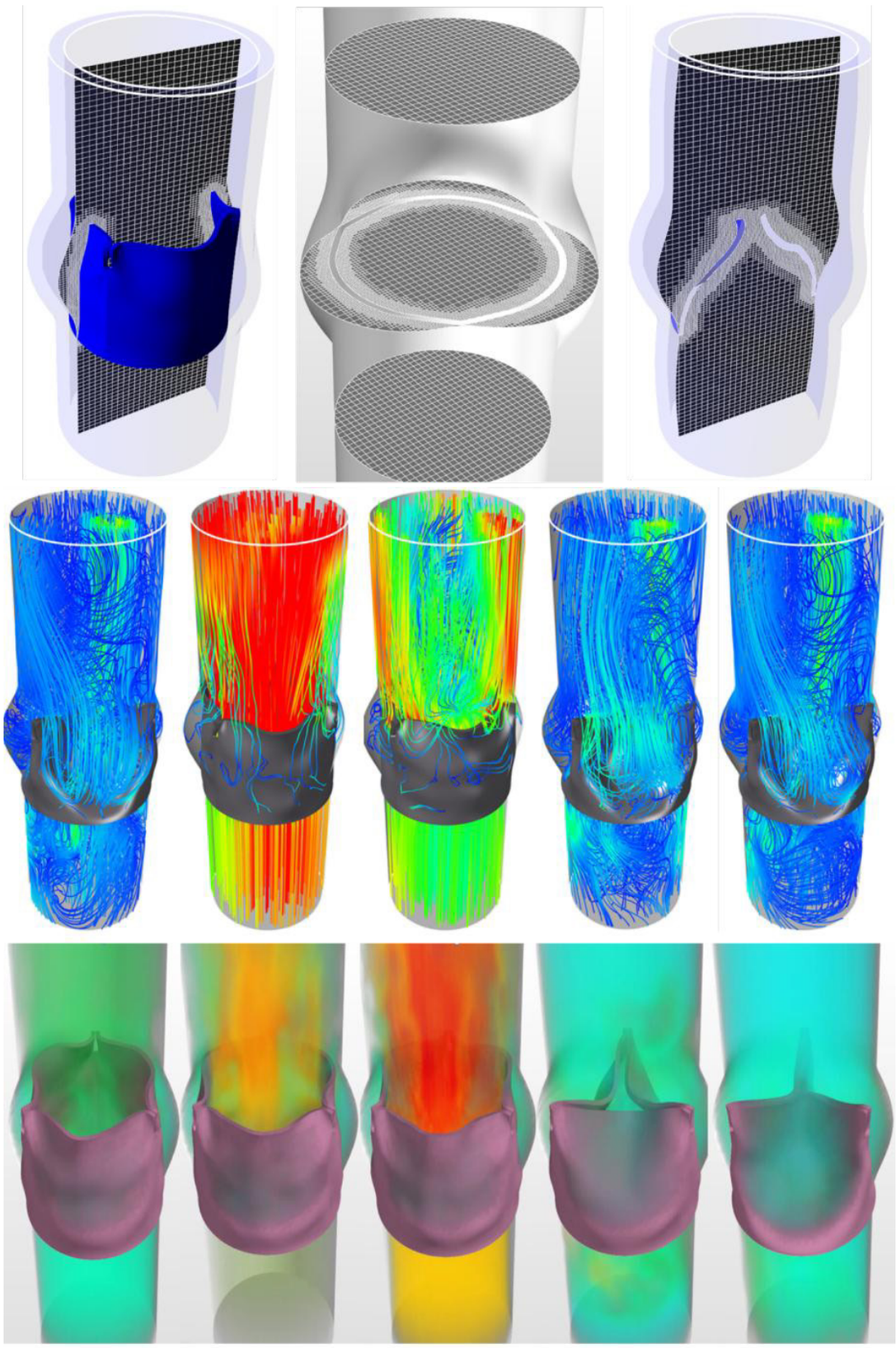


Şekil 2. Vidalı Kompresör; Genel Görünüm (sağ), Sayısal Ağ Kesiti (sol üst, boşluklar mor işaretli)

Değişken boşluklar ("dynamic clearances"), küçük boşluklardan geçen akışların yer aldığı HAD simülasyonlarında başka bir zorluk kaynağıdır. Öncelikle bu gibi durumlarda zamana bağlı simülasyonlar gerekecek ve simülasyon için ayrılması gereken zaman da artacaktır. Zaman adımının da hem genel olarak akış hacmindeki değişimleri takip etmesi gerekirken, özel olarak boşluk bölgesinde görülen ve büyük olasılıkla yüksek değişimler gösteren bölgeyi de göz önünde bulundurarak belirlenmesi gerekir.

Objelerin hareketi sonucu akış hacminin değişmesi kaçınılmaz olacağından, sayısal ağ aracının ve vakaya özel oluşturulan sayısal ağın da bu değişime ayak uydurabilmesi gerekir. Rijit obje hareketlerinin yanı sıra parça deformasyonları da HAD simülasyonlarında önemli olabilir ve bu durumda HAD ile yapısal analizi (FEA[4]) bir araya getiren FSI yöntemlerine başvurmak gerekmektedir. Hareket ve/veya deformasyonla beraber objelerin birbirine teması ve akışkanın geçeceği kesiti tamamen kapatması ("full closure") durumunda ise akış hacminin parçalara bölünerek sürekliliğini yitirmesi ve bu süreç aç/kapa şeklinde devam ediyorsa çözüm hacminin de sürekli ayrılıp birleşmeye adapte olabilmesi beklenir. Aynı zamanda, herhangi bir kesitin kapanmadan hemen öncesinde ve açıldıktan hemen sonrasında akış çok küçük kanallardan geçmeye çalışacaktır ve bunun sayısal hesaplara katılabilmesi için bu bölgelerde küçük ve düzgün sayısal ağ elemanları bulunmalıdır.

[4] "Finite Element Analysis"



Şekil 3. Yapay Aortik Kapakçık (Yukarıdan aşağıya: sayısal ağ, akış çizgileri ("streamlines") ve hacimsel hız dağılımı) [1]

Bahsedilen hareket, deformasyon ve tam kapanma durumları birçok uygulamada ve dolayısıyla birçok HAD simülasyonunda görülmektedir. Bu tip zorlukların görüldüğü ve doğası gereği basitleştirmelerin sınırlı kabul edildiği alanlardan biri medikal olup özellikle kalp ve kardiyovasküler sistem üzerinde yapılan simülasyonlar arasında bu durumların tamamının beraber görülebileceği vakalara sıklıkla rastlanmaktadır. Bu alandan bir örnek olarak, yapay aortik kapakçık performansını değerlendirmek amacıyla yapılan bir çalışmada [1]; kapakçık, doku mekaniğini temsil eden sonlu eleman modeli olarak yapısal analiz ortamında kurgulanırken kan akışı için HAD modeli hazırlanmıştır. Daha sonra iki yönlü eşlenik FSI yöntemiyle kan basıncının kapakçık üzerinde yarattığı deformasyon ve bunun sonucunda akış hacminde yaşanan değişiklikler hesaba katılarak çözüm yapılmıştır. Böyle bir çalışmada; sayısal ağ, zaman içinde sürekli değişmeli, kapakçığın karmaşık deformasyonlarına uyum sağlamalı ve kapakçığın tam kapanması öncesi ve sonrasında görülen en küçük boşluklarda dahi kan akışı hesaplamalarına olanak vermelidir. Tüm bunlarla beraber, hala işlem maliyeti açısından karşılanabilir seviyelerde kalınması da sayısal ağın toplam eleman sayısıyla doğrudan ilintilidir. Bu şartlar sağlandığı takdirde, zamana bağlı kan akışı, kapakçık üzerinde basınç dağılımı ve duvar kesme gerilmesi ("wall shear stress") gibi değerler gerekli hassasiyetle elde edilebilecektir (Şekil 3).

3. FAYDALANILAN TEKNOLOJİLER VE YÖNTEMLER

Küçük boşluklarda ve dar kanallarda akışlar için HAD simülasyonları yapılmasında karşılaşılan zorlukların üstesinden gelerek verimli simülasyon süreçleri ve gerekli hassasiyete sahip sonuçlar elde etmek amacıyla çeşitli teknolojiler ve yöntemlerden faydalanılmaktadır. Farklı uygulamalar, vakalar, proje beklentileri ve yazılım mimarilerine bağlı olarak birçok farklı yaklaşım olabilmekle beraber, boşluk modeli ("Gap Model"), alt-ağ geometri çözünürlüğü ("SGGR: Sub-Grid Geometry Resolution") ve hareketli objeler ile FSI uygulamalarına yer verilmiştir.

Boşluk modeli, çok boyutluluk problemine karşı ve genellikle mikron ve metre boyut ölçeklerinin bir arada görüldüğü akış hacimlerini çok yüksek sayıda sayısal ağa gerek duymadan ayrıklaştırmak ("discretization") ve çözebilmek için geliştirilmiştir. Bu modelde, iki katı yüzey arasındaki akışkanla dolu mesafe tanımlanan eşik değerinin (genellikle 1 mm ve altı) altına indiğinde buradaki sayısal ağlar, boşluk hücrelerine ("gap cell") dönüştürülür. Boşluğu oluşturan iki yüzey arasında yalnızca bir sıra boşluk hücresi kullanılarak eleman sayısı gereksinimi anlamlı miktarda azaltılmış olurken, bu hücrelerdeki viskoz kuvvetler ve yayınım akıları ("diffusive fluxes") analitik hesaplamalarla çözülür [2] . Boşluk modeli, öncelikle vidalı kompresörler üzerinde deneysel çalışmalarla desteklenerek geliştirilmiş ve doğrulanmış, kullanılmaya başladıktan sonra elektronik soğutma, savunma sanayi fırlatma simülasyonları ve endüstriyel sızdırmazlık gibi alanlarda kalibre edilmeye devam edilmiştir.

Hidrodinamik direnç, boşluk modelinin temel kavramlarından biri olup, deneysel temele dayanan analitik korelasyonlara göre; boşluk içerisindeki basınç kaybı, akışkan hızı, Reynolds sayısı, boşluk kalınlığı, boşluğu oluşturan objelerin hareket hız ve yönleri gibi birçok parametreye bağlıdır. Nihai olarak, akış özelliklerine bağlı olarak çözüm esnasında sürekli hesaplanan ve değişen etkin viskozite ("effective viscosity") terimi üzerinden Navier-Stokes denkleminde hidrodinamik direnci temsil eden bir kaynak terimine yer verilmektedir.

Boşluk modeli kullanılarak çözümlenen bölgelerde, basınç düşümü, debi/sızıntı miktarı ve bir boyutlu hız/basınç/sıcaklık dağılımları, endüstriyel gerekleri karşılayabilecek hassasiyetlerde elde edilmektedir. Bununla birlikte, boşluk içerisinde detaylı hız/basınç/sıcaklık dağılımları, sınır tabakası çözümü, süpersonik akışlarda şok dalgalarının takibi ve benzeri, model hassasiyet kabiliyetlerinin dışındadır. Boşluk modeli kullanılarak kimi zaman imkânsız olan modeller çözülebilir hale gelmekte veya işlem maliyeti anlamlı miktarda indirilebilmektedir. Bunu göz önünde bulundurarak, kimi projelerde önce boşluk modelli birçok çözüm ve en son tek seferlik çok yüksek sayısal ağ kullanan model çözümü tercih edilebilir.

Alt-ağ geometri çözünürlüğü, birçok farklı HAD simülasyonunda kullanılmakla beraber özellikle küçük boşluklar gibi geometri zorluklarının ve yüksek tolerans beklentilerinin olduğu durumlarda daha büyük önem kazanmaktadır. Bu yöntemle sayısal ağ ve daha da önemlisi nihai çözüm hacmi oluşturulurken, HAD ortamına aktarılan katı modelin çözünürlüğü olduğu gibi korunur. Katı yüzeyinin etrafındaki akış hacmi, yüzey topolojisinden daha düşük

hassasiyete sahip olsa bile yüzey etrafındaki sayısal ağların bir veya birden çok yüzeyi doğrudan katı yüzeylerine eşitlenir. Bu sayede, katılar etrafında çözüm hacmi olarak oluşturulan ve HAD çözümlerinde kullanılan hacimler her durumda gerçek (katı modelde ifade edildiği derece) hacimlere denk hale gelmektedir [3] .

Akış hacmi içerisinde yer alan objeler arası küçük boşlukları değişken hale getiren hareket veya deformasyon modelleme ve/veya hesaplamasındaki hatalar, objeler arasında kalan boşluktan büyük hatta boşluk boyutuyla karşılaştırılabilir olması halinde, hesaplama hatalarını yüksek miktarda artıracaktır. Bu sebeple, dar kanalların yer aldığı HAD simülasyonlarında hareket ve deformasyon modellemesi daha da kritik hale gelmektedir.

Obje yüzeyleri yer değiştirip akış hacminin de değişmesine sebep olurken zaman adımının fazla büyük olması müteakip adımlar arasında fiziksel anlamlı geçişler hesaplanamamasına sebep olabilir. CFL ("Courant–Friedrichs–Lewy") koşulunun yüzey yer değişim hızı üzerinden kullanılması ("surface CFL") faydalı olacaktır. Ayrıca kullanılan HAD yazılımı içerisindeki hareketli obje algoritmasının objelerin birbirine temasına izin veriyor olması, çoğu dar kanal içeren problemde gerekli hale gelmektedir. Aksi takdirde, anlık da olsa gözlemlenen tam kapanma durumları, HAD çözücüsünün sayısal yöntemlerle ilerleyişini sekteye uğratmakta ve çoğunlukla çözüm süreci iptal olmaktadır. Benzer şekilde, FSI uygulamalarında da obje yüzeyleri, birbirlerine temas edip ayrılabilmeli ve bu esnada FEA tarafında tanımlanan yapısal davranışlar tutarlı bir şekilde devam edebiliyor olmalıdır. FSI için kullanılacak CFD-FEA yazılım çifti, aralarındaki veri aktarım mekanizması ve yaşanan kayıplar, FEA model detaylarının akış hacminde ne kadar tanımlanabildiği gibi detayların vakaya ve proje beklentilerine göre değerlendirilmesi gerekmektedir [4] .

4. SONUÇ

HAD simülasyonlarında diğer CAE (Bilgisayar Destekli Mühendislik) faaliyetlerinde olduğu gibi nümerik yöntemler kullanılmakta ve dolayısıyla elde edilen sonuçlarda her zaman bir miktar hata bulunmaktadır. İyi bir simülasyon için, farklı gereksinimlerden bahsetmekle beraber, temelinde doğru hata yönetimi bulunmalıdır. Hatanın ne kadar azaltılması gerektiği (proje gereksinimleri), ne kadar azaltılabileceği (simülasyon açısından yapılabilirlik analizi) ve bunun için ne kadar kaynak gerekeceği (donanım, zaman, vb.) sorularına doğru cevaplar verilmesi, mühendislik simülasyon süreçlerinin en önemli aşamasını teşkil etmektedir.

Küçük boşluklarda ve dar kanallarda akışlar ile sızıntı simülasyonları, HAD alanında görülen birçok zorluğu barındıran ve bu sebeple ancak proje gereksinimleri ile ekip, donanım ve yazılım kabiliyetlerinin uyuştuğu durumlarda yapılabilmektedir. Bu tip simülasyonlarda sıklıkla karşılaşılan zorluklar arasında çok boyutluluk, katı model karmaşıklığı ve değişken boşluklar gelmektedir. Bunlara karşılık kullanılan yöntemler arasında özelleşmiş boşluk modelleri, alt-ağ geometri çözünürlüğü gibi sayısal ağ yöntemleri ve hareketli obje ile FSI modellemeleri yer almaktadır.

KAYNAKÇA

1. **D. Sodhani, S. Reese, A. Aksenov, S. Soganci, S. Jockenhovel, P. Mela ve S. E. Stapleton,** "Fluid-Structure Interaction Simulation of Artificial Textile Reinforced Aortic Heart Valve: Validation with an In-Vitro Test," Journal of Biomechanics, pp. 52-69, 2018.
2. **Capvidia NV, FlowVision User's Guide Version 3.12.01, 2020.**
3. **A. Aksenov, A. Dyadkin ve V. Pokhilko,** "Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method," %1 içinde ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego, 1998.
4. **G. Marom,** "Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction Models of Aortic Valves," Archives of Computational Methods in Engineering, pp. 595-620, 2015.