

# Akışkanlar Mekaniği Araştırmaları Çalıştayı



Foto: Özgür Ertunç



**ODTÜ METU**

**KUZEY KIBRIS KAMPUSU  
NORTHERN CYPRUS CAMPUS**

Güzelyurt, KKTC  
28 Ekim 2016

Düzenleyen: Eray Uzgören

**Önsöz:**

Akışkanlar Mekaniği Araştırmaları Çalıştayı 28 Ekim 2016 Cuma günü 14 katılımcının ODTÜ KKK Kültür Kongre Merkezinde yaptığı sunumlar ile gerçekleşmiş ve sonunda yapılan toplantı sırasında aşağıdaki konular gündeme alınmıştır.

1. Özet Kitapçığı: 28 Ekim 2016 tarihinde ODTÜ Kuzey Kıbrıs Kampüsü'nde gerçekleştirilen sunumlar ile ilgili katılımcılardan kısa bir özet istenerek, çalıştayı içeriğini dosyalamak amacıyla bir döküman oluşturulması planlanmış ve sonuç olarak bu kitapçık oluşturulmuştur.
2. Grup Web sayfası: Akışkanlar Mekaniği ile ilgili grubun gerçekleştirdiği ve planladığı etkinlikleri, ilgili sunumları, Türkiye ve çevresinde yaşayan gençlerin ilgi ve bilgilerini artıracak uygulamaları içeren Türkçe içerikli grup web sayfası<sup>1</sup> oluşturulması ve faaliyet raporlarının da bu yol ile yayınlanması planlanmaktadır. Web sayfasına katkıda bulunmak isteyen araştırmacılar, aşağıdaki link üzerinden erişim hakkı isteyebilirler.
3. Forum: Akışkanlar Mekaniği üzerine çalışan araştırmacılar arasında daha rahat iletişim kurulmasını sağlamak amacıyla bir forum<sup>2</sup> uygulaması başlatılmıştır. İlgi duyan araştırmacılar aşağıdaki link üzerinden foruma katılabilirler.
4. Etkinlikler:
  - a. Çalıştay: Gerçekleşen diğer geleneksel bilimsel toplantıların tarihleri gözönüne alınarak Ekim 2017'de 2 gün sürecek yeni bir çalıştay yapılması planlanmıştır. Yer olarak İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü düşünülmüş, uygunluğu araştırılmaktadır. Bu çalıştaya akademisyenler sözlü sunumlarıyla, lisans/lisansüstü öğrenciler ise poster sunumlarıyla katılmaları planlanmaktadır.
  - b. Yaz okulu/kısa kurs: Lise ve lisans seviyesinde öğrencilere Akışkanlar Mekaniğini sevdirmek üzere yaz okulu düzenlenmesi düşünülmüştür. Yaz okulunda ele alınacak konuların belirlenmesi ve belirlenen konularda önde gelen araştırmacıların davet edilebilmesi için kaynak araştırılması planlanmaktadır.
  - c. Bilimsel toplantı/dergi: İlk aşamada bildiri yayımlamak üzere bilimsel toplantı düzenlenmesi, sonraki aşamalarda bu etkinlik yayınlarının Türkçe ve açık kaynaklı bir bilimsel dergiye dönüşmesi hedeflenmektedir.
  - d. Popüler Yayın: Akışkanlar Mekaniği araştırmalarını gençler arasında yaygınlaştırmak amacı ile web üzerinden popüler içerikli yayınlar yapılması planlanmaktadır.
5. Endüstri katılımını sağlamak için gelecekte düzenlenecek aktivitelere Akışkanlar Mekaniği ile ilgili araştırma ve geliştirme yapan sanayi kuruluşlarının davet edilmesi planlanmaktadır.
6. Oturum: 21. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (ULIBTK'17) toplantısında Akışkanlar Mekaniği ile ilgili grup tarafından bir oturum düzenlenmesi için talepte bulunulması planlanmaktadır.

**Katılımcı Listesi:** C. Çelenligil, M. Muradoğlu, K. Pekkan, M. Şahin, A. M. Başol, A. G. Güngör, Ö. Ertunç, G. Kirkil, N. Sezer Uzol, E. Uzgören, D. Alp, E. Artun, B. Çetin, B. Çelik

---

<sup>1</sup> Hazırlanma aşamasında olan siteye <https://akiskanlar.wordpress.com/> adresinden ulaşılabilir.

<sup>2</sup> Forumla katılmak isteyen araştırmacılar <http://akiskan.slack.com> adresinden başvurularını gönderebilirler.

## Program

Saat	Konuşmacı	Başlık
8:30-8:40	Açılış	Akışkanlar Mekaniği Araştırmaları Çalıştayı
8:40-9:00	Cevdet Çelenligil	Akışkanlar Dinamiğinde Moleküler Yaklaşımlar - “Direct Simulation Monte Carlo” (DSMC) Uygulamaları
9:00-9:20	Kerem Pekkan	Biyolojik akışkanlar mekaniğinde yeni araştırma konularını keşfetmek
9:20-9:40	Mehmet Şahin	Kompleks akış simülasyonları için bir ALE çerçevesi
10:00-10:20	Özgür Ertunç	Damlacık ve sprej araştırmaları
10:20-10:40	Eray Uzgören	Çok amaçlı fizik simülasyon platform oluşumu
10:40-11:00	Bayram Çelik	Hesaplamalı yöntemlerle ses-üstü akış
11:20-11:40	Metin Muradoğlu	Damlacık buharlaşması ve yanmasının sayısal modellenmesi
11:40-12:00	Altuğ M. Başol	Grafik Kartları üzerinde Monte Carlo ışın izleme ile termal radyasyon modelleme
12:00-12:20	Ayşe Gül Güngör	Türbülanslı akışların sayısal analizi
13:40-14:00	Doruk Alp	İki fazlı doğal gaz akış ayrımının ağ uygulaması ile sayısal modellenmesi
14:00-14:20	Emre Artun	Petrol rezervuarlarının sayısal ve veri-bazlı modellenmesi
14:20-14:40	Nilay Sezer Uzol	Döner kanat aerodinamiği ve HAD simülasyonları
14:50-15:10	Gökhan Kırkil	Jeofiziksel akışların büyük Eddy benzetimi
15:10-15:30	Barbaros Çetin	Mikro-akışkanlar-dinamiği uygulamaları için parçacık hareketinin modellenmesi



## **Akışkanlar Dinamiğinde Moleküler Yaklaşımlar - “Direct Simulation Monte Carlo” (DSMC) Uygulamaları**

**M. Cevdet Çelenligil** ([celenlig@metu.edu.tr](mailto:celenlig@metu.edu.tr))

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Kampüsü,  
Güzelyurt, TRNC, Mersin 10

Günümüzde akışkan dinamiği problemlerinin incelenmesi, makroskopik ve mikroskopik yaklaşımlar ile yapılabilmektedir. Makroskopik yaklaşımda akışkanın sürekli bir ortam olduğu kabul edilmekte ve problemdeki şartlara bağlı olarak çeşitli varsayımlarda bulunularak formülasyonlar değişik modeller ile yapılmaktadır. Bu modellerden en yaygın olanı Navier-Stokes denklemleridir. Bu model, hareket sırasında akışkanın yerel denge durumuna oldukça hızlı bir şekilde uyum sağlamaya çalıştığı ve akışkan özelliklerinin yerel denge durumundan çok az farklılık gösterdiği şartlarda geçerliliğini korumaktadır. Bunların dışında, örneğin şok probleminde ve seyreltik gaz akışlarında kullanılamamaktadır. Her ne kadar Navier-Stokes modelinden daha gerçekçi modeller varsa da kullanım kolaylığı, karşılaşılan durumların sayısı ve verdiği sonuçların doğruluk oranının yüksekliği göz önüne alındığı için Navier-Stokes modeli günümüzde bu alanda yaygın olma özelliğini korumaktadır.

Gaz akışlarının incelendiği mikroskopik yaklaşımlarda ise Boltzmann ve Liouville denklemlerinin kullanıldığı matematiksel yaklaşımların yanı sıra Moleküler Dinamik ve “Direct Simulation Monte Carlo” (DSMC) yönteminin kullanıldığı fiziksel modeller kullanılmaktadır. DSMC yöntemi, kabaca, gaz moleküllerinin iç çarpışmaları arasında kat edilen ortalama serbest mesafenin ( $\lambda$ ) akış içinde bulunan cismin boyuna ( $L$ ) oranının büyük olma durumunda geçerlidir. Bunu Knudsen sayısı ( $Kn=\lambda/L$ ) ile yaklaşık olarak  $Kn>0.01$  şeklinde ifade etmek mümkündür. Günümüzde DSMC modeli, bu şartın sağlandığı, örneğin, ( $\lambda$  ve  $L$ 'nin büyük olduğu) uzay araçlarının atmosfere girişlerinde ve ( $\lambda$  ve  $L$ 'nin küçük olduğu) mikro-elektromekanik sistemlerde en yaygın yöntem olarak kullanılmaktadır.

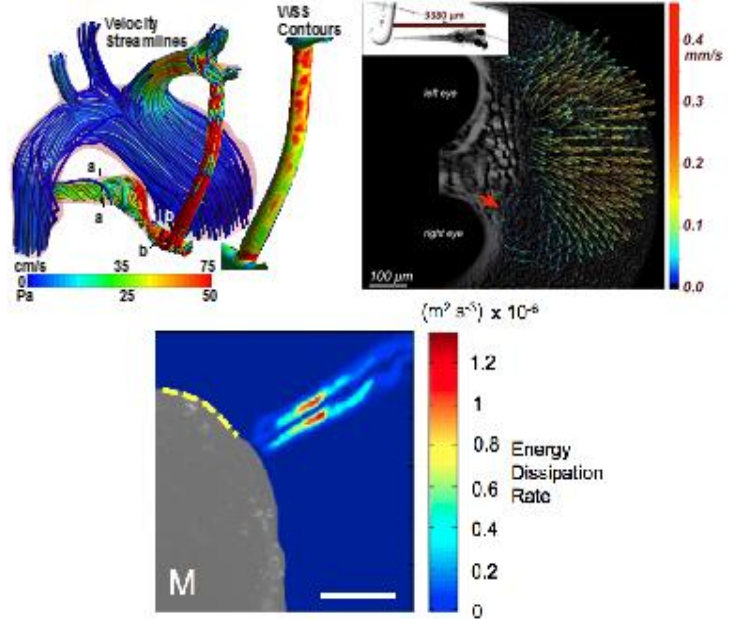
## Biyolojik akışkanlar mekaniğinde yeni araştırma konularını keşfetmek

**Kerem Pekkan** ([kerem.pekkan@ku.edu.tr](mailto:kerem.pekkan@ku.edu.tr))

Koç Üniversitesi, İstanbul

Akışkanlar mekaniğinin en önemli uygulama alanlarından biri “biyolojik akışkanlar mekaniği” olarak adlandırdığımız araştırma alanıdır. Birçok farklı disiplinden deneyim ve bilgi gerektiren bu alan kan akışları ve kan akışlarının organ ve insan sağlığı üzerine etkileri, tedavi ve hastalıkların anlaşılması, kan ile etkileşen tıbbi cihaz tasarımlarını kapsar. Diğer yandan akışkanlar mekaniği havada ve suda yaşayan canlıların itki sistemleri, solunum ve duyma mekanizmaları açısından önemlidir. Akışkanlar mekaniğinin fonksiyonel açıdan önemli olduğu organizmaların sistematik olarak incelenmesi yeni endüstriyel uygulamaların ve tasarımların keşfine on ayak olacağı düşünülmektedir. Özellikle optimal akış performansının canlıların hayatta kalma ve evrimsel açıdan avantaj sağlamaktadır ve aynı mekanizmalar yeni mühendislik tasarımları içinde çok önemli olur. Biyolojik akışkanlar mekaniğinde sadece akışkan ve katı hal mekaniği birbiriyle etkileşmez. Bu fizikte önemli bir rol oynayan diğer etken uygulanan çevresel kuvvetlere karşı canlıların uyguladığı biyolojik adaptasyon ve sinirsel kontroldür. Bu komplike etkileşimlerin anlaşılması hem deneysel hem de hesaplamalı akışkanlar mekaniği metodlarının beraber kullanılmasıyla mümkün olabilmektedir.

Laboratuvarımızda bu alanda “Doğadan esinlenen mühendislik tasarımı” ismi altında yeni bir lisans ve lisanustu dersi açtık. Bu ders çalışmalarında inceldiğimiz biyolojik sistemlerden konuşmamızda örnekler verdik. Özellikle kalp by-pass sistemlerinde kullanılan yüksek Reynolds sayısına sahip jet akışlarında türbülans ve kan zararının durdurulmasına yönelik, hızlı prototipleme ve tomografik parçacık hız ölçüm yöntemi ile (tomoPIV), dendiğimiz doğadan esinlenerek seçtiğimiz geometrilerin yarattığı akışları sunduk. Embryonik balık larvalarının beslenirken yarattığı akışları ve bu akışların performanslarının belirlendiği deneysel çalışmalarımıza yer verdik. Ayrıca İstanbul Boğazı’nda bulunan midye türleri üzerinde yaptığımız akış karışma ve enerji kaybı ölçüm çalışmalarımızda bulduğumuz sonuçları tartıştık. Son olarak akışkanlar mekaniği ve sınır biliminin birleştiği, yine balıklarda koku alma sisteminin performansını, koku almada önemli hareketli sillerin performanslarını ve bu alanda ileri lazer mikroskoplar kullanarak yaptığımız akış analizlerini anlattık. Biyolojik akışkanlar mekaniği yeni fiziksel rejimlerin ve yeni akışkanlar mekaniği problemlerinin bulunması açısından çok önemli bir kaynak olarak karşımıza çıkmaktadır.

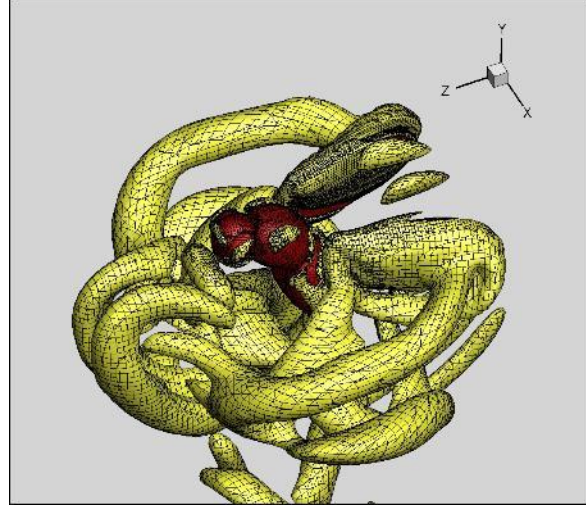


**Şekil:** Biyolojik akışkanlar mekaniğinde yayına kabul edilmiş çalışmalarımızdan örnekler. Sol üst şekil: Kalp damar cerrahisinde kullanılan bir akim shunitinin performans analizi. Sağ üst şekil: Zebrafish embriyosunun ağız kısmında yemek yerken yarattığı akışlar. Alt şekil: Midyenin deniz suyunu filtreleme sırasında çıkış jetinin yarattığı enerji kaybı dağılımı. Referanslar ve daha detaylı bilgi için: <http://www.facebook.com/pekkan.lab>

## Kompleks akış simülasyonları için bir ALE çerçevesi

**Mehmet Şahin** ([msahin@itu.edu.tr](mailto:msahin@itu.edu.tr))  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Mevcut çalışmada Lagrangian ve Euleryen yöntemlerin avantajlarını birleştiren bir keyfi Lagrangian Eulerian (ALE) yöntemi kullanılarak sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemleri hareketli ağlar üzerinde yanal merkezli sonlu hacimler yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Bu yöntemde basınç terimi eleman merkezinde tanımlanır iken hız vektörü bileşenleri, her hücre yüzeyinin orta noktasında tanımlanmıştır. Mevcut değişkenlerin bu şekilde tanımlanması kararlı bir yöntem oluşturur. Bu yöntemde süreklilik denklemi her bir element içerisinde tam olarak sağlanmıştır. Yöntem daimi Kovasznay akışı ve düşey salınım hareketi yapan NACA0012 profili etrafındaki daimi olmayan akış problemleri için geçerli kılınmış ve meyve sineği askı uçuşuna uygulanmıştır.



Akışkan katı etkileşiminde elastik katı cisim için doğrusal olmayan Saint Venant-Kirchhoff malzeme denklemleri Lagrangian koordinatlarda Galerkin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Elastik malzeme için zaman entegrasyonu, alt iterasyonlar kullanan ikinci mertebeden Newmark türü geliştirilmiş- $\alpha$  yöntemine dayanmaktadır. Mevcut sayısal algoritma, Newtonian akışla etkileşen silindir arkasındaki elastik bir çubuğun deformasyonu ve kare kesitli üç boyutlu rijit bir blok arkasına yerleştirilen elastik bir ince levha problemleri için doğrulanmış ve daha sonra kırmızı kan hücresi ve beyin anevrizma problemlerine uygulanmıştır. Birbine göre kısıtlı/göreceli olarak hareket eden cisimlerin simülasyonu için Lagrange çarpanları yönteminden yararlanılmış ve böylelikle serbest yüzme problemi çözülmüştür.

Mevcut algoritma çok fazlı akışların çözümüne de uyarlanmıştır. Bu yöntemde akışkan arayüzünde yüzey geriliminden kaynaklanan kuvvetleri yüksek mertebeden Legendre polinomları yarıyla hesaplanmaktadır. Ayrıca arayüzde basınç ve kayma kuvvetleri süresiz olarak ayrıklaştırılmıştır. Farklı fazların akışkan kütlelerini makine hassasiyetinde koruyabilmek için geometrik korunum kanununu (DGCL) lokal ve global olarak sağlanmasına özel bir özen gösterilmiştir. Elde edilen büyük ölçekli denklemler, monolitik yaklaşımlar kullanılarak tam bağlaşıklık formda çözülmüştür. Burada kullanılan tek seviyeli monolitik yöntem orjinal sistemin bir sağ üst üçgen koşullandırıcı ile çarpılmasına ve süreklilik şartından doğan sıfır blok yerine, ayrık bir Laplace operatörünün oluşturulmasına dayanmaktadır. Elde edilen yeni cebirsel denklemler her bir alt bölgede ILU(k) kullanılarak kısıklı katkı Schwarz ile ön koşullandırılmış FGMRES algoritması kullanılarak PETSc kütüphanesi yardımıyla çözülmüştür.

## Damlacık ve sprej araştırmaları

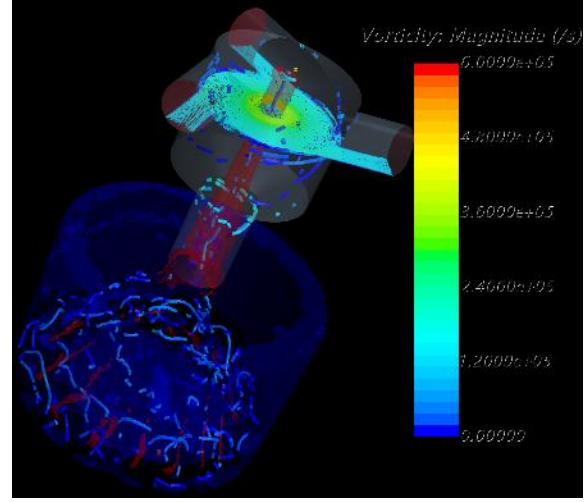
Özgür Ertunç (ozgur.ertunc@ozyegin.edu.tr)  
Özyeğin Üniversitesi, İstanbul

Damlalar gerek tek, gerekse sprej şeklinde bir çok önemli teknoloji de kullanılmaktadır. Araba motorları, jet motorların yanma odaları, yüzey kaplamaları, yüzey soğutması, yüzey reaksiyonları, solunum yolu ile ilaç alımı, yangın söndürmesi, tarımsal ilaçlama ve inkjet baskı teknolojisi bunlara örnektir. Bu uygulamaların yanında, buhar türbinlerindeki ve termik / nükleer santrallerin buhar hatlarındaki, damlaların çarpmasından kaynaklı aşınma ise etkileşimin yıkıcı tarafına örnektir.

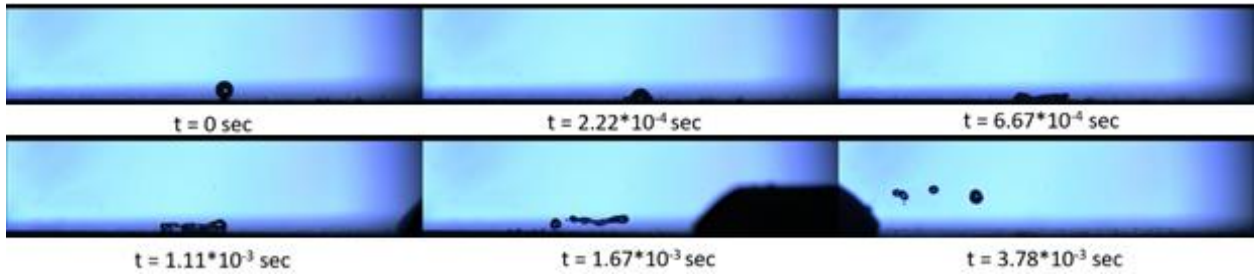
Yukarıda, verilen örneklerin bir çoğunda oluşturan sprejin oluşma fiziğinin ve teknolojisinin, damlaların yüzeylere çarpması sırasında meydana gelen dinamiğin ve damla-yüzey etkileşiminin anlaşılması teknolojinin başarısını belirlemektedir ve, daha da önemlisi, yeni teknolojilerin geliştirilmesinin önünü açmaktadır.

Bu sunumda, Özyeğin Üniversitesi'nde devam etmekte olan damla-hareketli duvar etkileşimi ve sprej oluşturma fiziği ve teknolojisi çalışmaları tanıtılmıştır. Her iki projede de sayısal ve deneysel yöntemler tamamlayıcı bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu çalışmalarda ortaya çıkan deneysel verilerin yenilikçi sayısal çalışmaların teyidi için açık olduğu belirtilmiş ve son olarak da 2016 senesi sonunda kurulumu bitecek olan sprej karakterizasyonu laboratuvarında yapılabilecek olan damla hızı ve boyutu ve sprej şekli ölçüm sistemleri tanıtılmıştır.



Sprej nozulu içindeki çok fazlı akış



Damlanın sola doğru hareket eden süperhidrofilik bir yüzeye çarpması sonucu ortaya çıkan uzama, parçalanma ve zıplama

## Çok amaçlı fizik simülasyon platform oluşumu

Eray Uzgören ([uzgoren@metu.edu.tr](mailto:uzgoren@metu.edu.tr))

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Kampüsü,  
Güzelyurt, KKTC

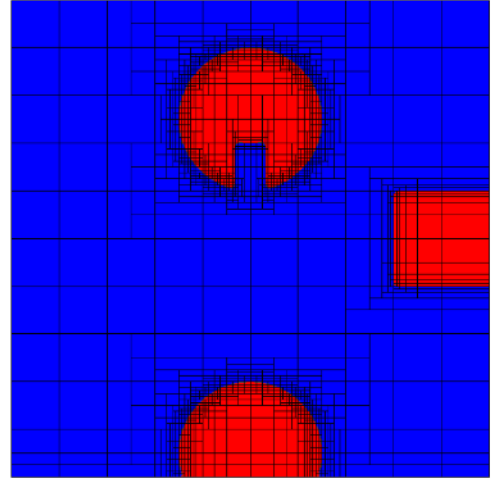
Bu sunum, geliştirilmesi süregelen ‘girdap’ adlı bir HAD (CFD) kodu için planlanan stratejileri içermektedir. ‘girdap’, birbirlerini iki yönlü etkileme yetisine sahip ağların üzerinde farklı cebirsel ve/veya diferansiyel denklem grupları çözümünü hedeflemektedir. Kullanıcı kitlesi araştırma ve eğitim ile ilgili kişiler olduğu düşünülerek; nesne tabanlı ve açık kaynaklı yerel C++ kütüphanesi oluşturulmaktadır. *girdap*’ın öncelikleri (1) sayısal doğruluk, (2) esneklik, ve (3) okunabilirlik olarak belirlenmiştir.

Sayısal doğruluk için belirlenen strateji kendisini çözüme uyarlayabilen ağ nesnelere oluşturmaktır. Ağa dayalı sayısal simülasyon yöntemlerinin ana sorunu, ağın akışta bulunan ölçekleri çözümleyemediği durumlarda, sayısal yöntemin hassasiyetinden bağımsız hatalı sonuçlara sebep olabilmesidir. Bu sorun zamana bağlı problemler için çözüme uyarlayabilen ağlar kullanıldığında giderilebilir ve bu şekilde daha hızlı sonuç elde edilebilir. Özellikle çok amaçlı fizik simülasyon araçları birçok seviyede uzunluk ölçeğini aynı anda barındırdığı için çözüme ve geometriye bağlı ağ yapılandırmaları, birçok fiziksel problemi bir arada çözmeye imkan sağlayacağı öngörülmektedir.

Hareket edebilen ve akış sonucu deforme olabilen cisimlerin bulunduğu akışlarda farklı bölgeler farklı matematiksel yöntemlerle ifade edilmesi ve bu bölgeler için farklı değişkenler kullanılması gerekebilir. Ayrıca aynı problem içerisinde farklı sadeleştirmeler sonucunda farklı boyutlarda etkileşen bölgeler oluşabilir. Bunların hepsini bir algoritma ile çözmenin mümkün olamayacağı düşünülerek, girdap ham haliyle kütüphane bırakılması planlanmaktadır. Nesne özelliklerini ve biçimlendirmelerini kullanıcılar kendi ana programlarından çağırarak girdap kütüphanesinden yararlanmalarını sağlamak, kullanıcılara esneklik sağlayacaktır. Ayrıca girdap, dinamik sınır koşulları tanımlamaya da izin vermektedir.

Son olarak, farklı kullanıcıların daha önce yapıları ileri götürebilmesi ancak ve ancak kodun iyi anlaşılması ile mümkün olabilir. Nesne tabanlı programlar, nesnelere özellikleri ile özdeşleşebildiklerinden, normal programlama yöntemlerine göre daha kısa ve anlaşılır olabilirler. Denklemler ve sınır koşullarını belirtmek neredeyse, sadece denklemleri yazma şekline indirgenebilir. Bu da üretkenliği artıracığı düşünülmektedir.

*girdap* programını dileyen herkes kullanabilir, değiştirebilir, ve dağıtabilir. Programın kendisine ve kullanım kılavuzuna <http://uzgoren.github.io/girdap/> adresinden ulaşılabilir.



*Geometriyi tanımlayan sayıl fonksiyon kullanılarak uyarlanmış ağ örneği*



## Hesaplama yöntemlerle ses-üstü akış

**Bayram Çelik** ([celikbay@itu.edu.tr](mailto:celikbay@itu.edu.tr))  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

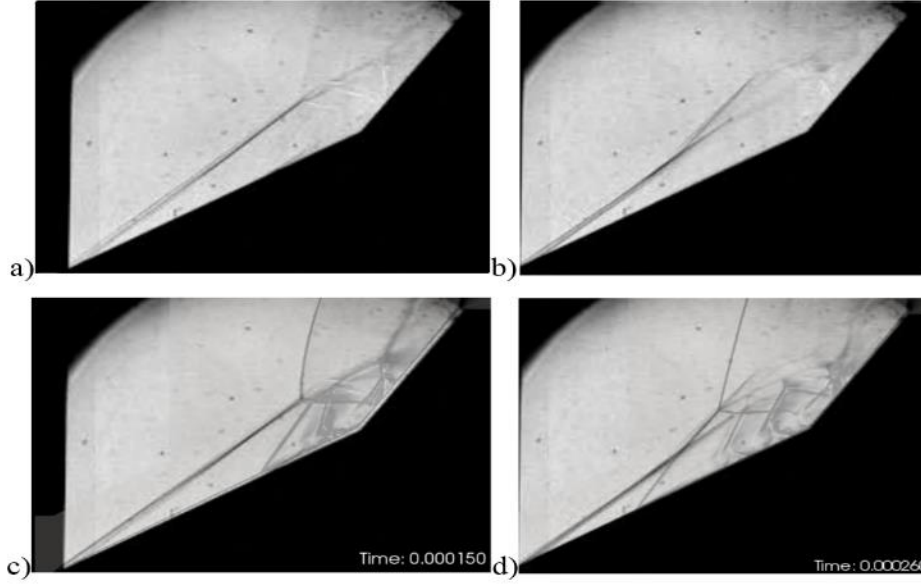
Düz bir levha üzerindeki laminar sınır tabakaya çarpan bir şok dalgası, ani basınç artışı meydana getirerek sınır tabakanın ayrılmasına ve deformasyona uğramasına sebep olabilmektedir. Şokun sebep olduğu ani basınç, sıcaklık, ve yoğunluk artışı gibi bozuntular sesüstü bölgede sadece akım altına iletilirken, sınır tabakanın ses-altı bölgesinde ise bu etki akım üstüne doğru da ilerleyebilmektedir. Bu sebeple, bir şok dalgasının sebep olduğu bozuntuların doğru şekilde temsili, hem ses-üstü hem de ses-altı akışın gerçekçi bir şekilde modellenmesi ile mümkün olabilmektedir. Şok-sınır tabaka etkileşimi problemlerinin yer koşullarında oluşturulması ve gerekli ölçümlerin yapılması hedeflendiğinde ise, test odasının fiziksel kısıtları sebebiyle, küçük modeller üzerinde çok kısa zaman dillimlerinde ölçüm alabilme zorluğu ortaya çıkabilmektedir. Bu zorluklar dikkate alındığında, şok-sınır tabaka etkileşimi problemlerinin meydana getirdiği karmaşık mekanizmanın, var sa deneysel sonuçların hesaplamalı sonuçlarla birarada değerlendirilmesi ile daha iyi anlaşılabilirliği değerlendirilebilir.

Şok-sınır tabaka etkileşimi problemleri, tıpkı karmaşık problemlerin basit bölgeler için analitik olarak çözülmesi örneğinde olduğu gibi, jenerik geometriler etrafındaki akışa ait parametrelerin sistematik bir şekilde değiştirilmesi yoluyla incelenebilmektedir. Burada sonuçları paylaşılan problem de böyle bir çalışma olup, Mach 7 ile gelen düşük entalpili bir akışın sırasıyla 30° ve 55°'lik sapma açılına sahip bir iki-açılı rampa üzerindeki akışını konu almaktadır. Söz konusu akış deneysel olarak incelenmiş ve akışa ait Schlieren görüntüleri ile ortalama yüzey sıcaklık dağılımları ilk 300 ms için elde edilmiştir [Swantek 2012]. Bu deney sonuçlarını temel alarak yürüttüğümüz bir hesaplamalı çalışma kapsamında elde ettiğimiz yüzey ısı transferi dağılımları ve şok davranışı deneysel çalışmalarla kıyaslanmıştır (bakınız Şekil 1). [Durna 2016]. Şekil 2'de, elde ettiğimiz yoğunluk gradyanları başka bir hesaplamalı çalışma ile de karşılaştırmalı olarak verilmiştir [Komives 2014].

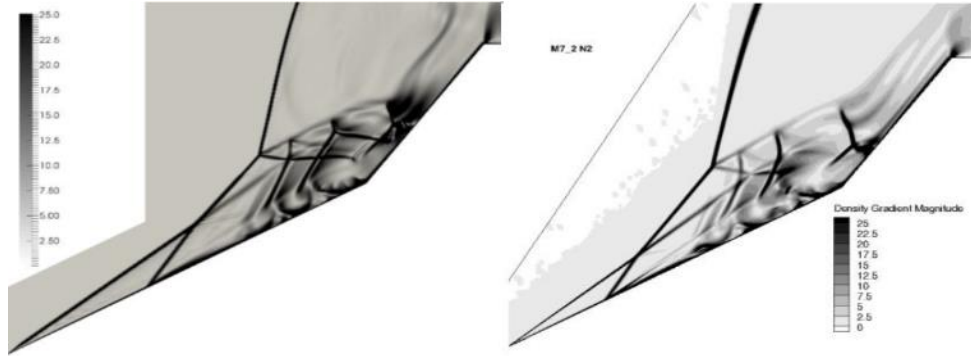
Elde edilen sonuçların deneysel ve hesaplamalı çalışmalarla doğrulanmasının ardından ikinci rampa açısının farklı değerleri için şok sınır tabaka etkileşimi incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda sıkıştırma köşesindeki baloncukun şekli ve konumuna bağlı olarak üçlü noktadan çıkan iletilen şokun çarpma noktasının, dolayısıyla şiddetinin değiştiği gözlemlenmiş ve bu davranışın şok etkileşim mekanizmasında önemli bir parametre olduğu görülmüştür. İletilen şokun çarpma noktasının akım doğrultusundaki hareketi ikinci açı için belirlenen eşik değerleri aşılnca yön değiştirmekte ve bu sebeple de iletilen şokun sebep olduğu ayrılma baloncukunun sıkıştırma köşesine doğru hareketi söz konusu olmaktadır. Sıkıştırma köşesine doğru hareket eden ayrılma baloncukunun meydana getirdiği bozuntu akım üstünü de etkileyerek rampanın ilk duvarı üzerinde yeni baloncukların oluşmasına sebep olmakta ve ses altı bölgede karmaşık bir etkileşim söz konusu olmaktadır. Bunun doğal bir sonucu olarak deformasyona uğrayan kayma tabakası yeni şok ve genişleme dalgaları meydana getirmektedir.

Yukarıdaki paragrafta kısaca özetlenen ve detayları Kaynak [Durna 2016]'ta verilen problemde olduğu gibi karmaşık şok-sınır tabaka etkileşim mekanizmalarını hesaplamalı olarak inceleyebilmek için yeni bir sonlu hacimler Navier-Stokes çözücüsü geliştirilmektedir. Yürütmekte olduğumuz çalışmalar, analizlerde kullanılacak hesaplamalı yöntemin şok ve sınır tabaka için birbirinden tamamen farklı nitelikteki hesaplama ağlarına ihtiyaç duyduğunu göstermiştir. Örneğin şok civarında açıklık oranı 1 mertebesinde olan

elamanlara ihtiyaç duyulurken, ayrılmamış sınır tabakayı temsil eden ağın 10-100 mertebesinde olmasının daha gerçekçi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, zamana bağlı olarak hareket eden şok ve deformasyona uğrayan kayma tabakasının temsili için adaptif bir şekilde değişen bir hesaplama ağına ihtiyaç duyulduğu ortaya çıkmıştır. Henüz daimi ve daimi olmayan akışlar için ön sonuçlar elde ettiğimiz çözücünün, burada sonuçları kısaca özetlenen çalışmaların işaret ettiği eksiklikleri ortadan kaldıracak yeteneklerle donatılması planlanmaktadır.



Şekil 1.  $t=150$  ve  $260$  ms anlarındaki deneysel sonuçlar (a ve b) ve deneysel sonuçlarla üstüste bindirilmiş hesaplamalı sonuçlar (c ve d)



Şekil 2.  $t=270$  ms anındaki şok yapısının bir başka hesaplamalı çalışma ile karşılaştırılması

## Kaynakça

1. A. Swantek, "The role of aerothermochemistry in double cone and double wedge flows," Ph.D. thesis (University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012).
2. Durna A.S., Elhadj Ali Barada M., Celik B., "Shock interaction mechanisms on a double wedge at Mach 7", Physics of Fluids, 2016, 28, 096101
3. J. Komives, R. I. Nompelis, and G. V. Candler, in 44th AIAA Fluid Dynamics Conference (AIAA, Atlanta, GA, 2014).

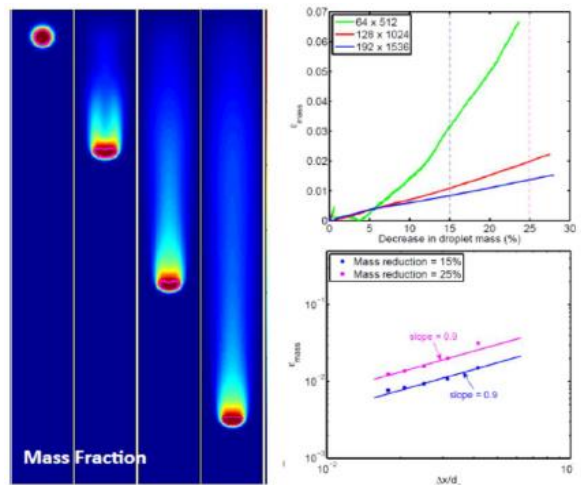
## Damlacık buharlaşması ve yanmasının sayısal modellenmesi

Metin Muradoğlu (mmuradoglu@ku.edu.tr)

Koç Üniversitesi, İstanbul

Bu çalışmada damlacık buharlaşması ve yanmasının doğrudan simülasyonu için etkin bir ara-yüz izleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu amaçla tek-alan yaklaşımı ile kütle, momentum, enerji ve bileşenlerin kütle korunum denklemleri birbirine bağlı olarak ve hep birlikte ara-yüz izleme yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Her iki fazın da sıkıştırılmaz olduğu kabul edilmiş ama faz-değişimi/kütle-transferini hesaba katmak amacıyla ara-yüzey civarında hızın divarjansının sıfır olması (sıkıştırılmazlık şartı) modifiye edilmiştir. Hem sıcaklık farkı hem de konsantrasyon farkı nedeniyle oluşan buharlaşma proseslerinin doğrudan simülasyonları yapılmıştır. Sıcaklık farkı nedeniyle oluşan buharlaşmanın sayısal modellenmesinde ara-yüzeyde meydana gelen kütle miktarı hesaplanırken buharlaşma sıcaklığının sabit olduğu varsayılmıştır. Sıcaklık ara-yüzeyde sürekli olduğundan bu modelin sayısal olarak çözülmesi nispeten kolaydır. Konsantrasyon farkı nedeniyle oluşan buharlaşmada ara-yüzeyde oluşan kütle transferinin hesaplanmasında Clasius-Capeyron denge bağıntısı kullanılmıştır. Buhar konsantrasyonu sadece damlacığın dışında tanımlı olduğundan bu yöntemde buhar konsantrasyonu ara-yüzeyde süreksizdir ve dolayısıyla sayısal olarak modellenmesi çok daha zordur. Bu zorluğu aşmak için daha önce çözülebilir yüzey aktif maddesinin ara-yüzey ile ana akışkan arasındaki kütle transferini hesaplamak için Muradoğlu ve Tryggvason (2008) tarafından kullanılan yöntem benzer bir metot kullanılmıştır. Ara-yüzeydeki kütle transferi sınır şartını sağlamak için iki farklı yöntem geliştirilmiş ve performansları kıyaslanmıştır. Sayısal yöntemin doğruluğu çok sayıda basit model faz değişimi problemi kullanılarak gösterilmiştir. Daha sonra ise sayısal yöntem statik haldeki ve yerçekimiyle düşen bir damlacığın buharlaşması problemlerine uygulanmış, toplam kütle korunumu ve çözüm ağı yakınsamasının başarıldığı gösterilmiştir. Yöntem ayrıca bir biriyle etkileşim halinde düşmekte olan iki damlacığın buharlaşması problemine de uygulanmıştır. Yandaki şekilde yerçekimi etkisiyle düşmekte olan damlacığın buharlaşması, toplam kütle korunumu ve çözüm ağı yakınsaması gösterilmiştir. Son olarak buharlaşma sonrası damlacığın

yanmasını da simüle etmek amacıyla sayısal yöntem kimyasal reaksiyon modülü de eklenmiştir. Bu amaçla Chemkin yazılımı kullanılmış ve n-haftan damlacığının buharlaşması ve yanması model problem olarak alınmıştır. Yanma için çok basit tek-adım ve iki-adım kimyasal kinetik modelleri kullanılmıştır. Bu kimyasal modeller kimyasal reaksiyonu gerçekçi bir şekilde temsil etmekten uzak olmakla birlikte sayısal yöntem açısından gerekli bütün bileşenleri ihtiva etmektedir. Sayısal yöntem esas itibarıyla bitirilmiş olup halen doğrulama testlerine devam edilmektedir. Bu aşamadan sonra sayısal yöntem özellikle Diesel yakıtların enjekte edilmesi, yakıt jetinin damlacıklara bölünmesi ve yanması proseslerinin doğrudan simülasyonunu yapmak için kullanılacaktır.



(Solda) Yerçekimi etkisiyle düşmekte olan bir damlacığın buharlaşması. (Sağda) Toplam kütle korunumu ve çözüm ağı yakınsaması.

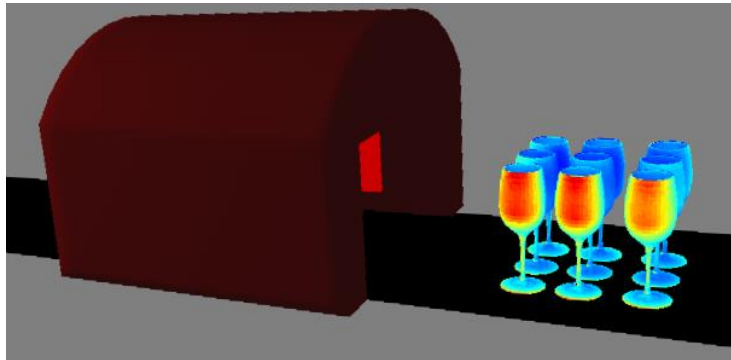
## Grafik Kartları üzerinde Monte Carlo ışın izleme ile termal radyasyon modelleme

Altuğ Melik Başol (altug.basol@ozyegin.edu.tr)  
Özyeğin Üniversitesi, İstanbul

Endüstride kullanılan ısıtma fırınlarında termal radyasyon etkisi ile ısı aktarımı çok baskın bir etkiye sahiptir. Bu bakımdan termal radyasyonun olgunun fiziğini en doğru yansıtabilecek şekilde hesaplanabilmesi fırın performansları için çok önemlidir. Monte Carlo ışın izleme metodu termal radyasyon denklemlerini literatürde en doğru şekilde çözdüğü bilinen sayısal metot olsa bile bu yaklaşımın çok yüksek işlem gereksinimi onun karmaşık problemlerin çözümünde kullanılmasının önünde büyük engel teşkil etmiştir. Bu çalışma, modern grafik işlemcilerinin hesaplama gücünü kullanarak Monte Carlo yönteminin hesaplama hızını arttırmaya ve bu sayede daha gerçekçi problemlerin çözümünde kullanılmasının önünü açmaya odaklanmıştır. Geliştirilen yazılım analitik çözümü olan görüş açısı problemleri üzerinde doğrulanmış ve saniyede izlenebilen ışın sayısı iki farklı grafik kartı üzerinde test edilmiştir. Tablo 1’de gösterildiği gibi çok düşük maliyetli dizüstü bilgisayar grafik kartları bile saniyede 5 milyonun üzerinde ışını izleyebilecek kapasiteye sahiptir. Oyun endüstrisi için geliştirilmiş olan daha ileri düzeydeki ekran kartları ise saniyede 250 milyon ışını izleyebilmektedir. Hareketli nesnelere üzerindeki görüş açısı hesaplama problemi saniyeler içinde grafik kartları üzerinde çözülebilmektedir. (Şekil 1) Projenin ileriki aşamalarında hareketli (kontüne) ısıtma fırınlarındaki ısıtma işlem analizini zamana bağlı olarak gerçekleştirebilecek hızlı ve hassas bir yazılım geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Tablo 1. Grafik kartı işlemcilerinin görüş açısı hesaplama probleminde sundukları performans

Grafik kartı	Saniyede İzlenen Işın Sayısı (Milyon)	Yaklaşık Fiyat (\$)
Düşük seviye dizüstü grafik kartı (Nvidia GeForce 610M)	5.2	50
İleri seviye masaüstü bilgisayar grafik kartı (Nvidia GeForce TitanX)	250	1000



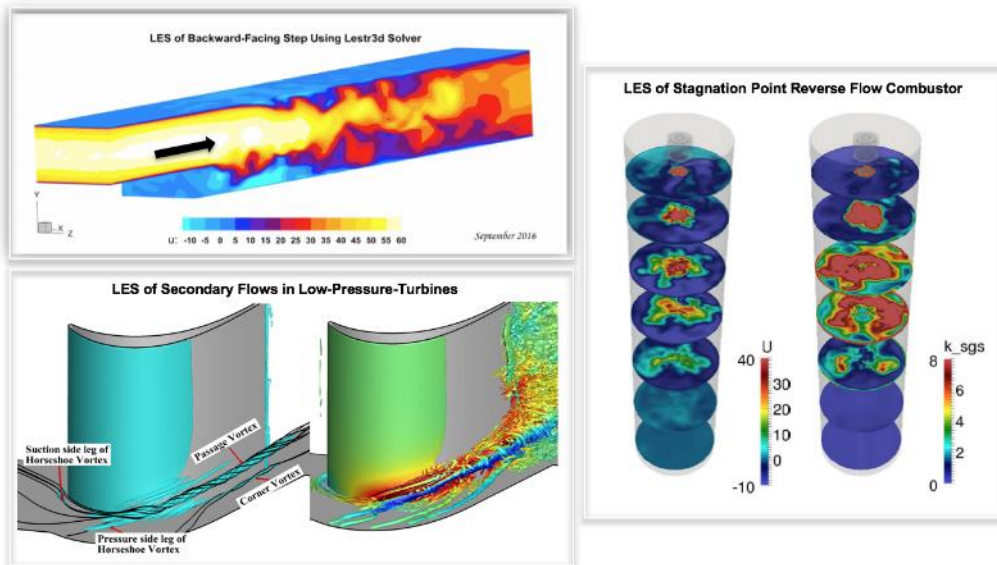
Şekil 1. Örnek bir cam eşya ısıtma fırını içindeki cisimlerin görüş açıları hesaplaması

## Türbülanslı akışların sayısal analizi

Ayşe Gül Güngör (ayse.gungor@itu.edu.tr)

İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Havacılık ve uzay endüstrisinde karşılaşılan akışlar, karmaşık geometriler etrafında, üç-boyutlu, zamana bağlı olarak değişen türbülanslı akışlardır. Modern bilgisayarların sunduğu yüksek başarılı paralel hesaplama olanakları bu tip karmaşık problemlerin çözümünün hassas bir şekilde yapılabilmesini sağlamaktadır. İTÜ Akışkanlar Mekaniği Araştırma Merkezindeki türbülans grubunun yürüttüğü çalışmalar, gaz türbinlerinin tasarım aşamasında karşılaşılan kompleks türbülanslı akışları LES (Large-Eddy Simulation) yöntemi ile incelenmesi üzerinedir. LES yönteminin potansiyel olarak zamana bağlı akışları daha doğru modelleyebildiği literatürde birçok çalışma ile gösterilmiştir. Grubumuzda yürüttüğümüz çalışmalar, açık kaynaklı yazılım kullanılarak LES'in çözüm yeteneklerinin kompleks problemlerde incelenmesi ve özgün modüler bir LES akış çözücüsü geliştirilmesi üzerinedir. Bu çalışma kapsamında türbülanslı akışların çözümü için geliştirilen LES metodolojisi ve **Lestr3d** yazılımı sunulacaktır. **Lestr3d**; ses altı sıkıştırılabilir türbülanslı akışları LES yöntemi ile yapısal olmayan ağlarda çözümlenmek üzere geliştirilen FORTRAN programlama dilinde, MPI kütüphaneleri kullanılarak paralelleştirilen bir yazılımdır. Hesaplama ağları METIS yazılımı ile parsellenmektedir. Uzaysal türevler için ikinci mertbe merkezi fark formülasyonu, zaman integrasyonu için açık formülasyonlu beşinci mertbe Runge-Kutta şeması ve türevlerin hesaplanması için ise Green-Gauss yöntemi kullanılmıştır. Sınır koşulları gerçek akış alanı çevresine yerleştirilen hayali hücreler ile uygulanmaktadır. Navier-Stokes denklemlerinin uzayda filtrelenmesi sonucu ortaya çıkan grid-altı gerilme tensörünün hesaplanmasında Smagorinsky modeli kullanılmaktadır. Ters basamak üzerindeki akış; serbest kayma akımı, kararsızlık, ayrılma, yüzeye yapışma vb. gibi konuların anlaşılması açısından önemli bir çalışma olması sebebiyle **Lestr3d** yazılımının doğrulanması ve ölçeklenebilirliğini göstermek amacıyla test edilen ilk problemdir. Bu akışın sergilediği fiziksel mekanizmalar, havacılık ve uzay endüstrisinde karşılaşılan flaplı kanat profilleri üzerindeki akış, helikopter yanma odası içerisindeki akış, gaz türbinlerindeki akış ve benzer akış problemleri ile oldukça benzerlik göstermektedir.



## Petrol rezervuarlarının sayısal ve veri-bazlı modellemesi

**Emre Artun** ([artun@metu.edu.tr](mailto:artun@metu.edu.tr))

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Kampüsü,  
Güzelyurt, TRNC, Mersin 10

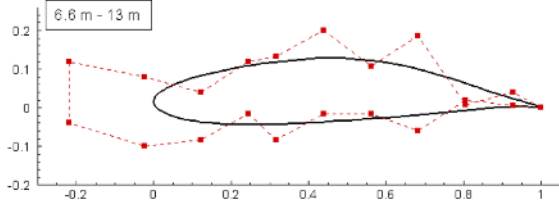
Petrol rezervuarlarının modellemesi, rezervuar sisteminde bulunan geçirgen ve gözenekli ortamlarla birlikte sıvıların yeryüzüne üretimi için açılan kuyular ve yeryüzündeki ekipmanların akış davranışlarını temsil edebilen bir modelin oluşturulmasını kapsar. Petrol ve doğalgaz fiyatlarındaki dalgalanmalar, derin sular, konvensiyonel olmayan kaya gazı rezervuarları gibi operasyon yönünden zorlu ortamlarda, üretimin verimli olması için alınan kararların doğruluğu açısından rezervuar modellemesi çok önemlidir. Gözenekli rezervuardaki akışı tanımlayan denklemler taşıma denklemi olan Darcy denklemi, kütle korunumu yasası ve akışkan özelliklerinin basınca göre değişimini tanımlayan denklemlerin birleştirilmesiyle ortaya çıkar. Bu denklemler, rezervuarda zamana ve yere göre değişken özellikleri içerdiğinde analitik yöntemlerle çözülemez ve sayısal modelleme yöntemleri gerekir. En basit sayısal rezervuar modelleme yöntemi, sıcaklığın sabit kabul edildiği rezervuarlarda petrol, gaz, ve suyun 3-fazlı akışın modellendiği yöntemdir. Fazlar arası kütle transferi olan durumlar ve sıcaklığın çok doğal olarak değiştiği veya yapay olarak değiştirildiği durumlar için, termal ve kimyasal bileşenlerin akışını tanımlayan denklemler de sisteme eklenir. Bu denklemler, sayısal olarak çözüldüğünde, petrol mühendisleri için tasarım ve karar vermede önemli olan zamana ve yere göre basınç, doygunluk, ve kuyuların hacimsel üretim/enjeksiyon hızları elde edilir. Kapsamlı bir sayısal modelleme çalışması, zaman, hesaplama, bilgisayar elemanları ve insan kaynakları açısından çok emek gerektirir. Bu nedenle, kapsamlı modellere alternatif olarak veri-bazlı modeller de kullanılabilir. Veri-bazlı modeller, belli bir sayıda durumun kavramsal bir sayısal model kullanılarak çalıştırılması sonucunda toplanan performans belirleyici parametrelerin, modele tanımlanan parametrelerle ilişkisini öğrenme yoluyla anlayan ve bunu tahminler için kullanan modellerdir. Gerçek saha verilerinin de eklenmesiyle bu modeller sayısal modellere yakın bir kesinlikte sonuçları çok kısa bir sürede (1 saniyeden bile kısa) sağlayabilir. Bu sunumda yakın zamanda tamamlanan ve bu yollarla oluşturulan 2 tane veri-bazlı model sunulmuştur. Birincisi hidrolik çatlaklı bir kuyuda dönüşümsel olarak karbon dioksit ve nitrojen gazlarının enjeksiyonu sonucu üretim artışını tahmin eden bir modeldir. İkincisi ise düşük geçirgenli kumtaşlarında, yatay ve çok sayıda hidrolik çatlaklı bir kuyu kullanılarak üretilen doğal gaz hacmini tahmin eden bir modeldir. Bu modeller, pratik olandan daha fazla hesaplama gerektiren sayısal problemlerde, belli kesinlikte sonuçları alabilmek için çok kullanışlı olabilirler. Gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasında: Türkiye'deki jeotermal enerji sektörünün önemini düşünerek bu alanda performans tahmini kolaylaştıran, kaya gazı ve petrolünün karmaşık jeolojisi nedeniyle bu tarz rezervuarlarda akışı tanımlayan sayısal ve veri-bazlı modellerin geliştirilmesi bulunmaktadır.

## Döner kanat aerodinamiği ve HAD simülasyonları

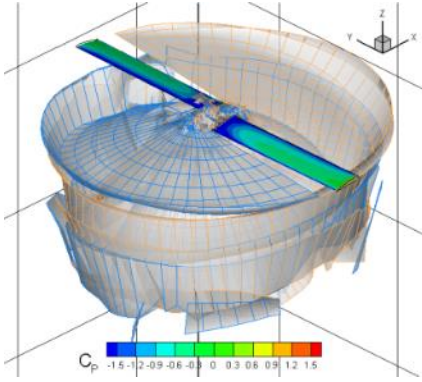
**Nilay Sezer Uzol** ([nuzol@metu.edu.tr](mailto:nuzol@metu.edu.tr))  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Döner kanat aerodinamiği; pervane, helikopter rotoru, rüzgar türbini rotoru gibi dönen palaların etrafındaki akışların üç boyutlu, zamana bağlı, ayrılmış, girdaplı, türbülanslı karmaşık akışlar olmasından dolayı halen çözülmesi ve anlaşılması oldukça zor problemlerdendir. Döner kanatların aerodinamik tasarımı, pala kesiti ve rotor etrafındaki akış karakteristiklerinin iki boyutlu ve üç boyutlu olarak deneysel ve sayısal incelenmesi ve rotorun aerodinamik performansının farklı çalışma koşulları altında incelenmesi konusundaki çalışmalar, hem endüstrideki yenilikçi tasarım projelerinde hem de akademik araştırmalarda farklı doğruluktaki yaklaşımlarla devam etmektedir. Pala elemanı momentum teorisine dayalı en basit yöntemlerden, serbest iz bölgesi panel/girdap metotlarından, ilk prensiplerle fizik tabanlı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonlarına kadar farklı yaklaşımlarla döner kanatların tasarım ve performans analizleri yapılabilmektedir. Bu tür döner kanat problemlerinin oldukça karmaşık ve pahalı HAD analizlerinin yapılması paralel bilgisayarlarda paralel kodlarla Yüksek Başarımlı Hesaplama (YBH) da zorunlu kılmaktadır. Rotor akışlarındaki uç kayıpları, iz bölgesi etkileşim ve kayıpları, dinamik tutunma kaybı ve dönme etkileri gibi nedenlerle döner kanatların zaten karmaşık akışlarına ek olarak çalışma koşulları da bu akış problemlerini daha da zorlaştırmaktadır. Örneğin, helikopterler için ana rotor/kuyruk rotoru etkileşimleri, ana rotor/gövde etkileşimleri, ileri uçuş ve manevra uçuş koşulları, yer etkisinde uçuş, farklı helikopterlerin birlikte uçuşu, gemiye iniş gibi durumlar ve simülasyonlar için doğru ve hızlı aerodinamik modellerin geliştirilmesi ihtiyacı daha doğru döner kanat aerodinamik analizlerini gerektirmektedir. Diğer taraftan yenilenebilir enerji kaynaklarının artan önemi rüzgar türbinlerinin ve rüzgar çiftliklerinin sayılarının artmasına sebep olmaktadır. Rüzgar türbinleri için yenilikçi rotor tasarımları ve akış kontrol yaklaşımları, rotor/kule/iz bölgesi etkileşimleri, rotor/atmosferik sınır tabaka etkileşimleri ve çiftliklerde rotor/rotor etkileşimleri de daha doğru, karmaşık ve pahalı rotor akış analizlerini gerektirmektedir.

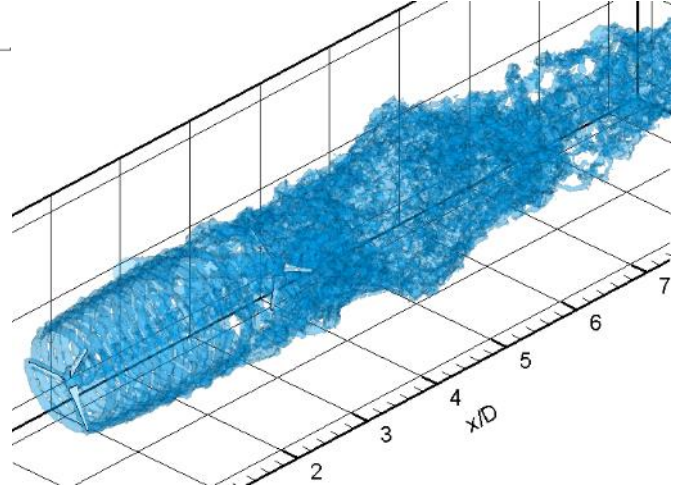
ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği'nde ve RÜZGEM'de yapılan çalışmalar arasında rüzgar türbini ve helikopter rotoru palalarının aerodinamik tasarım ve optimizasyonu [1-3], özgün panel metot/serbest iz bölgesi kodları ile rotor akış analizleri [4-5] ve detaylı hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları bulunmaktadır [6-7]. Ayrıca, yer etkisi, gemi, deniz üstü platformlar ve yüksek binalar etrafındaki karmaşık akışların incelenmesi, ve döner kanatların bu tür karmaşık akışlar içindeki performanslarının tahmini ve akışlarının incelenmesi de yapılan diğer çalışmalarımız arasındadır. Bu tür analizlerde özgün kodların kullanılması ve geliştirilmesi de önemli olduğundan yapılan tez çalışmalarında özgün BEM, Panel ve HAD kodları geliştirilmektedir (AeroBEM, AeroSim, FlowSim). Zamana bağlı türbülanslı akışların çözümü pahalı hesaplamalar gerektirdiğinden bu analizlerdeki paralel HAD hesaplamaları RÜZGEM YBH Laboratuvarı'ndaki küme bilgisayarlarda yapılmaktadır. Kullanılan özgün Panel kodları da, GPU kullanılarak hızlı hale getirilmiştir.



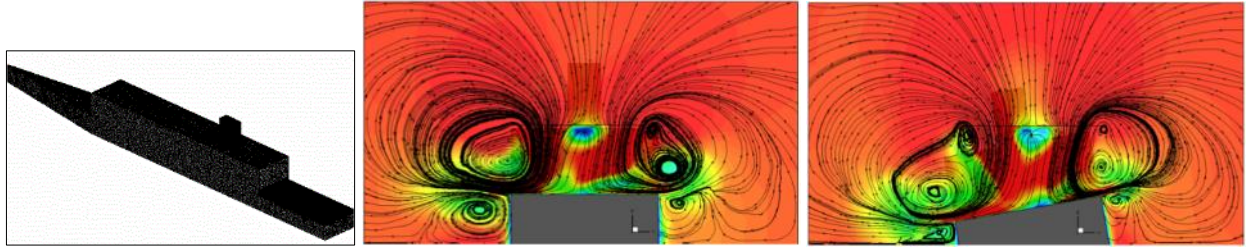
Şekil 1. Rotor pala kesiti optimizasyonu



Şekil 3. Helikopter rotoru panel metodu analizleri



Şekil 2. İki rüzgar türbini etkileşimi panel metodu analizleri



Şekil 4. Basit gemi modeli etrafında iz bölgesi akış HAD simülasyonları: Düz ve eğik gemi ve helikopter rotor modeli etkileşimleri

### Kaynakça

1. Özlem Ceyhan, MS Thesis, METU Aerospace Engineering, Sept 2008
2. Özge Polat, MS Thesis, METU Aerospace Engineering, Dec 2011.
3. O. Polat, N. Sezer-Uzol, İ. H. Tuncer, AHS Paper, May 2014.
4. N. Sezer-Uzol, O. Uzol, Wind Energy, Jan 2013.
5. M. Turkal, Y. Novikov, S. Usenmez, N. Sezer-Uzol, O. Uzol, Torque Paper, June 2014.
6. Monier A. Elfarra, PhD Thesis, METU Aerospace Engineering, Jan 2011.
7. Ezgi Orbay, MS Thesis, METU Aerospace Engineering, Sept 2016.

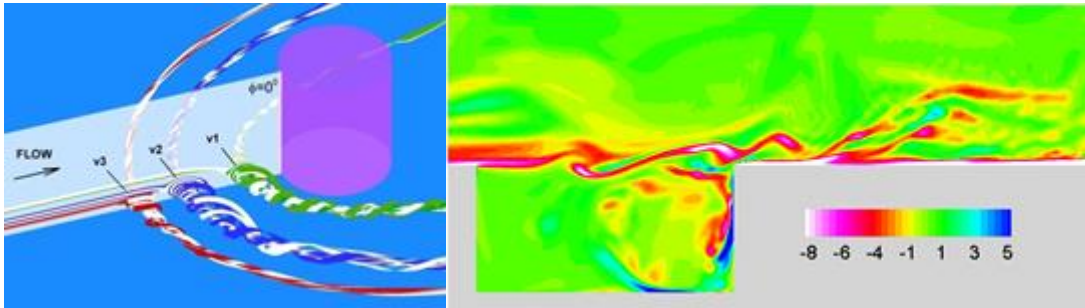


## Jeofiziksel akışların büyük Eddy benzetimi

Gökhan Kirkil ([gokhan.kirkil@khas.edu.tr](mailto:gokhan.kirkil@khas.edu.tr))

Kadir Has Üniversitesi, İstanbul

Jeofiziksel ve çevresel akışlar, genel olarak yüksek Reynolds sayısına (Re) sahip, türbülansın yoğun olarak gözlemlendiği akışlardır. Bu tür akışlara örnek olarak, nehir, okyanus ve atmosfer akışları; nehirlerde katı madde taşınımı; tuzluluğa ve sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimlerinin akışa etkileri gösterilebilir. Bu tür problemlerde sıvı akışına ait hız, basınç gibi temel değişkenlerin yanında; sıcaklık, kirlenici, oksijen ve besin parçacıkları gibi yaşamın devamı için gerekli olan diğer fiziksel değişkenlerin de zamansal ve uzaysal dağılımlarının yüksek doğruluklu belirlenmesi gerekmektedir. Türbülanslı bir akışta, büyük ölçekli girdaplar türbülans kinetik enerjisinin (tke) taşınması; küçük ölçekli girdaplar ise tke'nin parçalanmasından sorumlu akış yapılarıdır. Enerji taşıyan büyük ölçekler, küçük ölçeklere bölünerek enerji transferi gerçekleşir ve küçük ölçekler türbülansı sönmümler. Akışta türbülans üretimi genelde akış geometrisinden kaynaklanırken (sınır koşulları, yüzey pürüzlülüğü ve engeller vs.), türbülans sönmümlenmesi küçük ölçekler tarafından gerçekleştirilir. Türbülanslı akışların sayısal simülasyonlarında en doğruluklu yaklaşım, enerji spektrumu üzerinde yer alan bütün ölçeklerin çözülmesidir. Hesaplama maliyeti yüksek olan bu yaklaşım, DNS (Direct Numerical Simulation) olarak adlandırılır ve yüksek uzaysal çözünürlük gerektirir. Hesaplama maliyeti en düşük olan yaklaşım ise RANS (Reynold-averaged Navier Stokes) yaklaşımıdır. RANS yaklaşımında, zamansal filtremeden geçirilen Navier-Stokes denklemleri, DNS'e göre daha düşük çözünürlükte uzaysal bir grid üzerinde çözülerek denklemlerinin uzun süreli ortalama hız ve basınçları hesaplanır. Öte yandan, Navier-Stokes üzerinde uzaysal filtre kullanan Large Eddy Simulation (LES) yaklaşımı, akış içindeki grid tarafından çözülebilen büyük ölçekli girdapları çözer ve grid altında kalan ölçeklerini modeller. RANS ve LES yaklaşımlarının bir karışımı olan DES (Detached Eddy Simulation) yaklaşımı ise katı sınırlara yakın bölgede RANS, katı sınırlardan uzaktaki bölgede ise LES kullanan hibrid bir modeldir. Bu sunumda, DES ve LES modellerini ve bunların akış problemlerine uygulamalarını inceleyeceğiz.



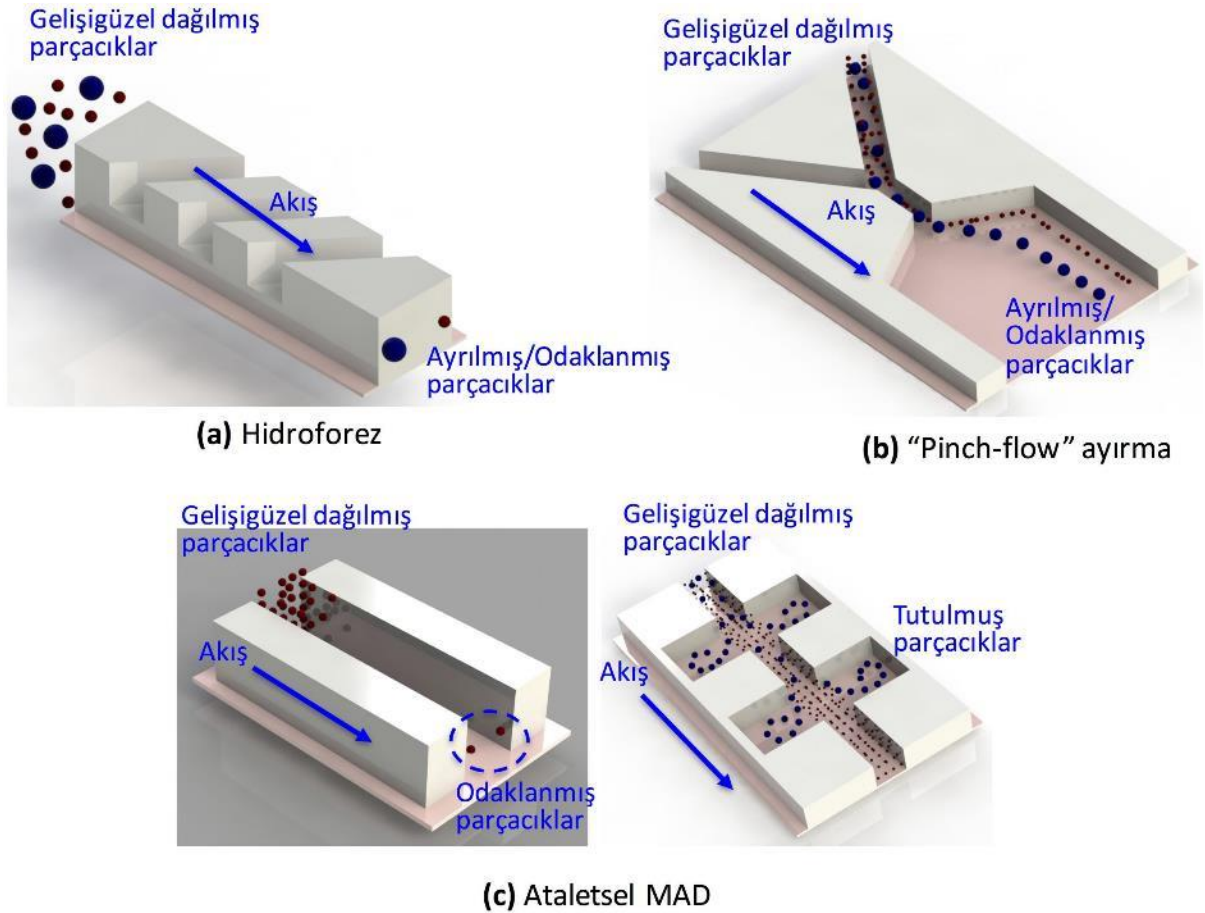
Yere yapışık bir silindir bağlantı bölgesinde ve dikdörtgen bir oyuk etrafında oluşan girdaplar.

## Mikro-akışkanlar-dinamiği uygulamaları için parçacık hareketinin modellenmesi

Barbaros Çetin ([barbaros.cetin@bilkent.edu.tr](mailto:barbaros.cetin@bilkent.edu.tr))

İ.D. Bilkent Üniversitesi, Ankara

Mikro-akışkanlar-dinamiği (MAD) uygulamalarındaki en önemli bileşen mikro-kanallar içerisinde biyo-parçacıkların hareketinin manipüle edilmesidir. Parçacıkların mikro-kanallarda manipüle edilmesinde sadece kanal geometrisi ve akış kullanan pasif, hidrodinamik yöntemler (Şekil 1) olduğu gibi parçacıklar üzerine elektrik, akustik, manyetik ve/veya optik gibi harici bir kuvvet uygulayan aktif yöntemler de mevcuttur (Çetin vd., 2014). Bu tür yöntemlerin kullanıldığı MAD platformlarının tasarlanabilmesinde mikro-kanal içerisindeki değişik boyutlardaki ve değişik şekillerdeki parçacıkların hareketlerinin modellenmesi çok önemlidir. Parçacık hareketi, parçacığın mikro-kanal içerisindeki akış alanı, elektrik alan, akustik alan, manyetik alan ve/veya optik alan ile etkileşimi sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1: Hidrodinamik parçacık manipülasyonu

MAD uygulamalarında parçacık hareketinin mikro-kanallarda modellenmesi için temel olarak iki yaklaşım mevcuttur (Çetin ve Li, 2011):

**1. Lagrangian İzleme Yöntemi:** Bu yöntemde parçacıkların akış alanı, elektrik alan veya akustik alan üzerindeki etkisi ihmal edilerek; akış alanı, elektrik ve/veya akustik alan belirlenmektedir. Akış, elektrik ve/veya akustik alanın parçacık üzerindeki etkisi analitik denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu tür analitik denklemler bazı belli başlı parçacık geometriler için literatürde mevcuttur. Örneğin, küresel parçacıkların Stoke's akış rejiminde üzerlerinde oluşan sürüklenme kuvveti literatürde Stoke's denklemi olarak bilinmektedir. Parçacık üzerine etkiyen tüm bu kuvvetler, parçacık için yazılacak Newton'un ikinci kanun denklemi ile parçacığın hızı ortaya çıkan adi diferansiyel denklemi çözümü ile elde edilebilir. Bu yaklaşım parçacık boyutunun kanal boyutuna göre görece küçük olduğu ve parçacık-parçacık etkileşiminin baskın olmadığı seyrek çözeltiler için başarı ile çalışmaktadır.

**2. Gerilim Tensörü Yöntemi:** Bu yöntemde parçacıkların akış alanı üzerindeki etkisini görebilmek için parçacıkların sıvı içerisindeki mevcudiyetleri göz önüne alınarak alan değişkeni çözülmektedir (akış uygulamalarında akış alanı, dielektroforez ve elektroforez uygulamalarında elektrik alan, akustoforez uygulamalarında akustik alan vb.). Parçacık üzerinde oluşan toplam kuvvet parçacık yüzeyindeki gerilim tensörünün integrasyonu ile belirlenebilmektedir. Hacim ayrıklaştırma yapan yöntemlerde (örneğin sonlu eleman yöntemi, FEM) böyle bir yaklaşım çok sayıda tekrar-ayrıklaştırma (re-meshing) gerektirmektedir. Bu sebeple çözüm bölgesinin ayrıklaştırmasına dayalı olan sonlu hacim yöntemi (FVM) ve sonlu eleman yöntemi (FEM) tekrar-ayrıklaştırma işleminin çok sayıda tekrarlanması dolayısı ile hem hesaplama gücü açısından pahalı olmakta hem de her tekrar-ayrıklaştırma basamağında, bazı interpolasyon algoritmalarının kullanım zorunluluğu yüzünden çözüm hassasiyetinin azalmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, parçacık üzerinde oluşan kuvvetler genelde parçacık yüzeyindeki alan değişkenlerinin değişim hızına bağlı olduğu için özellikle kanal duvarına çok yakın ve/veya birbirine çok yakın hareket eden parçacıkların hareketlerinin modellenmesinde dar bölgelerde çok küçük ağ yapılarının kullanılmasını gerektirmektedir. Mikro-kanal ölçüleri ve kullanılan hızlara bakıldığında kanal içerisindeki akış düşük Reynolds sayısına sahip olmaktadır ve akış alanı doğrusal (lineer) bir denklem olan Stoke's denklemiyle ifade edilebilmektedir. Mikro-kanalların içerisine yerleştirilecek olan elektrotlarla oluşturulan elektrik alan doğrusal olan Maxwell denklemiyle modellenilebilmektedir. Doğrusal kısmi diferansiyel denklemleri çözümü için Sınır Eleman Yöntemi (Boundary Element Method, BEM) çok etkin bir alternatif oluşturmaktadır. BEM, FEM ve FVM yöntemlerinin aksine sadece çözüm alanının sınırlarında ağ oluşturmaktadır. Bu yönüyle kanal içerisinde hareket eden parçacığın modellenmesinde hesaplama olarak yük getiren tekrar-ayrıklaştırmaya ve aynı zamanda parçacık hareket ederken çözüm bölgesi içinde bir interpolasyon algoritmasına ihtiyaç duymamaktadır. Benzer şekilde, BEM çözüm bölgesi içindeki türev değerleri elde ederken yarı-analitik bir yöntem kullanır ve bölge içi ayrıklaştırmaya ihtiyaç duymaz. Bu sebeple duvara yakın ya da birbirine yakın olan parçacıkların hareketlerini kolayca ve hassas bir şekilde modelleyebilmektedir.

Bu konuşmada Bilkent Üniversitesi Mikro-akışkanlar-dinamiği ve Çip-üstü-laboratuvar Araştırma Grubu bünyesinde ataletsel MAD (inertial microfluidics) ve akustoforez (Büyükkoçak vd., 2014, Çetin vd., 2016) uygulamalarına yönelik geliştirdiğimiz Lagrange İzleme yöntemi tabanlı hesaplamalı modellerine ve Sınır Eleman Yöntemi tabanlı hidrodinamik (Karakaya vd., 2015) ve elektrik tabanlı parçacık hareketinin modellenmesine yönelik yaptığımız çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Araştırma grubumuz akustoforez uygulamalarına yönelik çalışmalar için TOBB-ETÜ Makina Mühendisliği öğretim üyesi Doç. Dr. Bülent Özer ile, Sınır Eleman Yöntemi tabanlı çalışmalarımız için Atılım Üniversitesi İmalat Mühendisliği öğretim üyesi Yard. Doç. Dr. Besim Baranoğlu ile aktif bir şekilde işbirliği yapmaktadır.

**Kaynakça**

- B. Çetin, D. Li (2011). "Dielectrophoresis in Microfluidics Technology", *Electrophoresis*, 32, 2410-2427
- S. Büyükoçak, M. B. Özer, B. Çetin (2014). "Numerical modeling of acoustophoretic particle separation for microfluidics", *Microfluid. Nanofluid.*, 17(6), 1025-1037
- B. Çetin, M. B. Özer, M. E. Solmaz (2014). "Microfluidic bio-particle manipulation for biotechnology", *Biochem. Eng. J.*, 92, 63-82
- E. Çağatay, M. B. Özer, B. Çetin (2016). "3D Modeling of on-chip acoustophoretic particle manipulation in a polymer microfluidic device", *The 20th Int. Conf. Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2016)*, October 9-13, Dublin, Ireland
- Z. Karakaya, B. Baranoğlu, B. Çetin, A. Yazıcı (2015). "A parallel boundary element formulation for tracking multiple particle trajectories in Stoke's flow for microfluidic applications", *CMES-Comp. Model. Eng. Sci.*, 104(3), 221-249