



Rüzgar-Yapı Etkileşiminin Ön Tasarım Aşamasında Tahminine Yönelik Bir Algoritma

An Algorithm for Estimation of Wind-Building Interaction in the Early Design Stage

İlker KARADAĞ, Nuri SERTESER

ÖZ

Yapı - rüzgar etkileşimi, üç yaklaşımdan biri ile veya bunların bir kombinasyonu ile tahmin edilebilir: (1) yerinde ölçümler, (2) rüzgar tüneli ile deneysel analiz veya (3) hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics) yazılımları ile sayısal analiz. Ön tasarım aşamasında kullanılmaları söz konusu olduğunda bu yöntemlerin çok zaman alıcı olduğu ve akışkanlar dinamiği açısından detaylı çalışmalar yapılmasını gerektirdikleri bilinmektedir. Bu yöntemler özellikle bina formunun dinamik olarak değişmesi durumunda verimli değildir. Ayrıca, verilerinin gerçek zamanlı olarak alınması söz konusu olduğunda hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonları ön tasarım aşamasında değerlendirme yapmak açısından pratik değildir. Tüm bu nedenlerden dolayı hızlı ve güvenilir bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. Bu noktada gerçek zamanlı çalışabilecek, geometriye dair sınırlamalar barındırmayan ve en önemlisi çözüm ağına (mesh) ihtiyaç duymayan bir algoritma yazılması öngörülmüştür. Bu çalışma kapsamında yazılan algoritmaya ve alınan çıktılara dair detaylar verilmektedir. Buna ek olarak temel bina geometrilerinin geliştirilen algoritma ile simülasyonu yapılmış ve Ansys Fluent yazılımı ile doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak geliştirilen algoritmanın ön tasarım aşamasında mimarlar için yapı-rüzgar etkileşimi analizlerinde kullanılabileceği ve değerlendirme yapılabileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar sözcükler: Bina aerodinamiği; hesaplamalı akışkanlar dinamiği; rüzgar etkin tasarım; yapı-rüzgar etkileşimi.

ABSTRACT

Wind-building interaction can be estimated with one of three approaches, or a combination of these: (1) on-site measurements, (2) reduced-scale wind tunnel measurements or (3) numerical simulation based on Computational Fluid Dynamics (CFD). It's clear that for early design stage, existing fore mentioned methods are very time consuming and they require detailed study in terms of fluid dynamics. These methods are not efficient especially in the case that the building form changes dynamically. Besides, both wind tunnel analysis and CFD simulations are not efficient when it comes to take output data in real-time. Due to all of these reasons, a need for a fast and robust method occurs. At this point, a very powerful method which doesn't require solid geometry as an input, besides in which there's no need to use mesh (control volume) is developed. In this study, the details of the developed algorithm and the output of it are given. In addition, the principal building forms are also simulated by the algorithm and the results are validated by the Ansys Fluent software. As a result, it is seen that the developed algorithm can be a guide in wind-building interaction analysis for architects in the preliminary design stage.

Keywords: Building aerodynamics; computational fluid dynamics; wind efficient design; wind-building interaction.

İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul

Başvuru tarihi: 12 Kasım 2018 - Kabul tarihi: 31 Aralık 2018

İletişim: İlker KARADAĞ, e-posta: karadagi@itu.edu.tr

© 2019 Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi - © 2019 Yıldız Technical University, Faculty of Architecture

Giriş

Sürdürülebilir mimarlık alanında tasarımı yönlendiren çeşitli pasif çevresel stratejiler bulunmaktadır. Bu anlamda rüzgar, önemli iklimsel parametrelerden birisidir. Özellikle yapıların hem mekansal tasarımında, hem yapı ve dış çevre ara kesitinde, hem de açık alanların konforu açısından dikkatle ele alınması gerekmektedir.¹ Diğer taraftan yapılar etrafındaki rüzgar karakteristiği sayısal analizler veya deneysel çalışmalar olmadan kolaylıkla tahmin edilememekte, bu sebeple 30 yıldan fazladır bu alanda ileri düzeyde araştırmalar yürütülmektedir. 1960'lardan beri dış mekan yaya konforu ciddi anlamda dikkat çeken konulardandır. Yaya seviyesi rüzgar konfor koşulları özellikle güçlü rüzgarların etkisi altında kalan yapılara odaklanılarak araştırılmıştır.² Bu çalışmalarda boyut, biçim gibi yapı özelliklerinin etkileri, yapılar arasındaki boşluklar, yapı gruplarının yönelişleri ve sokak kanyonu gibi alt konular ele alınmıştır.³

Yapı-rüzgar etkileşimi söz konusu olduğunda özellikle rüzgar konfor koşullarının sağlanabilmesi ve enerji verimliliği yönünde pasif mimari stratejilerin belirlenebilmesi ön tasarım aşamasıyla birlikte ele alınmalıdır. Bir mimari proje iyi planlanmış ve rüzgar gibi önemli bir iklimsel parametre ön tasarım aşamasında sürece dahil edilmişse, sonradan ortaya çıkabilecek olumsuz etkilerinin azaltılması mümkün olabilecektir. Yapının sürdürülebilirlik performansının artırılması, henüz erken tasarım aşamasında başlamalıdır; zira projenin erken aşamalarında optimizasyon potansiyeli daha yüksektir ve yapı tasarımındaki değişikliklerinin etkisinin maliyetlere yansması çok daha kısıtlıdır.⁴

Yapı - rüzgar etkileşiminin tahmin edilmesinde çeşitli sayısal ve deneysel metotlar kullanılmaktadır. Sayısal ve deneysel yaklaşımlardan biri veya bunların bir kombinasyonu ile rüzgarın yapı üzerindeki etkileri tahmin edilebilir. Bu yöntemler: (1) yerinde ölçümler, (2) rüzgar tüneli ile deneysel analiz veya (3) hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics) yazılımları ile sayısal analizlerdir. Her bir yaklaşımın kendine özgü avantajları ve dezavantajları olduğundan, belirli bir problem için hangi yaklaşımın en uygun olduğuna karar vermek her zaman kolay değildir. Yerinde ölçümlerin ve rüzgar tüneli ölçümlerinin önemli bir dezavantajı, genellikle sadece nokta verilerinin elde edilmesidir. Prensip olarak "Parçacık Görüntü Velosimetrisi (Particle Image Velocimetry)" ve "Lazerle İndüklenen Floresans (Laser-Induced Fluorescence)" gibi teknikler, düzlemsel ve hatta üç boyutta bir çok verinin elde edilmesini mümkün kılar. Ancak bu tür teknolojilerinin maliyeti oldukça yüksektir. Diğer taraftan özellikle çok sayıda yapıdan oluşan bir kentsel model veya karmaşık geometri-

ler için uygulandıklarında, lazer ışını geometriler sebebiyle engellenebilir.⁵ Ayrıca, farklı rüzgâr tüneli laboratuvar çalışmalarının karşılaştırılmasına yönelik yapılan son çalışmalar, birçok durumda %50'ye varan oranlarda yüksek farklılıklar olduğunu göstermiştir.⁶ Bu olumsuz koşullara rağmen, NIST TN1655 ve ASCE / SEI 49-12 ve ASCE 7. gibi uluslararası standartlara uyumluluğun sağlanması durumunda bir rüzgar tüneli çok güvenilir olabilir. Bu standartlar, binalardaki ve diğer yapılardaki rüzgar yüklerini belirlemek için rüzgar tüneli testlerini yürütmek ve yorumlamak için asgari gereklilikleri tanımlar. İnşaat mühendisleri, mimarlar ve rüzgar mühendisleri de dahil olmak üzere binalar için rüzgar tüneli testleri hazırlayan, yürüten ve yorumlayan kişiler için yararlıdır.⁷

Rüzgar akış karakteristikleri ayrıca hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) simülasyonları ile de belirlenebilir. Bu sayısal simülasyonlar ile bina çevresinde çok geniş bir alanda yüksek çözünürlüklü rüzgar verisi elde etmek mümkündür. Özellikle, meteorolojik verilerin hız girdisi olarak alındığı ve logaritmik rüzgar profilinin kullanıldığı, uygun bir türbülans modelinin belirlendiği ve yeterli sayıda iterasyonun yürütüldüğü sayısal analizler ile hassas sonuçlar alınabilmektedir. Bununla birlikte, sonlu eleman yaklaşımı ile ilgili temel problem, simülasyon alanını bölen bir ağın (mesh) hesaplanması gerekliliğidir. Tipik olarak ağ oluşturma aşaması, bir akışkanlar dinamiği simülasyonu süresinin %80'inden fazlasını kaplar.⁸ Ayrıca, ağ kalitesi, çözümün doğruluğunu belirleyen kritik bir faktördür. Bunun yanı sıra, bu tür teknik yazılımlar için geometrinin katı (solid) olarak hazırlanması gerekmektedir. Fakat mimarlık pratiğinde çoğu zaman komplike modeller oluşturulmakta ve solid geometri şartı sağlanmamaktadır.

Ön tasarım aşamasında, mevcut geleneksel yöntemlerin çok zaman alıcı olduğu ve akışkan dinamikleri hakkında derin bir bilgi gerektirdiği bilinmektedir. Bu yöntemler özellikle bina formunun dinamik olarak değişmesi durumunda verimli değildir. Ayrıca, verilerinin gerçek zamanlı olarak alınması söz konusu olduğunda CFD simülasyonları ön tasarım aşamasında değerlendirme yapabilmek açısından pratik değildir. Tüm bu nedenlerden dolayı hızlı ve güvenilir bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. Bu noktada gerçek zamanlı çalışabilecek, geometriye dair sınırlamalar barındırmayan ve en önemlisi çözüm ağına (mesh) ihtiyaç duymayan bir algoritma yazılması öngörülmüştür.

Metot: Parçacık Tabanlı Çalışan Yenilikçi Bir Algoritma

Yapı- rüzgar etkileşiminin çözümlenebileceği bir algoritma yazabilmek için üç farklı adım izlenmiştir (Şekil 1). İlk adımda benzeşim modeline karar verilmiştir; ikinci adımda

¹ DeKay ve Brown, 2014.

vd. 2007, 2008.

² Wiren, 1975, Stathopoulos ve Storms, 1986, Uematsu, 1992, Jamieson vd. 1992, Stathopoulos ve Wu, 1995, To ve Lam, 1995, Blocken

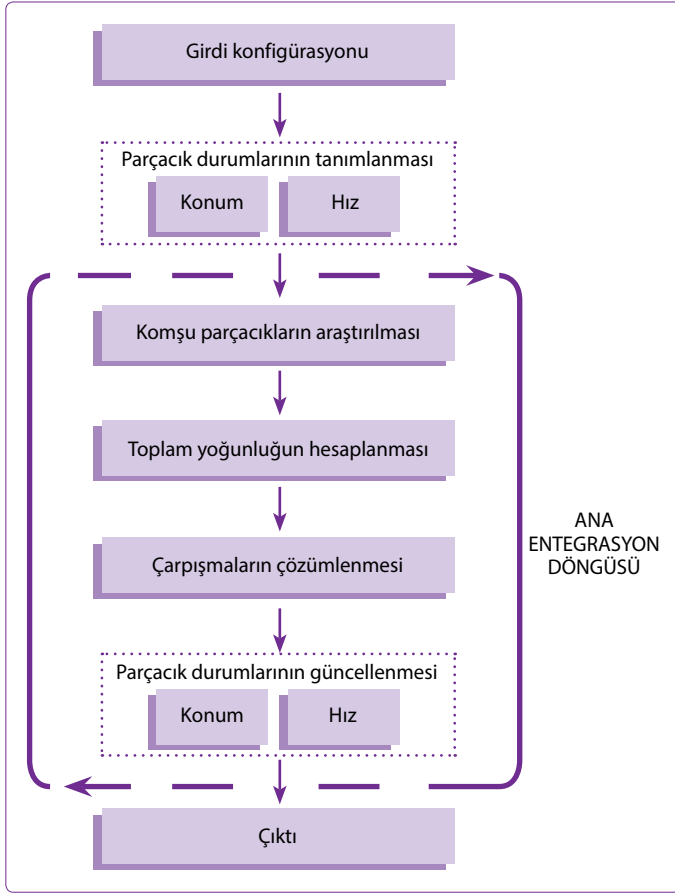
³ Stathopoulos vd. 1992, Visser vd. 2000.

⁴ Bragança ve Andrade, 2014.

⁵ Blocken ve Carmeliet, 2004, s. 107. ⁷ ASCE/SEI 49-12, 2012.

⁶ NIST Technical Report, 2009.

⁸ Liu, 2005.



Şekil 1. Akış diagramı.

fiziksel denklemlerin nasıl entegre edileceği kararlaştırılmıştır; üçüncü ve son aşamada ise denklemlerin çözümünün yürütüleceği solver (çözücü) belirlenmiştir. Çalışma kapsamında rüzgar akımı parçacık ölçeğine indirgenmiş ve her bir parçacığın ilk konumu ve hızına göre bir sonraki konumu ve hızı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Tahminler sırasında parçacıkların birbirleriyle ve katı geometrilerle ilişkisi de çözüme entegre edilmiştir. Algoritma geliştirilirken izlenen tüm adımlar detaylı olarak devam eden bölümlerde verilmektedir.

Benzeşim (Simülasyon) Modeli

Bir sistemi simüle edebilmek için onu çoğunlukla asıl sisteme mümkün olduğunca benzeştirmeye çalışmak gerekir. Bu benzeştirmede dikkat edilmesi gereken nokta asıl sistemden alınması gereken tüm parametrelerin özenle seçilmesi ve yürütülecek simülasyon (benzeşim) için gerekli olmayan tüm bileşenlerin çıkartılmasıdır. Bu aşamada asıl sistemi birebir kopyalamak değil yapılacak analiz için en uygun hale getirmek ciddi anlamda önemlidir.⁹

Yapı- rüzgar etkileşimi söz konusu olduğunda bir akışkan olan havanın da benzeştirilmesi gerekir. Bu amaçla, bu çalışmada hava akımı parçacık düzeyine indirgenmiştir. Çok

geniş bir alanda akışı çözümleyebilmek için ise parçacık sayısı artırılmıştır.

Fiziksel Denklemlerin Entegrasyonu

Hava akımlarını parçacık düzeyine indirgeyerek benzeşim modelini belirlenmiştir ancak parçacıkların birbirleriyle ve geometrilerle etkileşimi için denklemlerin tanımlanması gereklidir. Akışkanlar dinamiğinde akışı matematiksel olarak tanımlamak için iki metot bulunmaktadır. İlki, her bir akışkan parçacığı (diğer bir deyişle, akışkan içindeki her bir küçük kütle için) için hızı, zamanın bir fonksiyonu olarak almaktır. Çok küçük bir damla boyanın bir su akıntısına bırakıldığını ve boyanın izlenerek, herhangi bir zamanda hareket ettiği yönü ve hızın da izlendiği düşünülebilir. Bu, Lagrangian koordinatlarını kullanarak akışı tanımlamaya karşılık gelir.

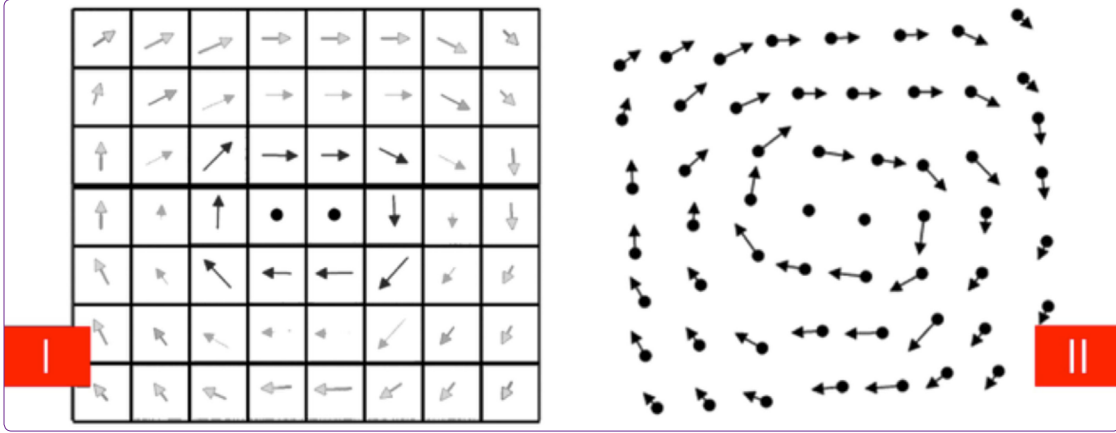
Bir başka yaklaşım, sınırlı bir ölçüm alanı belirleyerek bu alanda sabit koordinatların tanımlanmasıdır. Daha sonra bu koordinat sisteminde belirlenen ön tanımlı noktalardan geçen her bir parçacığın hızı incelenir. Bu kez küçük boya damlası hareket ettikçe, hareketi her bir noktada ayrı ayrı tanımlanır, bu işlem ardışık olarak her noktada devam eder. Boya damlasının anlık konumu Langarian metodunda olduğu gibi kendi lokal koordinat sistemine göre değil, daha önceden tanımlanan ölçüm alanının koordinat sistemi referans alınarak sabit bir grid üzerinde belirlenir. Bu, Eulerian koordinatlarını kullanarak akışı tanımlamaya karşılık gelir. Langarian metodunda gerçekçi sonuç alabilmek için çok fazla sayıda parçacığın izlenmesi gerekir (Şekil 2). Akışın bir alanda tanımlandığı ve her bir parçacığın tek tek izlenmediği bunun yerine gridal bir sistemde yer alan noktalardan geçerken hızlarının ölçüldüğü Eulerian Metodu daha pratik gibi görünse de sabit bir gridal sistem gerektirmesi akışı kısıtlayacaktır ve yine geleneksel CFD yazılımlarında olduğu gibi ağ (mesh) tanımlamak gerekecektir.

Eulerian metodunda parçacıkların konum, kütle ve hızları bilinmelidir. Aynı zamanda simülasyonun yürütüldüğü ortamla gerçek dünyanın zaman kavramı farklı olduğundan, ekranda yenilenen her kareyi (frame) referans alıp bir sonraki kare için parçacıkların hız ve konumlarının bulunması gerekir. Kare sayısı ne kadar arttırılırsa iki kare arasında geçen süre o kadar kısılır ve yapılan tahminler gerçeğe çok daha fazla yakınsar.

Parçacıkların başlangıçta tanımlanan bir hızla hareket etmesi gerekir, bu da yapı- rüzgar etkileşimi söz konusu olduğunda rüzgar hızıdır. Rüzgar analizlerinde genellikle meteoroloji istasyonlarında yürütülen uzun zamanlı ölçümlerle elde edilen, zemin seviyesinden 10 m yükseğe ait hızlar referans alınır. Rüzgar hızını doğrudan sabit parçacık hızı olarak tanımlamak yerine onları ivmelendiren bir kuvvet olarak ele almak gerçeğe daha yakın sonuçlar alınmasını sağlar.

Parçacık konumu ve hızı tahmini için temel fiziksel denklemleri entegre etmek gerekir. Kullanılacak denklemler

⁹ Hensen, 2003, s. 18.



Şekil 2. Eulerian Metodu (I) – Lagrangian Metodu (II).

ler hareket denklemleridir ve Newton'un 2. Yasası olarak bilinirler (equations of motion) ve bir net kuvvet için bir nesnenin tam olarak ne kadar ivmeleneceğini verirler. Eğer zaman "t" ile gösterilirse, simülasyon sırasında her iki kare arasında geçen zaman dt (zaman farkı -delta time) ile gösterilebilir. Böylelikle aşağıda ifade edilen bilinen fizik denklemleri yazılır;

$$\text{ivme} = \text{kuvvet} / \text{zaman} \quad (1)$$

$$\text{konumdaki değişim} = \text{hız} * \text{dt} \quad (2)$$

$$\text{hızdaki değişim} = \text{ivme} * \text{dt} \quad (3)$$

Bu denklemler koda dökülmelidir, bu noktada basit bir örnekle algoritmanın temel düzeyde fiziksel denklemleri nasıl entegre ettiği görülebilir. 1 kilogram ağırlığındaki sabit bir nesneye 10 Newton'luk sabit bir kuvvet uygulanıp, bir saniye süren zaman aralıklarıyla ileriye doğru iterasyon yapıldığında (Kod 1), alınan çıktı Kod 1'de verilmiştir.

Kod 1. Fiziksel Denklemlerin Entegrasyonu

```
double t = 0.0;
float dt = 1.0f;
float hız = 0.0f;
float konum = 0.0f;
float kuvvet = 10.0f;
float kütle = 1.0f;
```

```
while (t <= 10.0)
{
    konum = konum + hız * dt;
    hız = hız + (kuvvet / kütle) * dt;
    t += dt;
}
```

Kod 1'de görüldüğü üzere, her adımda nesnenin hem konumu hem de hızı bilinmektedir. Bu sayısal entegrasyon

Kod 2. Tablo 1'deki kodun dt = 1 sn olduğunda ürettiği çıktı

```
t=0: konum = 0 hız = 0
t=1: konum = 0 hız = 10
t=2: konum = 10 hız = 20
t=3: konum = 30 hız = 30
t=4: konum = 60 hız = 40
t=5: konum = 100 hız = 50
t=6: konum = 150 hız = 60
t=7: konum = 210 hız = 70
t=8: konum = 280 hız = 80
t=9: konum = 360 hız = 90
t=10: konum = 450 hız = 100
```

Euler Entegrasyonu olarak bilinir ve en temel sayısal entegrasyon tekniğidir. Yalnızca değişiklik oranı her bir zaman dilimi (time rate) boyunca sabit olduğunda %100 doğrudur. Verilen örnekte ivme sabit olduğundan, hızın entegrasyonu hatasızdır. Fakat diğer taraftan, konumun da bulunması gerekir ve bunun için de hız entegre edilir, fakat hız ivme nedeniyle sabit değildir ve artmaktadır. Bu sebeple, konumun entegrasyonunda hata olacağı öngörebilir. Bu hatanın boyutunu görebilmek için, bir nesnenin sürekli ivme altında nasıl hareket ettiğini veren formül kullanılabilir, böylelikle konum için kesin değerlere ulaşılır:

$$\text{konum} = \text{hız} * \text{zaman} + \frac{1}{2} * \text{ivme} * \text{t}^2 \quad (4)$$

Denklem 4'te değerler yerine konulduğunda nesnenin 10 saniye sonra 500 metreye taşınmış olması gerektiği görülmektedir, ancak Euler Entegrasyonu ile 450 metrelik bir sonuç alınmıştır. Bu yalnızca 10 saniyelik süre zarfında 50 metrelik hatalı konum farkı oluşması demektir. Fakat dt = 1 saniye olağan bir zaman aralığı değildir. Özellikle oyun motorlarında fiziksel simülasyonlar ekran kare oranının (saniyede yenilenen kare sayısı) çok daha altında bir zaman aralığında gerçekleşir. Çünkü ortalama bir oyunda her bir

karede fiziksel simülasyonlar için ayrılan zaman saniyenin 1/200'ü kadardır. Eğer zaman aralığı $dt = 1/100$ saniye olarak alınmış olsaydı, yani her 1 saniyede cismin konumu eş zamanlı aralıklarla 100 kez hesaplanmış olsaydı, alınan sonuçların gerçeğe çok daha yakın olacağı düşünülmektedir:

Kod 3. Tablo 1'deki kodun $dt = 1/100$ sn olduğunda ürettiği çıktının son satırları

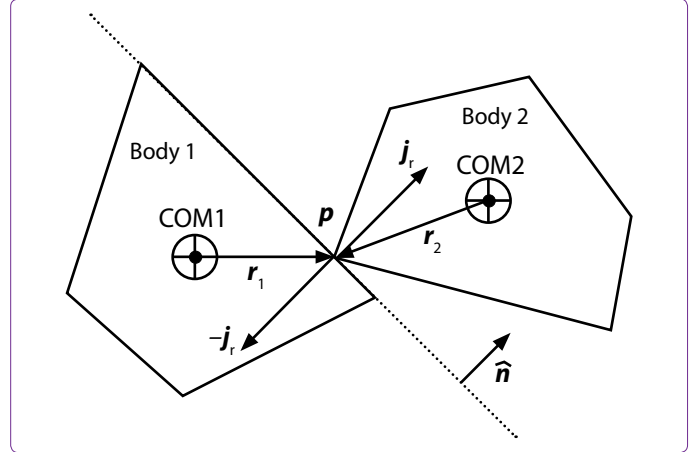
t=9.90:	konum = 489.552155	hız = 98.999062
t=9.91:	konum = 490.542145	hız = 99.099060
t=9.92:	konum = 491.533142	hız = 99.199059
t=9.93:	konum = 492.525146	hız = 99.299057
t=9.94:	konum = 493.518127	hız = 99.399055
t=9.95:	konum = 494.512115	hız = 99.499054
t=9.96:	konum = 495.507111	hız = 99.599052
t=9.97:	konum = 496.503113	hız = 99.699051
t=9.98:	konum = 497.500092	hız = 99.799049
t=9.99:	konum = 498.498077	hız = 99.899048
t=10.00:	konum = 499.497070	hız = 99.999046

Çözücü (Solver)

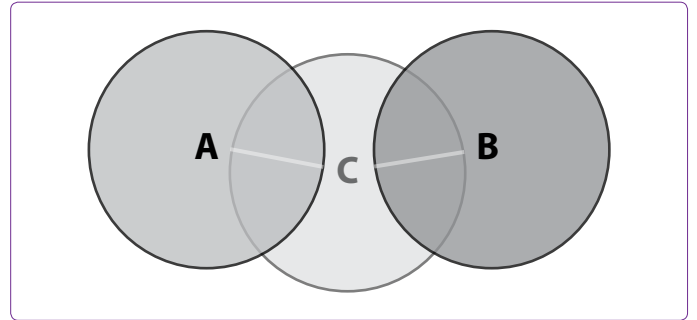
Bu aşamaya kadar tek bir nesnenin konum ve hızının nasıl entegre edildiğine yer verilmiştir, fakat yapı – rüzgar etkileşiminde parçacıkların birbirleriyle ve katı geometrilerle etkileşimde bulunması gerekeceği düşünülmüştür. Bu noktada parçacıkların birbirleriyle çakıştıklarında oluşan temas noktasında bir kuvvet hesaplanabilir ve parçacıklara tepki kuvveti (impulse) olarak uygulanabilir. Bu kuvvet, her iki parçacığı bir sonraki karenin başlangıcında artık birbirleriyle çakışmaz hale getirecektir.¹⁰ Bu yalnızca tek bir kare için geçen kısacık sürede gerçekleştirilmeye çalışılır ve literatürde “Tepki tabanlı çarpışma çözümü (impulse-based collision resolution)” olarak bilinir (Şekil 3).

Rüzgar- yapı etkileşimi söz konusu olduğunda yüksek çözünürlükte veri alabilmek için binlerce parçacık kullanmak gerekecektir. Şu ana kadar tek bir objenin hız ve konumu tahmin etmeye çalışılmıştır ve ayrıca iki farklı parçacığın çarpışma durumu incelenmiştir. Bundan sonraki aşamada parçacık sayısı ne kadar artarsa artsın yeterli olacak bir çözüm metoduna ihtiyaç duyulacaktır. Bunun için A ve B olarak adlandırılan iki parçacık olduğu varsayılabilir, bu iki parçacığın her birinin C adında bir parçacık ile çakıştığı düşünülebilir. Bu iki adet sınırlayıcı (constraint) yani çözülmesi gereken iki adet denklem demektir: A - C ve B - C (Şekil 4).

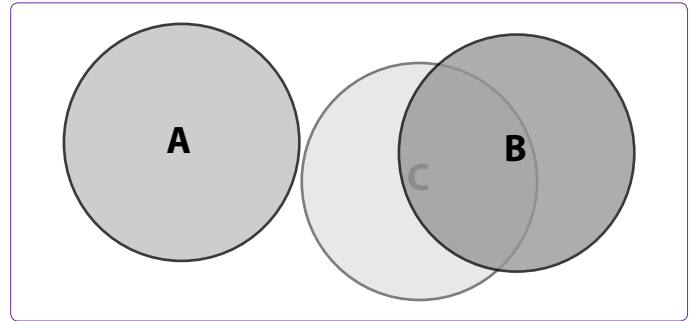
Öncelikle A - C etkileşiminin çözüldüğü düşünülecek olursa, bu hem A hem de C'nin hareket etmesi ve birbirlerinden tamamen kopmalarını sağlar. Fakat bu kez C, B ile



Şekil 3. Tepki tabanlı çarpışma çözümü (p: temas noktası, COM: kütle merkezi, j: tepki kuvveti) [6].



Şekil 4. C'nin A ve B'ye göre konumu, çizgiler sınırlayıcıları (constraint) gösterir.



Şekil 5. Adım 1: A - C etkileşimi.

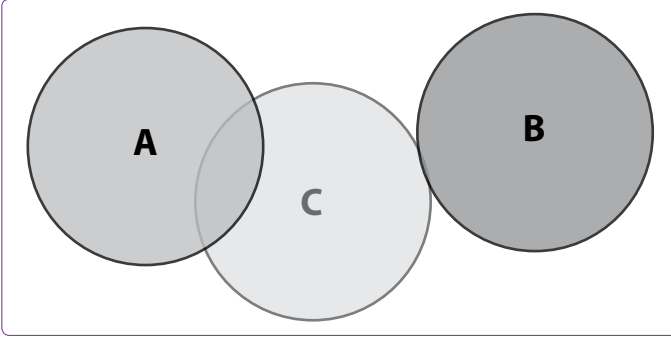
daha fazla çakışmaya başlar. Çünkü henüz C ve B arasında etkileşimi hesaba katılmamıştır (Şekil 5).

Bu kez B ile C etkileşimini çözülmelidir. Bu çözüm B ve C'nin artık çakışmamasını ve yeni konularını almalarını sağlar fakat bu kez de B, A ile az da olsa çakışmaya başlar (Şekil 6).

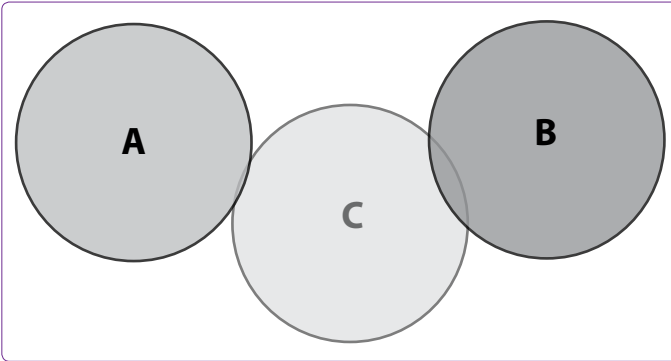
Bir önceki adımda A ve B birbirlerinden farklı biçimde C'ye göre konum aldıklarından tekrar çakışma olmuştu. Fakat çözüme devam edildiğinde giderek daha iyi sonuçlar alınacağı görülmüştür (Şekil 7).

Artık çözüme çok yakınsanmakla birlikte (convergence) hala tam olarak sonuca ulaşılmış değildir, tekrar iterasyon

¹⁰ Fluid Simulation, 2016.



Şekil 6. Adım 1: B – C etkileşimi.



Şekil 7. Adım 2: A – C etkileşimi.

yapmaya devam edilebilir, yeterli iterasyon sayısına ulaşıldığında parçacıkların artık birbirleriyle çakışmayacağı görülür ve parçacıklar arası etkileşim çözülmüş olur. Tüm etkileşimlerin birbirinden bağımsız ve sıralı olarak çözülmesi çok zor gibi görünse de aslında etkili bir yöntemdir ve Gauss-Seidel methodu olarak bilinir. Özetle sonuca 10 değil de 5 adımda ulaşan bir metod bulunduğu daha hızlı yakınsayan bir algoritma elde edilmiş olur ve gerçek zamanlı çıktı alınabilir.

Gauss-Seidel metodunda sıralı çözüm uygulanır ve her bir denklem birbirinden bağımsız olarak çözülür. Bir önceki adımdan alınan çıktı bir sonraki adımda girdi olarak kullanılır. Fakat her iki denklem de eş zamanlı aynı girdilerle çözülebilir ve çıktıların ortalamasını alınabilir. Bu noktada ortaya çıkan yöntem Jacobi methodu olarak bilinir (Şekil 8). Jacobi, Gauss-Seidel metoduna göre daha fazla iteras-

yonda sonuca ulaştırırsa da her iki denklem de aynı çıktıları kullandığından eş zamanlı çözülebilir ve böylelikle bir önceki adımı bekleme gereksinimi ortadan kalkar. Bu da paralel olarak çözüm yürütülebilmesi manasına gelir. Örneğin 25 denklemden oluşan bir sistemi 25 kişi bağımsız olarak çözebilir, bu da Gauss-Seidel'e göre 25 kat hızlı sonuç almak demektir. Üstelik denklemlerin hangi sırada çözüldüğünün bir önemi yoktur, bu da denklemleri çözerken belirli bir sırayla hareket edilmesiyle alınabilecek farklı sonuçların da önüne geçer.

Özetle iterasyon sayısı arttıkça çözüme daha fazla yakınsanır fakat gerçek zamanlı bir çözüm hedefleniyorsa optimum iterasyon sayısının belirlenmesi gerekir. Daha az iterasyon daha hızlı sonuç demektir fakat bu kez de hassasiyet azalır.

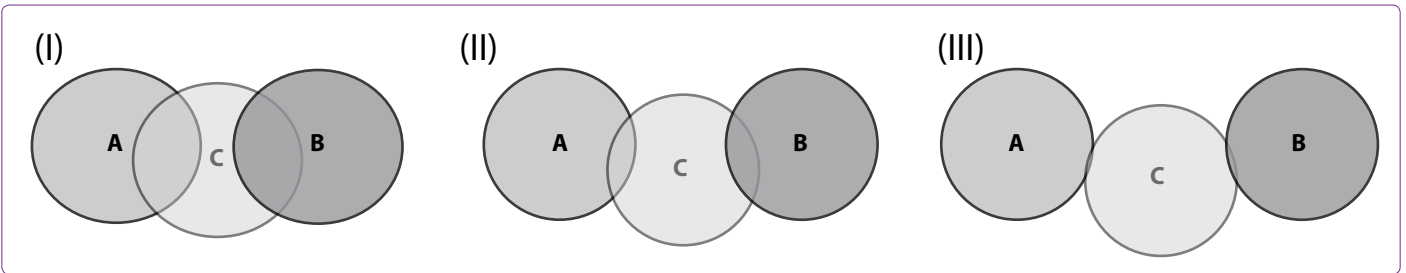
Analiz: Algoritmanın Sınanması

Yapı-rüzgar etkileşimi analiz edilirken özellikle temel geometriler etrafındaki akış karakteristiğinin bilinmesi gerekir. Düz yüzeyli ve keskin köşeli geometriler genellikle "katı" geometriler olarak tanımlanır ve birçok yapı formunda görülür. Bu geometriler etrafındaki akış çizgileri (streamlines) akış boyunca rüzgar-üstü (windward) bölgeden rüzgar-altı (leeward) bölgeye kadar kesintisiz olarak geometri yüzeyini takip etmez. Bunun yerine akış keskin köşelerde yapı yüzeyinden ayrışır, bu akışkanın momentumunun akışkanı birarada tutan zayıf kohesif viskoz kuvvetlerini geçtiği anda gerçekleşir. Ayrışma hattı boyunca hızda katmanlaşma oluşur (shear layer) ve rüzgar-altı bölgede türbülanslı iz alanı (wake area) gelişir, bu alan iki yönden de ayrışan akımla çevrelidir.

Akışın tahmin edilebilir ayrışma durumu kübik, dikdörtgenel yapılar (bluff bodies) söz konusu olduğunda keskin köşelerde ve kenarlarda her zaman benzer karakteristiğe sahiptir ve çok farklı rüzgar hızlarında bile benzer akış karakteristikleri görülür.¹¹

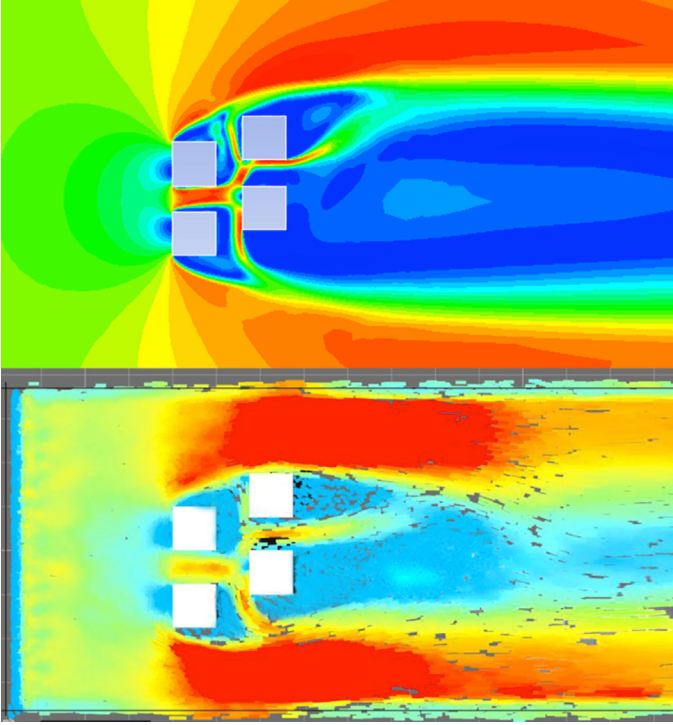
Bu çalışma kapsamında dört kübik yapı (5m*5m*5m) 3m'lik aralıklarla şaşırtmalı olarak konumlandırılmıştır (Şekil 9).

Yapı-rüzgar etkileşimi söz konusu olduğunda venturi etkisinin, yapı köşelerinde ayrışan akımın ve yapıların arka-



Şekil 8. A-B ve A – C etkileşiminin eş zamanlı olarak çözümünün yer aldığı adımlar - I, II ve III.

¹¹ Stathopoulos ve Blocken, 2016, p. 101.



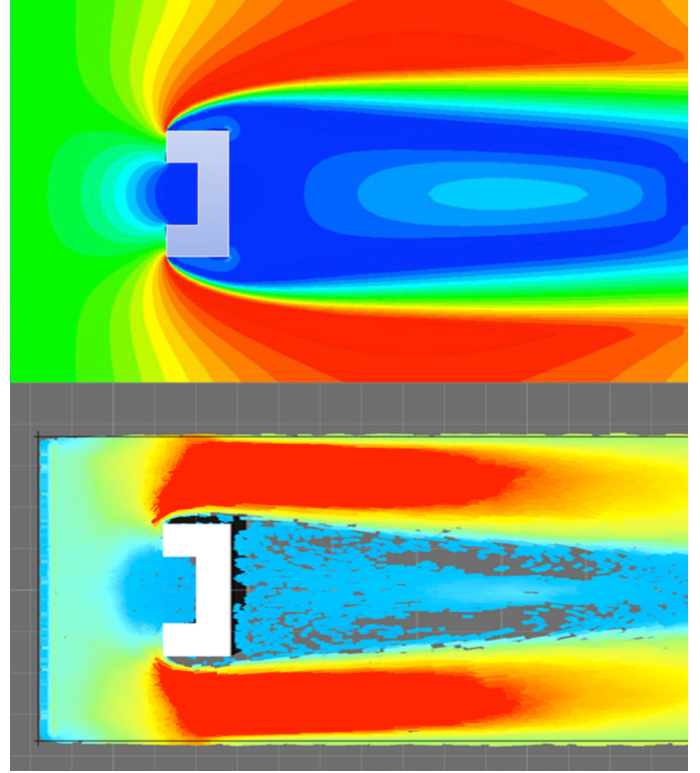
Şekil 9. Kübik iki yapının diğer iki yapının etki alanında olması (Ansys Fluent-üstte, algoritma-altta).

sında kalan iz alanlarının çözümlenebilmesi önem taşımaktadır. Bu anlamda sayısal doğrulama çalışması sonucunda özellikle akımın ayrıştığı alanların ve rüzgar altı alandaki iz bölgelerinin büyük oranda yakalanabildiği gözlenmiştir. İki yapı arasından geçen akımın doğrultusu ve yine hız kazanması da akış karakteristiğinin tahminine yönelik çıktılarının doğruluğunu gösterir niteliktedir. Böylece algoritmanın ön tasarım aşamasına yönelik yeterli çıktı üretebildiği gözlemlenmiştir.

Birden fazla yapının birbirlerine olan etkisi haricinde tekil yapı etrafındaki akış da incelenmiştir. Bu kapsamda temel yapı geometrilerinden yarı açık avlulu yapı formu akış karakteristiğinin çok belirgin olması sebebiyle seçilmiştir. Avlulu yapılar özellikle rüzgar yönüne ve avlu açıklığının boyutlarına bağlı olarak çok farklı akış karakteristiği ve akış birleşim modeli (recirculation) gösterebilmektedirler.¹² Analizler sonucunda yarı açık avlulu yapının rüzgarı karşıladığı avlu alanında akışın sıkıştığı ve bir vortex alanı oluştuğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte yapının köşelerinde akışta ciddi ayrışmalar ve hızlanmalar görülmüştür (Şekil 10).

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, yapı-rüzgar etkileşiminin erken tasarım aşamasında çözümüne yönelik geliştirilen, gerçek zamanlı çalışan ve ağ (mesh) gerektirmeyen yeni bir algoritma



Şekil 10. Yarı açık avlulu yapı etrafındaki akış karakteristiği (Ansys Fluent-üstte, algoritma-altta).

maya dair detaylar açıklanmıştır. Algoritmanın geliştirilme süreci; benzeşim modelinin belirlenmesi, fiziksel denklemlerin entegrasyonu ve son olarak çözücünün tasarlanması, olarak üç farklı adımda ele alınmıştır.

Çalışma kapsamında temel vaka çalışmaları geliştirilen algoritma ile ve Ansys Fluent yazılımı ile simüle edilmiştir. Sonuç olarak geliştirilen algoritmanın ön tasarım aşamasında mimarlar için yapı-rüzgar etkileşimi analizlerinde rehber olabileceği görülmüştür. Özellikle gerçek zamanlı çalışması mimarların hızlı data almasını sağlayacak böylece ön tasarım aşamasında mimarın bina formunu değiştirerek sonuçları karşılatırmasını ve yapı rüzgar etkileşimi açısından optimum bina formunu belirlemelerinde yol gösterici olacaktır. Dolayısıyla sonuçlara etkisi kısıtlı olacak parametrelerin önceden belirlendiği parçacık tabanlı bu algoritma mimarlık pratiği düşünülerek geliştirildiğinden, mimarların kolaylıkla yazılımdan veri alabilmesi mümkün olabilecektir.

Bu çalışma temel alınarak yürütülecek yeni çalışmalar için geliştirilen algoritmanın rüzgar tüneli ile deneysel olarak doğrulanması gerekmektedir. Ayrıca, bundan sonra yürütülecek çalışmalarda önerilen algoritmanın; özellikle kanal (funnel) etkisinin daha iyi çözülebilmesi, yapı geometrisindeki küçük detayların da simüle edilebilmesi ve çok daha fazla sayıda parçacık ile simülasyona olanak sağlayacak şekilde geliştirilmesi hedeflenmektedir.

¹² Moret vd., 2003.

Kaynaklar

- ASCE/SEI 49-12. (2012). Wind tunnel testing for buildings and other structures: Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Blocken, B., & Carmeliet, J. (2004). Pedestrian Wind Environment around Buildings: Literature Review and Practical Examples. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28(2), 107-159. doi:10.1177/1097196304044396.
- Bragança, L., Vieira, S. M., & Andrade, J. B. (2014). Early Stage Design Decisions: The Way to Achieve Sustainable Buildings at Lower Costs. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-8. doi:10.1155/2014/365364.
- Hensen, J.L.M. (2003). Simulating building performance: just how useful is it? *REHVA Journal*, nr. 4, Federation of European Heating, Ventilating and Air-conditioning Associations - REHVA, Brussels.
- House, D., & Keyser, J. C. (2017). Foundations of physically based modelling and animation. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Liu, G. (2002). *Mesh Free Methods*. doi:10.1201/9781420040586.
- M. DeKay & G.Z. Brown, *Sun Wind & Light*, Architectural design strategies, 3rd ed. Wiley, 2014.
- NIST Technical Report. (2009). "Toward a standard on the wind tunnel method".
- Stathopoulos, T., & Blocken, B. (2016). Pedestrian Wind Environment Around Tall Buildings. *Advanced Environmental Wind Engineering*, 101-127. doi:10.1007/978-4-431-55912-2_6.
- Stathopoulos, T. ve Storms, R, 1986, "Wind Environmental Conditions in Passages between Buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 24: s. 19–31.
- Stathopoulos, T., Wu, H. ve Be'dard, C., 1992, "Wind Environment Around Buildings: A Knowledge-Based Approach", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41–44: 2377–2388.
- Stathopoulos, T. ve Wu, H., 1995, "Generic models for pedestrian-level winds in built-up regions", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54-55: s. 515-525.
- To, A. P. ve Lam, K.M., 1995, "Evaluation of pedestrian-level wind environment around a row of tall buildings using a quartile-level wind speed descriptor", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54-55: s. 527-541.
- Uematsu, Y., Yamada, M., Higashiyama, H. ve Orimo, T., 1992, "Effects of the corner shapes of high-rise buildings on the pedestrian-level wind environment with consideration for mean and fluctuating wind speeds", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.41-44, pp2289-2300.
- Visser, G.T., Folkers, C.J. and Weenk, A., 2000, "KnowWind: a Database-Oriented Approach to Determine the Pedestrian Level Wind Environment Around Buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 87: s. 287–299.
- Wiren, B.G., 1975, "A Wind Tunnel Study of Wind Velocities in Passages between and through Buildings", In: *Proceedings of the 4. International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, Cambridge University Press, Heathrow, s. 465–475.