

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK ANABİLİM DALI

YAPI ADALARININ AERODİNAMİK PERFORMANSININ HAD (CFD)
SİMÜLASYONU İLE İNCELENMESİ: TRABZON'DA BİR SİTE YERLEŞKESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet Fatih AYHAN

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK ANABİLİM DALI

**YAPI ADALARININ AERODİNAMİK PERFORMANSININ HAD (CFD)
SİMÜLASYONU İLE İNCELENMESİ: TRABZON'DA BİR SİTE YERLEŞKESİ**

Muhammet Fatih AYHAN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK MİMAR"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 16 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özlem AYDIN

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Yapı Adalarının Aerodinamik Performansının HAD (CFD) Simülasyonu ile İncelenmesi: Trabzon’da Bir Site Yerleşkesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Özlem AYDIN’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Mustafa KAVRAZ’a ve Sayın Prof. Dr. Fatma Zehra ÇAKICI’ya, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşlarım Ali Can FADIL’a, Enis TOSUN’a teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Mimarlık Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Nigâr AYHAN ve babam Veysel AYHAN’a, kardeşlerim Elif AYHAN ve Esra AYHAN’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Muhammet Fatih AYHAN
Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yapı Adalarının Aerodinamik Performansının HAD (CFD) Simülasyonu İle İncelenmesi: Trabzon’da Bir Site Yerleşkesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Özlem AYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16/10/2024

Muhammet Fatih AYHAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1.1. Problemin Tanımı	2
1.1.2. Araştırmanın Amacı, Kapsamı ve Önemi	2
1.1.3. Materyal ve Yöntem.....	3
1.2. Literatür Özeti	4
1.3. HAD (CFD) Nedir?.....	6
1.3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Kullanım Alanları.....	10
1.3.2. HAD Hakkında Bilimsel Altyapı.....	10
1.3.3. RANS ve LES Metodunun Karşılaştırılması	14
1.4. Mimarlıkta HAD Uygulamaları ve Yaklaşımları.....	17
1.4.1. İç Ortamda HAD (CFD) Uygulamaları	21
1.4.2. Dış Ortamda HAD (CFD) Uygulamaları	23
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	41
2.1. Çalışma Alanının Belirlenmesi	41
2.1.1. Rüzgarla İlgili İklim Verileri	44
2.2. Çalışmanın Amacı, Materyali ve Yöntemi.....	47
2.2.1. Simülasyon Aşamaları	50
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	59
3.1. Mevcut Yapıların Analizi.....	61
3.1.1. Mevcut Yapıların Kuzey (N) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi	61
3.1.2. Mevcut Yapıların Batı (W) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi	68
3.1.3. Mevcut Yapılara Etki Eden Statik Basınç Kuvvetleri	74

3.2. Birinci Alternatif Modelin Analizi	76
3.2.1. Birinci Alternatif Modelin Kuzey (N) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi	76
3.2.2. Birinci Alternatif Modelin Batı (W) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi	83
3.2.3. Birinci Alternatif Modele Etki Eden Statik Basınç Kuvvetleri.....	89
3.3. İkinci Alternatif Modelin Analizi.....	90
3.3.1. İkinci Alternatif Modelin Kuzey (N) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi	91
3.3.2. İkinci Alternatif Modelin Batı (W) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi	97
3.3.3. İkinci Alternatif Modele Etki Eden Statik Basınç Kuvvetleri	103
3.4. Mevcut Yapı ve Alternatif Modellerin Karşılaştırılması	104
4. SONUÇLAR.....	109
5. ÖNERİLER.....	111
6. KAYNAKLAR	112
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YAPI ADALARININ AERODİNAMİK PERFORMANSININ HAD (CFD) SİMÜLASYONU İLE İNCELENMESİ: TRABZON'DA BİR SİTE YERLEŞKESİ

Muhammet Fatih AYHAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Özlem AYDIN
2024, 116 Sayfa

Fiziğin alt kollarından biri olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD), 1960'lı yıllardan itibaren yürütülen çalışmalarla akışkanların hareketini ve etkileşimini çözümlmeyi amaçlayan bir alandır. Özellikle son yıllarda, performatif mimarlık anlayışıyla tasarlanan yapılarda veya yapıların rüzgâr performansının değerlendirilmesine yönelik çalışmalarda mimarlık alanındaki etkisi görülmektedir. Tez çalışmasının ilk bölümünde çalışmanın amacı, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin tanımı, HAD'ın avantajları/dezavantajları açıklanıp; mimarlıkta iç ve dış ortamda hangi amaçla ve yöntemle uygulandığı literatür çalışmalarıyla desteklenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde Türkiye'de yüksek katlı yapıların tasarımında rüzgâr performansı değerlendirme sorunlarına dikkat çekmek amacıyla Yomra, Trabzon'da yapılan bir saha ve simülasyon çalışması yer almaktadır. Tezin üçüncü bölümünde alanda yer alan yapıların mevcut durumun yanı sıra yapı yüksekliğinin ve tasarımın etkisini inceleyen iki farklı alternatif modelin simülasyon sonuçları irdelenmiştir. Çalışma elde edilen sonuçlarla ve önerilerle tamamlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Bina Performans Simülasyonu, İç ve Dış Ortam, Yüksek Katlı Yapılar, Rüzgâr Yüğü

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF AERODYNAMIC PERFORMANCE OF BUILDING ISLANDS WITH CFD SIMULATION: A CASE STUDY IN TRABZON

Muhammet Fatih AYHAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Architecture Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Özlem AYDIN
2024, 116 Pages

Computational fluid dynamics (CFD), one of the sub-branches of physics, is a field that aims to analyze the motion and interaction of fluids with studies carried out since the 1960s. Especially in recent years, the effects in the field of architecture are seen in the buildings designed with the approximation of performative architecture or in studies aimed at evaluating the wind performance of buildings. In the first part of the thesis, the aim of the study, the definition of computational fluid dynamics, and the advantages/disadvantages of CFD are explained. Subsequently, literature studies support the purpose and method of applications in interior and exterior architecture environments. The second part of the study includes a field and simulation study conducted in Yomra, Trabzon, to draw attention to wind performance assessment problems in developing high-rise buildings in Türkiye. The third part of the thesis analyzes the simulation results of two different alternative models investigating the effect of building height and design and the current situation of the buildings in the area. The study is finalized with the conclusion and suggestions.

Key Words: Computational Fluid Dynamics, Building Performance Simulation, Indoor and Outdoor Environment, High-rise Buildings, Wind Load

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Akışkanlar mekaniği (numerik rüzgâr tüneli): matematik, bilgisayar bilimi ve havacılık bilimlerinin ortak çalışma alanıdır (Jameson, 2012)	7
Şekil 2.	Geçerli denklemlerin hiyerarşisi (Jameson, 2012)	8
Şekil 3.	İzole edilmiş keskin kenarlı az katlı bir binanın etrafındaki ortalama atmosferik sınır tabakası akışının şematik gösterimi (Blocken vd., 2011).....	14
Şekil 4.	Aynı cisim üzerindeki akışın RANS ve LES metoduyla çözümü	15
Şekil 5.	Von Karman girdap oluşumu ve Juan Fernandez adalarında oluşan bir rüzgâr akışının oluşturduğu von Karman girdabı (URL-1)	16
Şekil 6.	Yapısal çerçeveler üzerindeki rüzgâr yüklerini tahmin etmeye yönelik CFD prosedürü (Tamura vd., 2008)	17
Şekil 7.	Tjibaou Kültür Merkezi'nin tasarımında mimarlar tarafından sunulan hava akış ve basınç şemalarının HAD analizleriyle kıyaslanması (Wu vd., 2011).....	18
Şekil 8.	Mimari alanda HAD ile ilgili araştırma alanlarının genişlemesi (Jo vd., 2018).....	19
Şekil 9.	Karmaşık iç ve dış ortamlar için yüksek çözünürlüklü hesaplamalar: Kentsel rüzgâr akışı ve çok işlevli bir stadyumun iç mekân doğal havalandırması için hibrit gövdeli ızgara (5,6 milyon hücre) (van Hooff ve Blocken 2010b)	23
Şekil 10.	Kentsel alanlarda yaya seviyesindeki rüzgâr ortamına ilişkin CFD çalışmalarına örnekler: (a-b) ızgara (38895 sonlu eleman) ve sürekli RANS simülasyonlarına dayalı rüzgâr hızı vektörleri (Gadilhe vd., 1993), (c-d) LES'e dayalı ızgara (toplam hücre sayısı bilinmiyor) ve rüzgâr hızı konturları (He ve Song, 1999), (e-f) ızgara (2,8 milyon hücre) ve RANS'a dayalı rüzgâr hızı oranı konturları (Blocken ve Persoon, 2009).....	25
Şekil 11.	Yoshie vd. tarafından yapılan doğrulama çalışmalarında bina konfigürasyonları, (a-b) Yalıtılmış binanın geometrisi ve yapılandırılmış ızgarası (1.0×10^5 hücre), (c-d) Az katlı binalarla çevrili yüksek binanın geometrisi ve yapılandırılmış ızgarası (1.3×10^6 hücre), (e-f) Batırma Geometrisi-sınır (0,25 milyon hücre) ve gerçek kentsel alandaki bina kompleksi ızgaraları (Niigata), (g-h) Geometri, batık sınır (2,95 milyon hücre) ve gövdeye uygun (1,18 milyon hücre) gerçek kentsel alanda (Shinjuku, Tokyo) bina kompleksi ızgaraları (Yoshie vd., 2007)	26
Şekil 12.	Yoshie vd. (2007) tarafından izole edilmiş bina için rüzgâr hızı oranının HAD sonuçları ile rüzgâr tüneli ölçümlerinin karşılaştırılması, [(a) standart k-ε modeli ile RANS, (b) RNG k-ε	

	modeli ile RANS. Semboller şunlara atıfta bulunur: Δ = binanın önü; o = binanın yan tarafı; x = binanın arkası. Farklı renkler, binanın önündeki, yanındaki ve arkasındaki çeşitli konumları ifade eder.] 27
Şekil 13.	Blocken ve Carmeliet (2008) tarafından paralel bina konfigürasyonları için doğrulama çalışması, (a) kum erozyonu kontur çizimleri, (b) (1,5 milyon hücre) için CFD sonuçları; (c) Kum erozyonu grafikleri, (d) HAD sonuçları (0,7 milyon hücre) 28
Şekil 14.	Bina cephelerinde rüzgarla yönlendirilen yağmurun CFD doğrulama çalışmaları. (a) Belçika, Leuven'deki VLIET test binası, (b) Güneybatı rüzgâr yönüne sahip bir yağmur olayından sonra güneybatı cephesinde yakalama oranı konturları (Blocken ve Carmeliet 2007); (c) Bilgi Katedrali; (d) Yüzey kirlenme desenleriyle Bilgi Katedrali; (e) Farklı referans rüzgâr hızları için güneybatı cephesindeki yakalama oranları (Tang ve Davidson, 2004); (f) neme bağlı hasar belirtileriyle Hollanda'daki Av Köşkü St. Hubertus; (g) Bir yağmur olayının sonunda ölçülen (solda) ve simüle edilmiş (sağda) yakalama oranlarının, cepheye dik rüzgâr yönü ile karşılaştırılması (Briggen vd. 2009) 29
Şekil 15.	Orijinal stadyum yapılandırması için rüzgâr akış modeli ve yağmur damlalarının yörünge etkisi (Llarena vd., 2018) 30
Şekil 16.	(a) Yerde yapılan ölçümlerin HAD sonuçlarıyla korelasyon örneği. (b) Farklı alternatifler arasındaki ıslatma modeli karşılaştırması örneği. (c) Yeni San Mames stadyumu için seçilen çatı eklentisinin görünümü ve kesiti (Llarena vd., 2018) 31
Şekil 17.	(a) İlk ızgara hücre noktası cepheden 160 μ m uzaklıkta olacak şekilde izole edilmiş kübik bir bina modeli etrafında konvektif ısı transferi katsayılarının CFD simülasyonu için yüksek çözünürlüklü ızgara (1,9 milyon hücre); (b) bir referans rüzgâr hızı $U_{10} = 3$ m/s ve $\theta = 0^\circ$ ve $22,5^\circ$ için rüzgâr cephesinde zorlanmış konvektif ısı transfer katsayıları (Blocken vd., 2011) 32
Şekil 18.	Hava kirletici dağılım problemlerinin şematik gösterimi: egzozun aynı binaya veya diğer binalara yeniden emilmesi ve sokaklarda birikmesi (Blocken vd., 2011) 33
Şekil 19.	Güneybatı Rüzgârı Durumu: (a) rüzgâr tüneli modeli ve (b) bina ve zemin yüzeylerinde ilgili hesaplamalı ızgara. Batı Rüzgârı Durumu: (c) rüzgâr tüneli modeli ve (d) bina ve zemin yüzeylerinde karşılık gelen hesaplamalı ızgara (Gousseau vd., 2011) 34
Şekil 20.	(a) SKE- Sct= 0.3 ve (b) LES ile elde edilen batı rüzgârı durumu için bina çatılarında ve çevre sokaklarda 100*K'lık konturlar. HAD doğrulaması: deneylerle karşılaştırmalı olarak (c) SKE ve (d) LES ile batı rüzgârı durumu için 100*K değerlerinin dağılım grafikleri (Gousseau vd., 2011) 34
Şekil 21.	(a) Dubai'deki HHHR Kulesi, (b) Blue Tower'ın CAD geometri modeli, (c) Blue Tower için etki alanı ağı oluşturulması, (d) HHHR

	Tower modelinin etki alanı içindeki sınır koşulları (Shireen ve James, 2017).....	35
Şekil 22.	Blue Tower etrafındaki rüzgâr hızlarının dağılımı: (a) 5 m yükseklikte yatay düzlem, (b) düşey düzlem. Rüzgâr yönü 0° açıda olan bina yüzlerindeki basınç kontur çizgileri: (a) Rüzgâra bakan cephe, (b) rüzgâra bakmayan cephe (Shireen ve James, 2017)	36
Şekil 23.	Rüzgârın 0° açıyla yönlendirildiği Blue Tower'in rüzgâra bakan yüzündeki kN/m ² cinsinden rüzgâr basınçları: (a) Rüzgâr tüneli deneyi ile; (b) HAD analizi verileri, (c) Rüzgâr tüneli testinin rüzgâr basınçları ile 0° rüzgâr yönünde Mavi Kule'nin HAD analizi arasındaki karşılaştırma, (d) Rüzgâr tüneli testinin rüzgâr basınçları ile 90° rüzgâr yönünde Mavi Kule'nin HAD analizi arasındaki karşılaştırma (Shireen ve James, 2017)	36
Şekil 24.	(a) Pekin'de bulunan yükseklikleri 33-90 m arası değişen konut kompleksi, (b) üretilen ilk alternatif model, (c) ikinci alternatif model ve final tasarımı (Chen ve Srebric, 2000).....	37
Şekil 25.	(a) orijinal bina yapılanmasıyla yaya seviyesinde kuzey yönlü rüzgâr akışı, (b) ilk alternatif modele göre kuzey yönlü rüzgâr akışı, (c) ikinci alternatif modele göre kuzey yönlü rüzgâr akışı (d) ikinci alternatif modele göre güney yönlü rüzgâr akışı (Chen ve Srebric, 2000)	38
Şekil 26.	Burkulmuş (sol) ve prizmatik (sağ) modellerin birincil eksenleri (Bilgen, 2019).....	39
Şekil 27.	Prizmatik yapıda rüzgârın farklı cephelerdeki davranışları ve cephelerle etkileşimi (Bilgen, 2019).....	39
Şekil 28.	Burkulmuş-kıvrımlı yapıda rüzgârın farklı cephelerdeki davranışları ve cephelerle etkileşimi (Bilgen, 2019).....	40
Şekil 29.	Çalışma alanı üzerinde yer alan parsel ve komşu parseller; Trabzon, Yomra, Sancak Mahallesi, Trabzon-Rize Yolu (URL-2).....	42
Şekil 30.	Çalışma alanı ve yakın çevresindeki yapıların 3 boyutlu harita görünümü.....	42
Şekil 31.	Çalışma alanında yer alan site yerleşkesinin vaziyet planı.....	43
Şekil 32.	Site yerleşkesi birinci etap A, B, C, D blokları ve Trabzon sahili.....	43
Şekil 33.	B blok inşa aşamasından bazı görseller	44
Şekil 34.	Trabzon meteoroloji istasyonu verilerine göre hâkim rüzgâr yönü grafiği (Karadeniz, 1995).....	45
Şekil 35.	Tasarım platformları için HAD simülasyonlarına entegre edilen eklentiler ve performans simülasyonlarına entegre edilen eklentiler (Hu vd., 2023).....	48
Şekil 36.	AutoCAD yazılımında kat planının oluşturulması ve Revit modeline hazır hale getirilmesi.....	50
Şekil 37.	A, B, C Blok kat planı, ölçek: 1/250.....	51
Şekil 38.	D Blok kat planı, ölçek: 1/250.....	52

Şekil 39.	Autodesk Revit yazılımı aracılığıyla yapı adasındaki 27 katlı A Blok'un modellenmesi.....	53
Şekil 40.	Autodesk Revit yazılımı aracılığıyla yapı adasındaki tüm yapıların 3 boyutlu olarak modellenmesi.....	53
Şekil 41.	CAD geometrisinin Autodesk CFD Ultimate yazılımına aktarılması	54
Şekil 42.	Simüle edilecek alanın sınırlarının belirlenmesi.....	54
Şekil 43.	Izgara çözünürlüğünün belirlenmesi ve ızgara (mesh) oluşturma işlemi	55
Şekil 44.	Simülasyon aracı üzerinde sınır koşulları, materyallerin, akış tipi ve türbülans modelinin belirlenmesi	56
Şekil 45.	Rüzgâr hızı vektörleri, basınç, sıcaklık gibi parametrelerin simülasyon sürecindeki değişkenliği	57
Şekil 46.	Yapılan rüzgâr akış simülasyonunda z ekseninde düzlem (plane) aracı kullanılarak yaya seviyesi rüzgâr hız vektörlerinin incelenmesi.....	57
Şekil 47.	Autodesk CFD Ultimate'de iz (traces) aracı kullanılarak yapıların çevresinde oluşan akış hız (velocity) vektörlerinin görselleştirilmesi.....	58
Şekil 48.	Yapıların üzerinde oluşan statik basınç ve yapıların ızgara (mesh) görünümü.....	58
Şekil 49.	Mevcut tasarımın ve alternatif modellerin analizinde takip edilecek adımlar	59
Şekil 50.	Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	61
Şekil 51.	Analiz sonuçlarından y-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	65
Şekil 52.	Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	68
Şekil 53.	Analiz sonuçlarından x-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	72
Şekil 54.	Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	76
Şekil 55.	Analiz sonuçlarından y-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	79
Şekil 56.	Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	83
Şekil 57.	Analiz sonuçlarından x-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	86
Şekil 58.	İkinci alternatif modelin CAD geometrisinin oluşturulması ve alanın 3 boyutlu görselleştirilmesi.....	90
Şekil 59.	Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	91
Şekil 60.	Analiz sonuçlarından y-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	94
Şekil 61.	Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	97
Şekil 62.	Analiz sonuçlarından x-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları.....	100
Şekil 63.	Yüksek katlı yapılarda iç ve dış strüktürel sistemler (Ali & Moon, 2007).....	108
Şekil 64.	30 St Mary Axe (Foster+Partners) diagrid çerçeve strüktürel yapısı ve yapının tepesinde yer alan çelik halka strüktür (URL-4).....	108

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. 1970’lerden 2020’li yıllara göre bilgisayarların birim zamandaki işlem ve veri oluşturma kapasitesi (Jameson, 2012)	9
Tablo 2. Hesaplmalı akışkanlar dinamiğinde sayısal ve fiziksel modelleme avantaj ve dezavantajları (Kiriççi, V., 2016).....	9
Tablo 3. Mimarlıkta HAD kullanım alanları, HAD’ın avantajları, dezavantajları ve örnek çalışmalar	20
Tablo 4. İç mekân iklim parametreleri ve HAD (Den Hartog vd., 2000).....	22
Tablo 5. Trabzon’da aylara göre rüzgâr yönlerinin yüzdelik dağılımı ve yıllık ortalamaları (Karadeniz, 1995).....	46
Tablo 6. Trabzon Meteoroloji İstasyonu verilerine göre aylara göre hâkim rüzgâr yönleri.....	46
Tablo 7. Bazı yönlere göre aylık fırtına sayıları (Engin, 2004)	47
Tablo 8. Tasarım platformlarına entegre edilen HAD eklentilerinin farklı yönleriyle kapsamlı biçimde karşılaştırılması (Hu vd., 2023).....	49
Tablo 9. Kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y).....	62
Tablo 10. Kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (y-z).....	65
Tablo 11. Batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y).....	69
Tablo 12. Batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-z).....	73
Tablo 13. Kuzey (N) ve batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyonunda yapılara etki eden statik basınç (Pa) değerleri	75
Tablo 14. Birinci alternatif model için kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y)	77
Tablo 15. Birinci alternatif model için kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (y-z)	80
Tablo 16. Birinci alternatif model için batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y)	84
Tablo 17. Birinci alternatif model için batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-z)	86
Tablo 18. Birinci alternatif model için kuzey (N) ve batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyonunda yapılara etki eden statik basınç (Pa) değerleri	89

Tablo 19.	İkinci alternatif model için kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y)	92
Tablo 20.	İkinci alternatif model için kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (y-z)	95
Tablo 21.	İkinci alternatif model için batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y)	98
Tablo 22.	İkinci alternatif model için batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-z)	101
Tablo 23.	İkinci alternatif model için kuzey (N) ve batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyonunda yapılara etki eden statik basınç (Pa) değerleri	103
Tablo 24.	Mevcut yapılanma ve alternatif modellerin kuzey (N) ve batı (W) yönlü yaya seviyesi rüzgâr akış analizi	104
Tablo 25.	Mevcut yapı ve alternatif modellerde yapıların üst katlarında oluşan kuzey (N) ve batı (W) yönlü rüzgâr etkileşimi	105
Tablo 26.	Mevcut yapılanma ve alternatif modellerde yapıların kuzey (N) ve batı (W) yönlü rüzgâr ile etkileşimini gösteren kesitler	106

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

m: metre

m²: metrekare

m³: metreküp

km: kilometre

kg: kilogram

s: saniye

h: saat

Pa: Pascal

Re: Reynolds sayısı

ρ : Akışkanın yoğunluğu

v: Akışkan hızı

μ : Viskozite

μt : Eddy viskozitesi

d: Akışın gerçekleştiği kanalın veya tüpün çapı

u, v, w: akışkanın x, y, z yönünde vektörel hız bileşenleri

τ : Kayma gerilmesi

t: Geçen zaman, akışın gerçekleştiği süre

Δt : Zaman aralığı

k: Termal iletkenlik katsayısı

e: Enerji

q: Aktarılan ısı miktarı

T: Sıcaklık

ε : Dağılma hızı

f_x : x yönünde uygulanan kuvvet

f_y : y yönünde uygulanan kuvvet

f_z : z yönünde uygulanan kuvvet

∂ : Kısmi türev

μ_{eff} : Manyetik moment

AIJ: Architectural Institute of Japan (Japonya Mimarlık Enstitüsü)

ASCE: American Society of Civil Engineers (Amerikan İnşaat Mühendisleri Topluluğu)

CAD: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)

CFD: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)

CHTC: Convective Heat Transfer Coefficient (Konvektif Isı Transfer Katsayısı)

CPU: Central Process Unit (Merkezi İşlem Birimi)

DES: Discrete Event Simulation (Ayrık Olay Benzetimi)

DNS: Direct Numerical Simulation (Doğrudan Sayısal Benzetim)

EN: European Norm (Avrupa Normları)

HAD: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

HVAC: Heating, Ventilation, and Air Conditioning (Isıtma, Havalandırma, İklimlendirme)

IBPSA: International Building Performance Simulation Association (Uluslararası Bina Performans Simülasyon Derneği)

LES: Large Eddy Simulation (Büyük Girdap Simülasyonu)

RAM: Random Access Memory (Rastgele Erişim Belleği)

RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes)

RNG: Renormalization Group

SIMPLE: Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı Kapalı Yöntem)

SST: Shear Stress Transport (Kayma Gerilmesi Taşınımı)

TS: Türk Standartları

URANS: Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (Kararsız Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes)

VLES: Very Large Eddy Simulation (Çok Geniş Girdap Simülasyonu)

WDR: Wind-driven Rain (Rüzgârın Yönlendirdiği Yağmur)

1. GENEL BİLGİLER

Mimarlık alanı, teknolojinin ilerlemesinin büyük bir itici güç olmasıyla birlikte son yıllarda önemli ölçüde gelişmiştir. Mimariyi etkileyen teknolojik ilerlemenin kilit alanlarından biri, akışkanlarla ilgili sorunları çözmek ve analiz etmek için sayısal yöntemlerin kullanılması olan hesaplamalı akışkanlar dinamiğidir (HAD). HAD, havacılık, otomotiv ve endüstri mühendisliği gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak mimarideki uygulaması nispeten yenidir.

HAD, mimarların binaların içinde ve çevresinde hava ve su gibi akışkanların davranışını simüle etmesine ve analiz etmesine olanak tanıyan güçlü bir araçtır. Bir binanın HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sisteminin performansını, bir odadaki hava akış modellerini, rüzgâr ve havanın bina üzerindeki etkilerini tahmin etmeye yardımcı olabilmektedir. Bu simülasyonlarla, mimarların tasarım sürecinde bilinçli kararlar almasına yardımcı olarak daha verimli ve etkili tasarımlara yön verebilir.

HAD simülasyonları, pencere yerleştirme ve gölgeleme elemanları gibi çeşitli tasarım öğelerinin binanın termal konforu ve enerji tüketimi üzerindeki etkisini analiz ederek mimarların binaların enerji performansını optimize etmelerine de yardımcı olmaktadır. Bu uygulamalar daha sürdürülebilir, çevre dostu tasarımların gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır. Ancak, HAD simülasyonları mimarlara birçok fayda sağlarken bazı sınırlamaları da barındırmaktadır. Örneğin, HAD simülasyonları hesaplama açısından yoğun olabildiği gibi sonuçları ayarlamak ve yorumlamak için de önemli bilgi işlem gücü ve uzmanlık gerektirmektedir. Ayrıca, HAD simülasyonları yalnızca modelde kullanılan varsayımlar ve parametreler kadar doğrudur ve girdi verilerindeki hatalar veya belirsizlikler sonuçları önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

Genel olarak, mimaride HAD kullanımı, binaları tasarlama ve inşa etme şeklimizde devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Hesaplamalı yöntemlerin gücünden yararlanan mimarlar hem bina sakinlerinin hem de çevrenin ihtiyaçlarını karşılayan daha verimli, sürdürülebilir ve dirençli binalar tasarlayabilir.

1.1.1. Problemin Tanımı

Rüzgâr, yüksek binaların tasarımını ve inşasını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Yüksek yapıların etrafındaki rüzgârın karmaşık akış modelleri, aşırı rüzgâr yükleri, dinamik tepki, titreşim ve yapı sakinleri için rahatsızlık gibi sorunlara yol açabilir. Sonuç olarak; bina aerodinamiği, yüksek binalar için tasarım sürecinin önemli bir parçası haline gelmiştir. HAD; karmaşık akış modellerinin simülasyonuna ve binanın dinamik davranışının tahminine olanak tanıyan, yüksek binalar üzerindeki rüzgâr etkilerini analiz etmek için güçlü bir araçtır.

Özellikle sahil yerleşkelerinde yapıların maruz kaldığı rüzgâr yükleri ve etkileri önemli bir sorundur. Çalışma kapsamında Trabzon ili Yomra ilçesinde rüzgâr yüklerine ve etkilerine yoğun biçimde maruz kalan bir sahil yerleşkesi örneklem olarak belirlenmiştir. Bahsi geçen alan genellikle dikdörtgen biçimli 12-27 kat arası orta ve yüksek katlı konut ve ofis yapılarının bulunduğu, yoğun biçimde Karadeniz'den gelen ve kuzey yönlü rüzgarlara maruz kalan bir liman ve konut yerleşkesidir. Bu yerleşkedeki ana problemler yüksek katlı yapılarda oluşan rüzgâr yükleri, binanın yüksek hızlı rüzgâr akışkan vektörlerine maruz kaldığı için yüzeyinde oluşan yoğun statik basınç ve oluşan kısmi mekanik rezonans etkileridir. Çalışma bu problemleri irdelemeyi ve erken tasarım aşamasında çözüm olacak bir bakış açısı sunmayı hedeflemektedir.

1.1.2. Araştırmanın Amacı, Kapsamı ve Önemi

Bu çalışmanın amacı, yüksek katlı binalardaki rüzgâr etkilerinin HAD simülasyonları kullanılarak araştırılmasıdır. Çalışmada, binanın aerodinamik özellikleri ve yapıya etkileyen rüzgâr yükleri ve dinamik tepkileri nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında Trabzon ilinde var olan bir konut yerleşkesindeki rüzgâr akışı simüle edilerek Türkiye ve özellikle Karadeniz Bölgesi örnekleminde yüksek katlı yapılardaki rüzgâr etkileri değerlendirilmiştir.

Çalışmanın kapsamı, yüksek katlı bir binanın HAD aracılığıyla modellenmesi ve simülasyonunun gerçekleştirilmesi, sonuçların analizi, simülasyon sonuçlarından yola çıkarak alternatif modeller geliştirmek ve oluşturulan bu alternatif modellerin var olan modelle arasındaki farkları, avantajları ve dezavantajları ortaya koyarak tasarım sürecine yönelik bir bakış açısı oluşturmaktır. Çalışma ayrıca literatürdeki vaka tabanlı bazı çalışmaları da ele almaktadır.

Çalışma mimarlık alanında henüz yeni sayılabilecek bir kavram olan HAD çalışmalarını irdeleyerek performatif mimarlık (yapılı çevrenin tasarlanması için dijital teknolojileri kullanan, sürdürülebilir bir mimarlık anlayışı) adına bir bakış açısı oluşturmayı ve bunu vaka tabanlı bir araştırmayla ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışma bu özellikleriyle özellikle Türkçe literatürde oldukça az olan çalışma sayısına rağmen bundan sonraki yapılacak çalışmalar için bir kılavuz olmayı amaçlamaktadır. Çalışmanın bir diğer amacı da ilerleyen yıllarda yüksek yapılar için rüzgâr performansı değerlendirme standardı veya yönetmeliği için yerel bir kılavuz olmayı hedeflemektedir.

1.1.3. Materyal ve Yöntem

Çalışmada öncelikle bir yol haritası oluşturmak amacıyla yapılan kapsamlı literatür araştırması ele alınmıştır. Bu bölümlerde HAD'ın ne olduğu ve hangi alanlarda kullanıldığının yanı sıra mimarlık alanındaki kullanım amaçları, kullanım yöntemleri ve yaklaşımları anlatılmıştır. Literatür çalışmaları irdelenirken özellikle vaka tabanlı çalışmalarla desteklenmiştir. Buradaki literatür çalışmalarından elde edilen çıkarımlar yapılan simülasyon çalışması için örnek bir kılavuz özelliği taşımaktadır.

Çalışmanın sonraki adımı, hesaplamalı simülasyonların/deneysel ölçümlerin bir kombinasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sürecin ilk basamağında, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanılarak örneklem alan üzerindeki binanın ayrıntılı bir üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Bu model, binanın etrafındaki hava akışını ve sonuçta ortaya çıkan rüzgâr yüklerini ve dinamik tepkileri simüle etmek için kullanılan HAD yazılım paketine aktarılmıştır. Simülasyonda rüzgâr yüklerinin yapı adasının bulunduğu bölgedeki iklim ve rüzgâr verilerinden yola çıkarak bölgede oluşan yüksek hızlı rüzgârların ve fırtınaların yapılar üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu bağlamda yapıların bulunduğu konumdan kaynaklı yıl genelinde yüksek hızlı rüzgârlarla ve fırtınalarla oluşturduğu etkileşimi simüle etmek amaçlanmıştır.

Son olarak elde edilen simülasyon verileri doğrultusunda yapı üzerinde var olan veya olması muhtemel etkiler irdelenerek iki öneri oluşturulmuştur. Bu öneriler tasarım aşamasında yapı üzerindeki etkileri azaltmak amacıyla durumu iyileştirmenin veya optimize etmenin yanı sıra yapının tasarım sürecinde ele alınması gereken önlemler yani alternatif tasarım önerileri olarak sunulmuştur.

1.2. Literatür Özeti

HAD ve akışkanlar dinamiği ile ilgili literatür çalışmaları irdelendiğinde öne çıkan kaynaklardan biri White'in (2011) çalışmasıdır. Bu çalışma genel olarak akışkanlar dinamiğinin tarihsel sürecinden başlayarak günümüzde pratikte vaka tabanlı bazı problemleri çözmede uygulanabilecek çözüm yöntemlerini açıklamaktadır. Çalışma geneli itibariyle hem bir literatür özeti hem de bir uygulama kılavuzudur (White, 2011).

HAD ile ilgili mevcut literatür Euler hatta Newton'a kadar dayanırken Navier-Stokes denklemleri başlıca kaynaklardan biridir. Navier-Stokes denklemleri sıvılar ve gazlar gibi akışkanların hareketini tanımlar. Hareket halindeki bir akışkan için kütle, momentum ve enerjinin korunumunu açıklayan bir dizi kısmi diferansiyel denklemlerdir. Denklemler, 19. yüzyılda bağımsız olarak geliştiren Fransız matematikçi ve fizikçi Claude-Louis Navier ile İrlandalı matematikçi ve fizikçi George Gabriel Stokes'un adını almıştır. Navier-Stokes denklemleri, akışkan dinamiğini anlamak için önemlidir ve hava durumunu anlamaktan uçak kanatları tasarlamaya kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır. Sonuç olarak, denklemleri çözmek ve sıvı davranışı hakkında tahminler yapmak için sayısal yöntemler sıklıkla kullanılır. Bunun yanı sıra Osborne Reynolds'ın çalışmalarıyla ortaya çıkan Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) metodu uzun yıllardır HAD simülasyonlarında temel olarak kullanılmıştır (White, 2011).

HAD ile ilgili çalışmaların birçoğu havacılık alanında yapılmıştır ve bu konuda literatürde fazlaca yer tutan bir diğer isim Antony Jameson'dır. Jameson'un Optimum Aerodynamic Design Using CFD and Control Theory adlı makalesi HAD ile tasarım ilişkisinin teorik temelini oluşturan başlıca kaynaktır. Bununla birlikte Jameson tarafından ele alınan bazı diğer çalışmalar da tasarım ve optimizasyon sürecinde HAD kullanımını ve HAD'ın geleceği konusunda çeşitli açıklamalarda bulunmaktadır (Jameson, 1995), (Jameson, 2012).

Literatürde mimarlık ve yapı alanındaki HAD çalışmaları ise nispeten yakın tarihlerde ortaya çıkmaktadır ve erken dönem çalışmalarının birçoğu iç ortam tasarımı, iç ortamda havalandırma, ısı ve kütle transferi konularını incelemektedir. Örneğin; Awbi (1991), Chen vd. (1995), Hayashi vd. (2002), Kim vd. (2005) çalışmaları gibi. Bu çalışmalar genel olarak bir oda vb. kapalı alan için havalandırma ve ısı transferi konularını irdellemektedir. Doğal havalandırma konusunda ise; van Hooff ve Blocken'in (2010a) (2010b) çalışmaları örnek olarak verilebilir.

Bu alanda yapılan HAD çalışmalarında kendine en fazla yer tutan konu ise şüphesiz bir yapı etrafındaki yaya seviyesi rüzgâr konforu çalışmalarıdır. Bu çalışmalar bina çevresinde oluşan rüzgâr akışını ve bu süreçteki olası etkileri irdelemektedir. Örneğin; He ve Song (1999), Tominaga vd. (2008), Blocken ve Persoon (2009). Bu çalışmalar vaka tabanlı olmakla birlikte yapıları çevrede yer alan bazı yapıların rüzgâr konforunu değerlendirmeye yöneliktir.

Mimarlık ve yapı alanıyla bağlantılı özellikle son yıllarda gündeme gelen rüzgarla yönlendirilen yağmur (WDR / wind-driven-rain) konusunda da başlıca çalışmalar bulunmaktadır: Bu konuya örnek Tang vd. (2004), Blocken ve Carmeliet (2005) (2006), Briggen vd. (2009), ISO (2009), Llarena vd. (2018) çalışmalarıdır. Yine son yıllarda oldukça gündemde olan bir diğer konu ise binaların etrafında oluşan kirletici dağılımıdır. Bu konuda yapılan vaka tabanlı başlıca çalışmalar ise şunlardır: Tominaga ve Stathopoulos (2007a) (2007b) (2008), Gousseau vd. (2018). Literatürde kendine çok az yer bulan bina yüzeylerindeki konvektif ısı transfer katsayıları konusunda ise başlıca çalışma Blocken vd. (2009)'dur.

Literatürde mimarlık alanında yapılmış HAD çalışmalarında kendine yer bulmuş bir diğer konu ise yüksek katlı yapılar ve bu tür yapılarda oluşan rüzgâr davranışlarıdır. Bu konuda yapılan başlıca çalışmalardan biri Yoshie vd. (2007)'dir. Bu çalışma AIJ (Japonya Mimarlık Enstitüsü) tarafından hazırlanan uygulama kılavuzu için de örnek teşkil etmektedir. AIJ uygulama kılavuzunun hazırlandığı kaynak ise Tamura vd. (2008)'dir. Yüksek katlı yapılarla ilgili olarak yapılan diğer çalışmalara Shireen ve James (2017) örnek olarak verilebilir. Bu çalışmalarda yüksek katlı bazı yapı örnekleri HAD yazılımlarıyla analiz edilmiş ve rüzgâr tüneli çalışmalarıyla desteklenmiştir. Türkiye'de literatürde son yıllarda bu konuyla ilgili olarak yapılan çalışmalar ise Gürses (2012), Kiriççi (2016), Bilgen (2019) çalışmalarıdır. Kiriççi (2016), Osman Gazi köprüsü üzerinde oluşan akışı HAD simülasyonu ile açıklarken Bilgen (2019) kıvrımlı yapılar ile prizmatik yapıların arasındaki tasarımdan kaynaklı aerodinamik avantaj ve dezavantajları ele almıştır. Gürses (2012), yapılara etki eden rüzgâr yüklerini ASCE ve EN (Eurocode) standartları bağlamında ele almaktadır.

Tüm bunların yanı sıra yapılarda rüzgâr etkilerinin ve yüklerine yönelik bazı yönetmelik ve standartlar da mevcuttur. Bunlardan bazıları EN 1991-1-4 (Eurocode 1, 1-4), TS EN 1991-1-1-4, ASCE/SEI 7-02'dir. Bu standartlar yapılardaki rüzgâr etkilerini ve yüklerini belirlenmesinde kullanılmaktadır. 2021 yılında güncellenen TS 498'de de rüzgâr

yüklerine yönelik bir bölüm bulunmaktadır. Ayrıca ülkemizde İstanbul ilinde büyükşehir belediye sınırları içinde inşa edilen yüksek katlı yapıların rüzgâr etkileri ve yükleriyle ilgili olarak İstanbul Büyükşehir Belediyesi İmar Müdürlüğü tarafından hazırlanan “İstanbul Yüksek Binalar Rüzgâr Yönetmeliği” de bulunmaktadır.

1.3. HAD (CFD) Nedir?

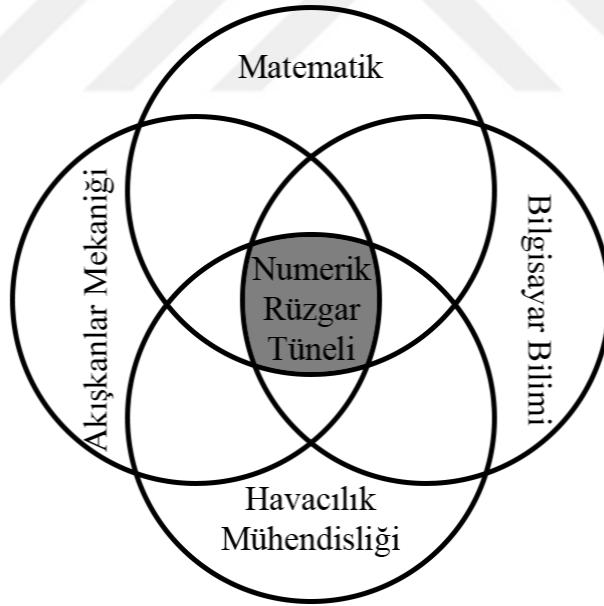
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), bilim insanlarının ve mühendislerin çeşitli ortamlarda akışkan akışının davranışını simüle etmelerine olanak tanıyan güçlü bir araçtır. Akışkan olgusu, uçak tasarımı ve hava tahmininden biyolojik sistemlere ve çevre araştırmalarına kadar çok çeşitli mühendislik ve bilimsel uygulamalarda çok önemli bir rol oynamaktadır. Akışkan davranışını simüle etme ve tahmin etme yeteneği, mühendislik sistemlerini tasarlamak ve optimize etmek, doğal olayları anlamak ve karmaşık sorunlara yenilikçi çözümler geliştirmek için çok önemlidir. Temelleri havacılık ve ısı transferi alanlarında atılan HAD günümüzde pek çok mühendislik disiplininde kullanılan bir araçtır. Bu özellikleriyle HAD araçlarının bilime ve problem çözümü yapılan uygulamalarda sağladığı fayda şüphesiz ki önem arz etmektedir (Jameson, 2012).

1950’li yıllarda sayısal yöntemlerdeki gelişmeler ile başlayan süreç 2000’li yıllarda ivme kazanarak bugün bildiğimiz anlamda karmaşık problemlerin modellenmesini sağlayan genel ve özel amaçlı HAD algoritmalarının ve yazılımların oluşturulması noktasına gelmiştir. Günümüzde havacılık, makine, kimya, biyomekanik, çevre ve inşaat gibi birçok mühendislik dalında oldukça yaygın olarak kullanılan bu metot, tasarım ve analiz süreçlerinde hem endüstriyel hem de akademik anlamda etkili sonuçlar vermektedir. Özellikle, gelişen bilgisayar teknolojisine paralel olarak, HAD alanında kullanılan yazılımlarda da önemli ilerlemeler kaydedilerek birçok ticari ve açık kaynak kodlu yazılım geliştirilmiştir (Kiriççi, 2016).

Günümüzde ticari lisanslı ve açık kaynak kodlu olarak kullanılan başlıca HAD yazılımları; Autodesk CFD, ANSYS CFD-CFX, ANSYS Fluent, OpenFOAM, CFD Module, Flowsquare, Paraview ve Altair CFD olarak sayılabilir. Bu hala geliştirilmekte olan HAD yazılımları ile üç boyutta karmaşık akış problemlerini istenilen türbülans modeli kullanılarak, zamana bağlı olarak gerçek koşulları benzetim yapacak biçimde modelleyerek çözebilmek mümkündür. Ayrıca Revit ve Solidworks gibi CAD/CAM/BIM yazılımlarının da HAD’a yönelik eklentilerinin bulunduğu da bilinmektedir.

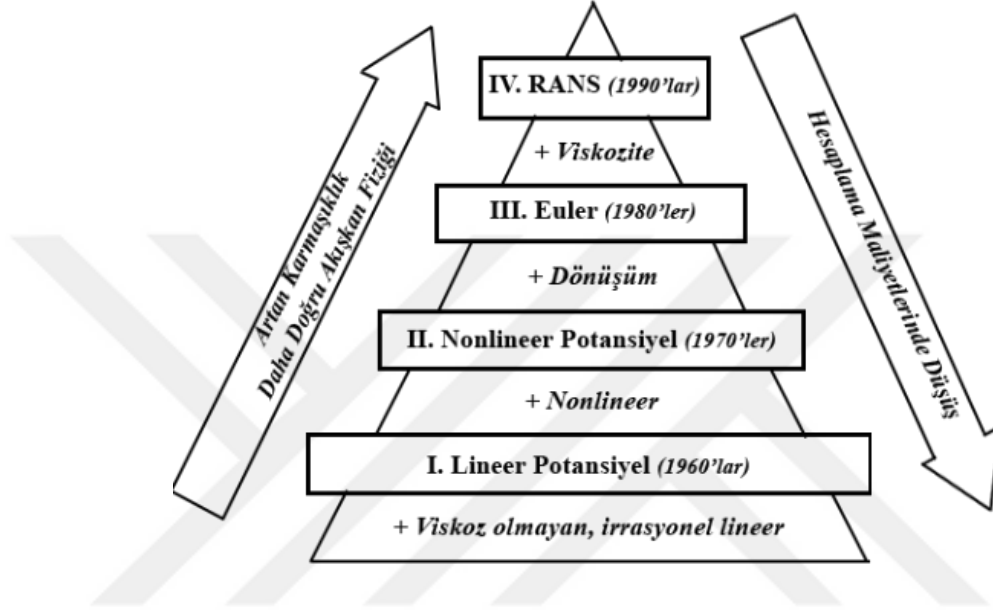
HAD'ın geliştiği süreçte 1960'lı yıllardan itibaren çeşitli hesaplama yöntemleri geliştirilmiş olsa da birçoğu Navier-Stokes denklemine dayanmaktadır. Akışkanların hareketini tanımlayan temel denklemler, kütle, momentum ve enerjinin korunumu prensibinden türetilmiş olan Navier-Stokes denklemleridir. Navier-Stokes denklemlerinin karmaşık ve lineer olmayan (eliptik, hiperbolik) diferansiyel ifadeler içermesi nedeniyle doğrudan çözümü oldukça zordur. Ancak bu denklemler cebirli ifadelerle dönüştürülerek uzayda ve zamanda numerik metotlarla ayrıştırıldıktan sonra başlangıç ve sınır şartları belirlenerek çözümlenebilir.

Şekil 1'de akışkanlar mekaniği, matematik, bilgisayar bilimi ve havacılık alanlarının kesişimi olan “numerik rüzgâr tüneli” yani HAD'ı göstermektedir. Jameson'a göre HAD şekilde görüldüğü üzere pek çok disiplinin ortak çalışma alanıdır. Bu anlatıma göre bu dört alandan herhangi birinin olmadığı bir HAD simülasyonu mümkün değildir. HAD simülasyonları bu dört çalışma alanının ortak katkılarıyla gelişmiş ve gelişmeye devam etmektedir.



Şekil 1. Akışkanlar mekaniği (numerik rüzgâr tüneli): matematik, bilgisayar bilimi ve havacılık bilimlerinin ortak çalışma alanıdır (Jameson, 2012)

1960'lı yıllarda “lineer potansiyel” ile başlayan süreç; 1970’li yıllarda “lineer olmayan potansiyel”, 1980’li yıllarda “Euler”, 1990’larda RANS metodu ve 2000’li yıllarda ise daha hibrit olan LES, VLES, DES, URANS gibi metotlarla yoluna devam etmektedir. Şekil 2 ise 1960’lı yıllardan günümüze kadar HAD alanında kullanılan yöntemlerin zamanla değişimini göstermektedir.



Şekil 2. Geçerli denklemlerin hiyerarşisi (Jameson, 2012)

HAD simülasyonları, ızgara oluşturma, türbülans modelleme ve yakınsama kriterleri dahil olmak üzere çeşitli zorlukları barındırır. Izgara oluşturma, çalışılan fiziksel problemin geometrisini doğru bir şekilde temsil eden uygun bir ızgara oluşturmayı içerir. Türbülans, gerçekçi sonuçlar elde etmek için doğru modellemeyi gerektiren karmaşık bir kavram olduğundan, türbülans modellemesi HAD'daki başka bir zorluktur. Son olarak, çözümün kararlı durum çözümüne ulaştığını belirlemek için yakınsama kriterleri kullanılır ve simülasyon sonlandırılabilir. Bilgisayar teknolojisinin gelişimine bağlı olarak akışkanlar mekaniğinin alt dallarından biri olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği de ciddi bir gelişim göstermiştir. Tablo 1’de bilgisayar teknolojisindeki gelişimin birim zamanda yapılan işlem sayısı ile orantılı olarak arttığı ifade edilmektedir. Dolayısıyla yapılan analizlerin birim süredeki tekrar sayısının artmasına rağmen işlem sürelerinin oldukça kısaldığını göstermektedir. Bu durum analizlerin doğrulama çalışmalarının gelişmesinde de etkili olmuştur. Hesaplama gücündeki ve sayısal algoritmalarındaki ilerlemelerin daha da doğru ve verimli simülasyonlara yol açması beklenen HAD'ın, geleceği umut vericidir.

Tablo 1. 1970’lerden 2020’li yıllara göre bilgisayarların birim zamandaki işlem ve veri oluşturma kapasitesi (Jameson, 2012)

Yıl	Model	Saniye Başına Kayan Nokta İşlem Sayısı	Sayısal Gösterim
1970	CDC6600	1 Megaflops	10^6
1980	Cray 1 Vector Computer	100 Megaflops	10^8
1994	IBM SP2 Parallel Computer	10 Gigaflops	10^{10}
2007	Linux Clusters	100 Teraflops	10^{14}
2009	HP Pavilion Quadcore Computer	1 Gigaflops	10^9
2011	Macbook Pro Quadcore	2.5 Gigaflops	$2,5 \times 10^9$
2023	Nvidia RTX 4090 GPU	100 Teraflops	10^{14}

Tablo 2’de sayısal ve fiziksel modelleme yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları gösterilmektedir. Sayısal ve fiziksel modelleme metotlarının sahip olduğu kendine özgü avantaj ve dezavantajlar bulunmaktadır. Bu nedenle iki yöntemi birbirine alternatif olarak değil birbirini tamamlayan araçlar olarak görmek daha doğru bir yaklaşım olacaktır (Kiriççi, 2016).

Tablo 2. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde sayısal ve fiziksel modelleme avantaj ve dezavantajları (Kiriççi, V., 2016)

	SAYISAL MODELLEME (HAD Yazılımları)	FİZİKSEL MODELLEME (Rüzgâr Tüneli vb.)
AVANTAJLAR	• Zamandan tasarruf • Her geometri ve fiziksel koşulun gerektirmeden ölçek uygulanabilmesi • İstenilen her parametrenin hesaplanabilmesi	• Gerçekçi ve güvenilir sonuçlar vermesi • Doğrudan gözlemlene yapılabildiği
DEZAVANTAJLAR	• Bilgisayar ve kod kaynaklı yuvarlama hataları • Bilgisayar performansı ve hesaplama gücü ile sınırlı olması • Ayırıklaştırma hataları • Doğrulama gerektirmesi	• Ölçeklendirme gerektirmesi • Zaman ve maliyet • Her geometri ve fiziksel duruma uygulanamaması • Sınırlı ölçüm imkânı

1.3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Kullanım Alanları

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği pek çok meslek disiplini ve bilimsel araştırma alanı içinde yer almakta ve bu alanları etkilemektedir, bunun yanı sıra kimi meslek disiplininde direkt olarak kendine bir alan olarak yer bulmuştur. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin başlıca kullanıldığı alanlar şöyledir:

- Uzun ve havacılık (aerodinamik ve aeroakustik analizlerde)
- Otomotiv sektörü ve motor sporları (aerodinamik analizlerde)
- Gemi, tekne yapımı ve mühendisliği (basınç davranışları ve analizlerde)
- Çevre, makine ve enerji sistemleri mühendisliği (HVAC sistemleri, termal tasarım)
- Mimarlık ve Yapı Mühendisliği
- Jeofizik ve maden mühendisliği
- Astrofizik
- Kimya endüstrisi ve mühendisliği
- Endüstriyel ürün tasarımı, medikal ürün tasarımı vb.

1.3.2. HAD Hakkında Bilimsel Altyapı

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonları, kullanılan matematiksel model ve sayısal yöntemlere bağlı olarak doğruluğu değişebilir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği temel denklemleri arasında Boltzmann denklemleri, Navier-Stokes denklemleri, Euler denklemleri, tam potansiyel denklemi, Prandtl-Glauert denklemi/dalga denklemi ve potansiyel denklemi/Laplace denklemi yer alır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile akış çözümlerinde farklı sayısal ayrıklaştırma yöntemleri kullanılabilir: sonlu farklar yöntemleri, sonlu hacim yöntemleri, sonlu eleman yöntemleri, spektral yöntemler ve ağsız yöntemler. Zamanda ilerleme yöntemleri, zamana bağlı problemler için kullanılırken; sonlu farklar yöntemleri, sonlu hacim yöntemleri, sonlu eleman yöntemleri, spektral yöntemler ve ağsız yöntemler gibi sayısal ayrıklaştırma yöntemleri probleme uygun olarak kullanılır.

Çalışma kapsamında genellikle RANS metodu kullanılacağı için Reynolds ve Navier-Stokes denklemlerini anlatma ihtiyacı bulunmuştur. Çalışmanın bu bölümünde bu denklemlerle akışkanlar arasında ilişki kurularak bilimsel bir altyapı oluşturmak amaçlanmıştır.

- Reynolds Sayısı

İngiliz bilim insanı Osborne Reynolds (1842-1912) tarafından bulunan bu sayı temel olarak akışkanın atalet kuvvetlerin, viskozite kuvvetlerine oranını belirtmektedir. Bu sayı genel olarak belirtilen iki kuvvetin birbirine göre göreceliliğini ortaya koymaktadır. Bu sayede laminar ve türbülanslı akışların akış rejimlerini nitelendirmektedir. Reynold Sayısı, $Re = (\rho v d)/\mu$ formülüyle hesaplanmaktadır. Bu formülde **Re**: Reynold sayısı, **ρ** : akışkanın yoğunluğu (kg/m^3), **v**: akışkanın hızı (m/s), **d**: akışın gerçekleştiği kanalın veya tüpün çapı (m), **μ** : akışkanın viskozitesi ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) olarak ifade edilebilir.

$$Re = \frac{\rho v_s d}{\mu} = \frac{v_s d}{\nu} = \frac{\text{Atalet Kuvvetleri}}{\text{Viskozite Kuvvetleri}} \quad (1)$$

- Navier-Stokes Denklemleri

Akışkanlar dinamiğindeki temel denklemler rüzgâr akışına uygulanabilir. HAD yazılımlarındaki sıvı veya rüzgâr akışları, kütle, enerji ve momentumun korunumu yasalarına dayanan kısmi diferansiyel denklemlerle çözümlenmektedir. Şu denklemler ise sabit viskoziteli, üç boyutlu, sürekli ve sıkıştırılamaz akışlar için uygulanılmaktadır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad \begin{array}{l} \text{Süreklilik} \\ \text{Denklemi} \\ (2) \end{array}$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad \begin{array}{l} \text{Momentum} \\ \text{Denklemi} \\ (3-x) \end{array}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad \begin{array}{l} \text{Momentum} \\ \text{Denklemi} \\ (3-y) \end{array}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \rho f_z \quad \begin{array}{l} \text{Momentum} \\ \text{Denklemi} \\ (3-z) \end{array}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\tau_{xx} = -\frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\tau_{yy} = -\frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\tau_{zz} = -\frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = & \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} \\ & - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial (v\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yy})}{\partial y} \\ & + \frac{\partial (w\tau_{zy})}{\partial z} + \rho f \cdot V \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Enerji} \\ \text{denklemleri (4)} \end{array}$$

Burada ρ sıvının kg/m^3 cinsinden yoğunluğu, $\mathbf{u}$, $\mathbf{v}$ ve $\mathbf{w}$ akışkanın x,y ve z yönünde m/s cinsinden vektörel hızları, $\boldsymbol{\tau}$ Pa cinsinden kayma gerilmesi, t saniye cinsinden geçen zamanı, $\mathbf{f}_x$, $\mathbf{f}_y$ ve $\mathbf{f}_z$ N cinsinden uygulanan kuvvetleri, μ Pa.s cinsinden moleküler viskozite katsayısını, V m/s cinsinden hız vektörünü, k termal iletkenlik katsayısını, e J cinsinden iç enerjiyi, T °C cinsinden sıcaklığı, q ise $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ cinsinden aktarılan ısıyı göstermektedir.

- Standart k-ε Türbülans Modeli

Standart k-ε modeli, türbülans kinetik enerjisi (k) ve onun dağılım hızı (ϵ) için transport denklemlerine dayanan yarı-ampirik bir modeldir, k için transport denklemi tam denklemden türetilirken, ϵ transport denklemi fiziksel akıl yürütme kullanılarak elde edilmiştir ve matematiksel olarak tam karşılığına çok az benzerlik göstermektedir. Standart k-ε modelinin türetilmesinde, akışın tamamen türbülanslı olduğu ve moleküler viskozitenin etkilerinin ihmal edilebilir olduğu varsayımı vardır ve yalnızca türbülanslı akışta geçerlidir.

Kinetik enerji transport denklemi:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - P_k + \rho \epsilon \quad (5)$$

Dağılım hızı (ϵ) için transport denklemi:

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] - C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k + C_{2\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_\epsilon \quad (6)$$

Burada ρ havanın yoğunluğunu, P havanın basıncını, t zamanı, μ_t girdap viskozitesini temsil eder. Türbülans (veya girdap) viskozitesi μ_t , k ve ϵ 'nin aşağıdaki şekilde birleştirilmesiyle hesaplanır:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (8)$$

Model sabitleri $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k ve σ_ϵ aşağıdaki varsayılan değerlere sahiptir:

$$C_{1\epsilon} = 1,44, C_{2\epsilon} = 1,92, C_\mu = 0,09, \sigma_k = 1,0, \sigma_\epsilon = 1,3$$

- RNG k- ϵ Türbülans Modeli

RNG k- ϵ modeli, daha küçük hareket ölçeklerinin etkilerini hesaba katmak amacıyla Navier-Stokes denklemlerini yeniden normalleştirmek için Yakhot ve arkadaşları tarafından Yeniden Normalleştirme Grubu (RNG) yöntemleri kullanılarak geliştirilmiştir. Standart k- ϵ modelinde girdap viskozitesi tek bir türbülans uzunluğu ölçeğinden belirlenir, dolayısıyla hesaplanan türbülanslı difüzyon yalnızca belirtilen ölçekte meydana gelir, oysa gerçekte tüm hareket ölçekleri türbülanslı difüzyona katkıda bulunacaktır. K- ϵ 'a benzer bir türbülans modeli türetmek için kullanılabilecek matematiksel bir teknik olan RNG yaklaşımı, üretim terimindeki değişiklikler yoluyla farklı hareket ölçeklerini açıklamaya çalışan epsilon denkleminin değiştirilmiş bir formuyla sonuçlanır (Yakhot vd., 1992).

Kinetik enerji (k) transport denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (9)$$

Dağılım hızı (ϵ) transport denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (10)$$

$$C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu n^3(1-n/n_0)}{1+\beta n^3} \quad n = Sk/\epsilon \quad \text{ve} \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$$

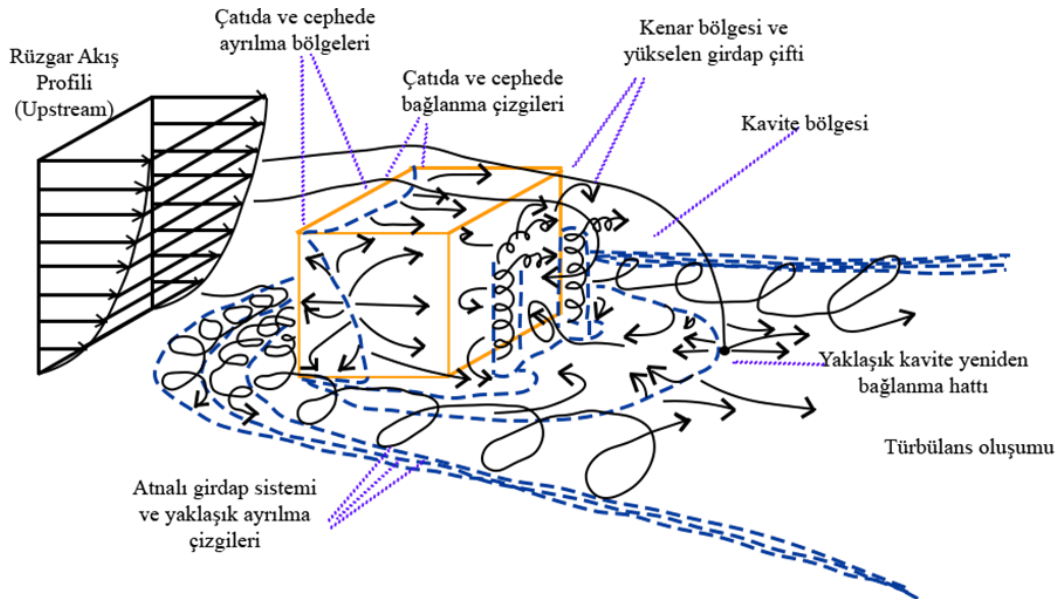
Türbülanslı viskozite, standart k-epsilon modeliyle aynı şekilde hesaplanmaktadır.

Model sabitleri aşağıdaki varsayılan değerlere sahiptir:

$$C_\mu = 0,0845, \sigma_k = 0,7194, \sigma_\epsilon = 0,7194, C_{1\epsilon} = 1,42, C_{2\epsilon} = 1,68, n_0 = 4,38, \beta = 0,012$$

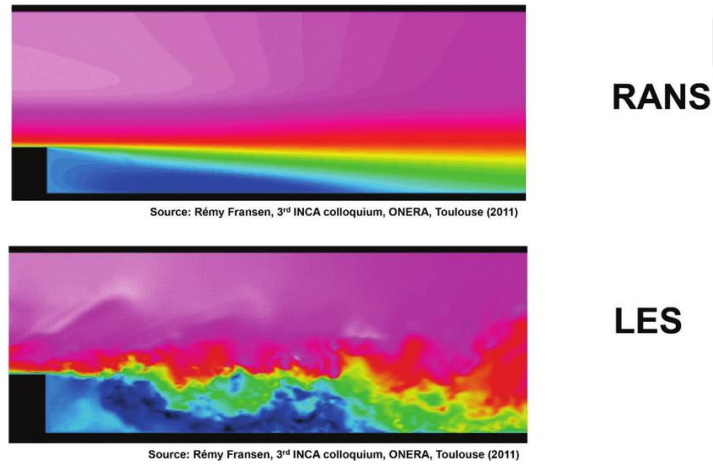
1.3.3. RANS ve LES Metodunun Karşılaştırılması

Bu çalışmada ele alınan konulardaki HAD çalışmalarının çoğunda RANS (Steady RANS) modellemesi kullanılmıştır. Bazı çalışmalar LES kullanımını araştırmıştır. URANS (Unsteady RANS) kullanan çalışmalar çok azdır. URANS'ın tercih edilmemesinin en büyük sebebi bu modelin türbülansı değil istatistikleri simüle etmesidir. URANS türbülansı modellerken genel anlamda kararsız ortalama akış yapılarını çözer, öte yandan LES akışın büyük bir ölçeğini çözebilir. Ayrıca URANS akışları çözmede yüksek uzamsal çözünürlük gerektirdiğinden dolayı LES ve DES çözümleri bunun için daha uygundur. URANS'ın kararsızlığın belirgin olduğu durumlarda kullanılması daha uygundur (Blocken vd., 2011).



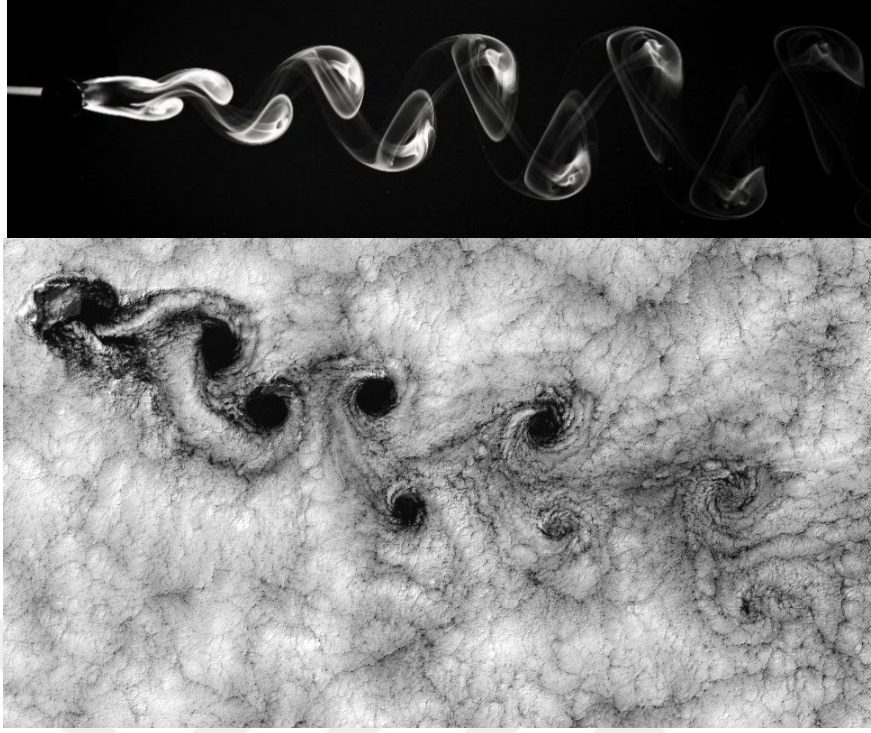
Şekil 3. İzole edilmiş keskin kenarlı az katlı bir binanın etrafındaki ortalama atmosferik sınır tabakası akışının şematik gösterimi (Blocken vd., 2011)

Şekil 3'te kübik, keskin kenarlı bir yapının etrafında oluşan rüzgâr akışı şematize edilmiştir. Oluşan akışta yapının arka yüzeyinde geçici girdap dökülmeleri görülürken RANS ve LES metodunun birbirinden ayrıldığı temel nokta bu alanın çözülmesidir. RANS'ın ana sınırlaması, rüzgâra doğru kenarların akış aşağısındaki ayırma ve yeniden sirkülasyonun doğası gereği geçici davranışını ve ardından von Karman girdap dökülmesini dahil edememesidir (Şekil 4). Sonuç olarak, LES'in potansiyel doğruluğu açıkça üstündür. Bununla birlikte, LES ile yapılan simülasyonlar, RANS muadillerine göre çok daha karmaşıktır. LES, belirli zaman ve alan çözümlenmiş giriş sınır koşulu verileri, belirli ızgara dağılımları, zamansal çözünürlükler, örnekleme zamanları vb. gerektirir. Atmosferik sınır tabakası akışları için LES için ayrıntılı doğrulama ve duyarlılık çalışmaları hala yetersizdir. Binaların etrafındaki dış ortam için RANS simülasyonları için epeyce en iyi uygulama kılavuzlarının olduğuna dikkat edilmeli, ancak bu, en azından şu anda, LES için geçerli değildir. Ek olarak, LES açıkça RANS'tan çok daha fazla zaman almaktadır (Blocken vd., 2011).



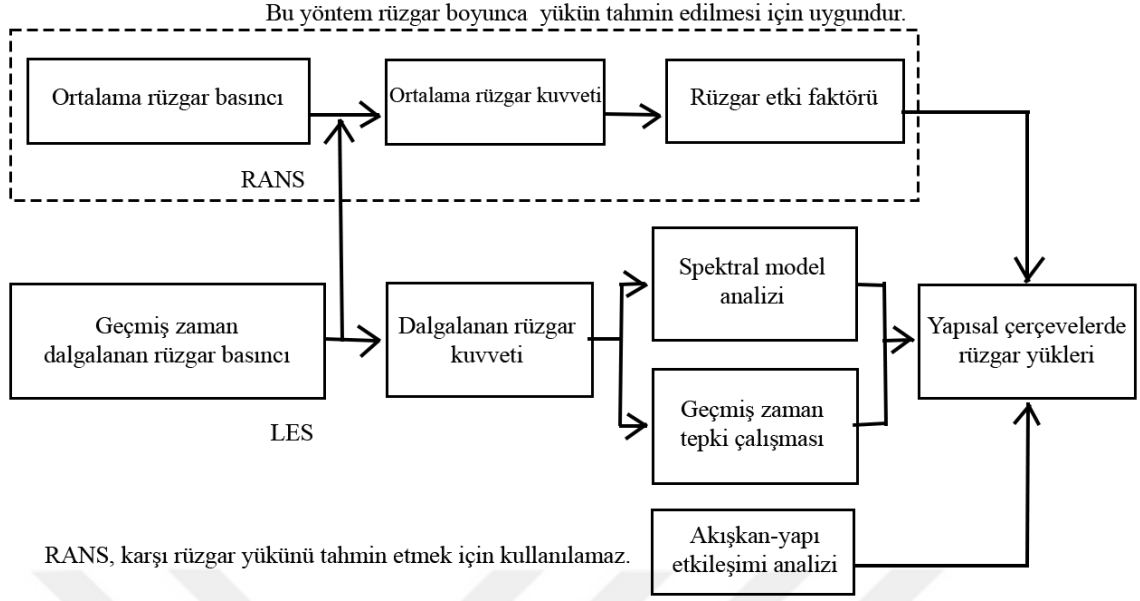
Şekil 4. Aynı cisim üzerindeki akışın RANS ve LES metoduyla çözümü

Genel tanımıyla von Karman girdapları; akışkanlar dinamiğinde akışkanın bir cisime (genellikle silindirik) çarptıktan sonra cismin çevresinde oluşan kararsız akışın oluşturduğu girdapların düzenli olarak tekrar eden vortex (girdap) modelidir. Adını mühendis ve akışkanlar dinamiğinde önemli çalışmalar yapmış olan Theodore von Kármán'dan almaktadır. Bu girdap biçimi RANS metodunda oluşturulamazken ancak LES metoduyla çözümlenebilir. Şekil 5'te von Karman girdap oluşumu meteorolojik bir durum üzerinden örneklendirilmiştir (von Karman, 1963).



Şekil 5. Von Karman girdap oluşumu ve Juan Fernandez adalarında oluşan bir rüzgâr akışının oluşturduğu von Karman girdabı (URL-1)

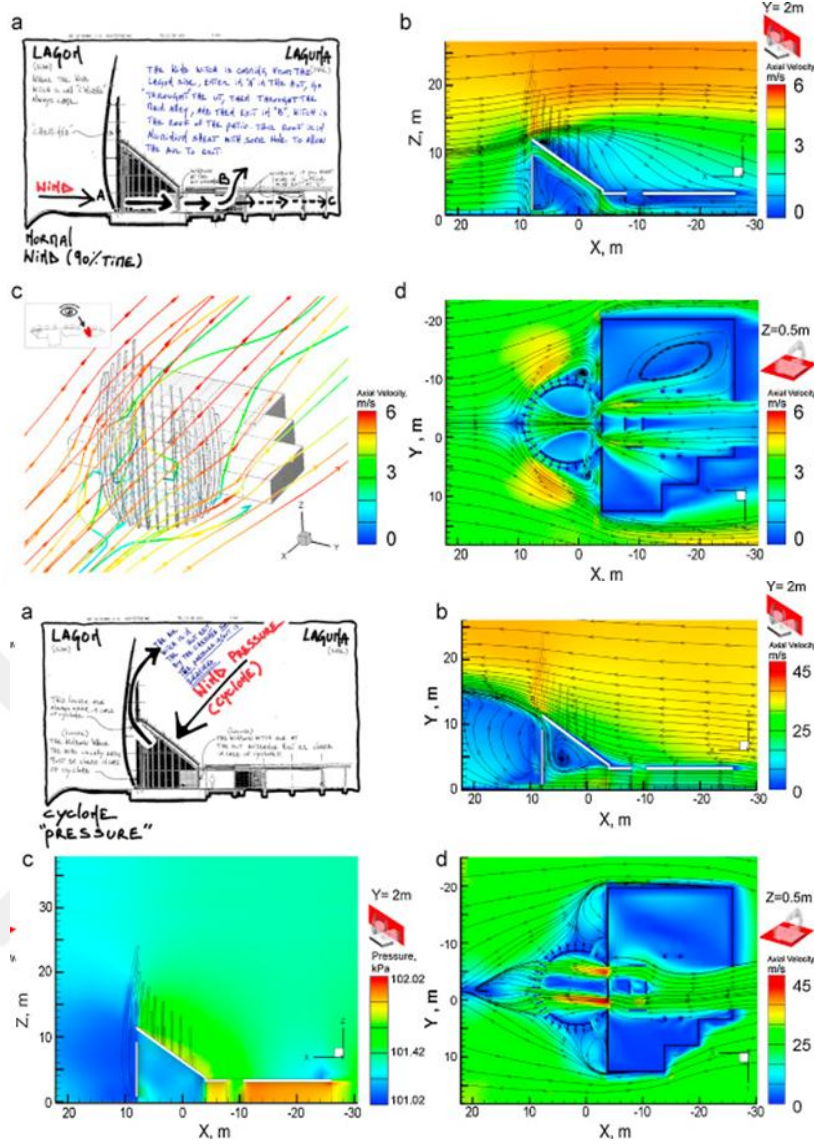
Japonya Mimarlık Enstitüsü (AIJ), binalardaki rüzgâr yükleri için HAD kullanımına ilişkin daha kesin öneriler yayınlamıştır (Tamura vd., 2008). Bu araştırma hem LES'in hem de geliştirilmiş bir RANS'ın, alçak (1:1:0,5) ve yüksek katlı (1:1:4) bir binanın yüzey basınçlarını hesaplamadaki başarısını değerlendirmiştir. Analizlerden elde edilen çıktılar rüzgâr tüneli testlerinden elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, LES'in tam rüzgâr yükü tahmini için gerekli olduğunu, RANS'ın ise binalardaki ortalama rüzgâr kuvvetlerinin hesaplanmasıyla sınırlı kaldığını göstermiştir. Sonuçlar, HAD kullanarak yapısal çerçevelerdeki rüzgâr yüklerini tahmin etme prosedürünü ana hatlarıyla belirten bir akış şemasının (Şekil 6) geliştirilmesine yol açmıştır. Şekil 6'ya göre, RANS modelinin rüzgâr yönündeki yüklerle sınırlı olduğunu ve AIJ tarafından yayınlanan uygun bir rüzgâr etkisi faktörüyle desteklenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, RANS'ın yüksek bina sorunlarına yönelik sonuçları sınırlıdır, çünkü genellikle karşı rüzgâr ve burkulma yükleri kritiktir (Clannachan vd., 2009).



Şekil 6. Yapısal çerçeveler üzerindeki rüzgâr yüklerini tahmin etmeye yönelik CFD prosedürü (Tamura vd., 2008)

1.4. Mimarlıkta HAD Uygulamaları ve Yaklaşımları

Mimari tasarım ile hava akışı arasındaki yakın ilişki, hava akışı diyagramlarının neden mimari tasarım yarışmalarında ve söylemlerinde sürekli olarak yer aldığını açıklayabilir. Bununla birlikte, mimari tasarımdaki bazı hava akış şemaları, mimarların çoğu zaman gerçeklikten farklı olan sezgileri tarafından yönlendirilir. Şekil 7’de görülen Yeni Kaledonya’daki Tjibaou Kültür Merkezi, ekolojik bir tasarım olarak lanse edilen iyi bilinen bir yapıdır, ancak araştırmacılar, binanın içindeki ve çevresindeki hava akışının tasarlanan yoldan farklı olduğunu kanıtlamıştır (Wu vd., 2011). Bu gibi durumlar hava akışının birçok durumda tahmin edildiği gibi davranmadığını göstermektedir. Rüzgârın engellerle etkileşimi sonucu oluşan türbülansı algılamak karmaşık bir süreç olduğundan hava akışı tahmin edilememektedir. Başka bir deyişle, sezgi, hava akışının güvenilir bir tahminini elde etmek için yeterli olmayabilir. Rüzgâr tüneli testleri bu sorunu telafi edebilir, ancak maliyetleri ve gerekli süreleri nedeniyle, kritik hava akışı sorunları olan az sayıda mimari proje rüzgâr tüneli testlerini içermektedir.



Şekil 7. Tjibaou Kültür Merkezi'nin tasarımında mimarlar tarafından sunulan hava akış ve basınç şemalarının HAD analizleriyle kıyaslanması (Wu vd., 2011)

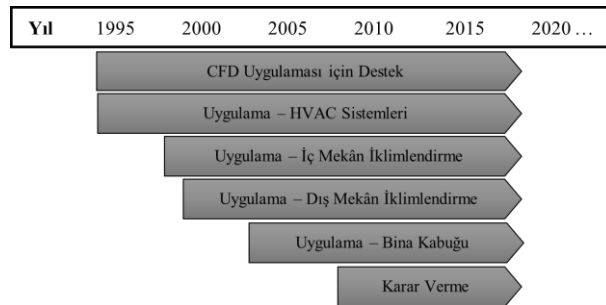
Mimaride HAD kullanımına yönelik çalışmaların 1997'den bu yana hızlı bir ivme kazandığı görülmektedir (Zhai, 2006). Ancak mimarların HAD ile bağlantı kurmasını sağlayacak vaka tabanlı çalışmaların eksikliği bu durumun önündeki en büyük sorundur (Den Hartog vd., 2000). Ancak mimari tasarımcılar bilgiyi görselleştirmek ve projeler üretmek için eğitildiğinden, görselleştirilmiş verilerle vaka tabanlı bir yaklaşım açıkça onlara hitap etmektedir. Akışkanlar mekaniği ilkeleri ile ilgili bilgi eksikliği de engellerden bir diğeri olmuştur. HAD kullanmak, etkili prosedürlere dönüştürülebilen temel ilkelerin bilgisini gerektirir. Ancak akışkanlar mekaniğindeki kavramları anlamak, genellikle görsel odaklı olan mimari tasarımcılar için zor olabilir. (Jo, vd., 2018).

Jo vd. tarafından mimarlıkta HAD uygulamaları ve yaklaşımlarının ortaya çıkarılmasına yönelik literatür çalışması son yıllarda hem uygulama hem de araştırma açısından bu alanın ilgi gördüğünü ortaya koymuştur (Jo vd., 2018). Bu çalışmada literatürde bu alanda yapılan çalışmalar genel olarak iki kategoriye ayrılmıştır.

- HAD uygulaması için destek
- HAD uygulaması
 - HVAC sistem analizi
 - İç ortam iklim analizi
 - Dış hava akışı analizi
 - Bina kabuğu analizi
 - Tasarım karar verme süreci

İkinci adımda, birinci adımda tanımlanan kategorilere göre çalışmaların eğilimleri kontrol edilmiştir. İkinci adımda, 1997'den 2015'e kadar Uluslararası Bina Performansı Simülasyon Derneği (IBPSA) uluslararası konferansları için sunulan bildiriler dikkate alınmıştır. Birinci kategoride genel olarak HAD'ın kullanım zorluğunun basitleştirilmesine, kullanıcı dostu arayüz geliştirilmesine yönelik araştırma çalışmalarını kapsamaktadır. İkinci kategori ise mimarlıkta HAD'ın kullanım eğilimlerini ortaya koymuştur. Çalışma tasarımcıların HAD'a olan ilgisinin zamanla arttığını ve mimarlıkta kullanım olanaklarını irdelemesi sebebiyle önemlidir.

Bu araştırma eğilimleri, tasarımın erken aşamaları için bir araç olarak HAD'ın potansiyelini göstermektedir. Tamamlanan tasarımları değerlendirmek için HAD kullanmanın geleneksel uygulamasından farklı olarak, bu eğilimler HAD'ın tasarım karar verme sürecine aktif olarak dahil edilebileceğini göstermektedir. Başka bir deyişle HAD ile mimari tasarım arasındaki artan etkileşim, simülasyon sonuçlarının tasarım karar verme sürecine dahil edilmeye başlandığını göstermektedir.



Şekil 8. Mimari alanda HAD ile ilgili araştırma alanlarının genişlemesi (Jo vd., 2018)

Tablo 3. Mimarlıkta HAD kullanım alanları, HAD’ın avantajları, dezavantajları ve örnek çalışmalar

İç Ortam Uygulamaları	HAD	Binaların Yaya Rüzgâr Ortamı	Bina Rüzgârın Yönlendirdiği Yağmur (WDR)	Bina Dış Cephelelerinde Konvektif Isı Transfer Katsayıları (CHTC)	Binaların Hava Kirliliği Dağılımı	Binalardaki Rüzgâr Yükleri	Rüzgâr
HAD Avantajları	-Zaman alıcı ve maliyetli deneysel çalışmalara ve yarı-ampirik formüllere alternatif olabilir. -İç ortamları ilgili iklim parametrelerinin büyüklüğünü (hava sıcaklığı, radyant sıcaklık, hava hızı, havalandırma derecesi ve kirliliği konsantrasyonu) yüksek doğrulukla simüle edebilir.	-Rüzgâr çalışmalarda alternatif olabilir. -Pek çok iyi uygulama kılavuzu ve çalışma örneği bulunmaktadır. -Binaların etrafındaki yaya rüzgârı ortamını yüksek doğrulukla simüle edebilir. -Farklı uygulama senaryoları için RANS modellerinin yanı sıra LES modellerinin de uygulanabilmesi.	-Zaman alıcı ve maliyetli deneysel çalışmalara ve yarı-ampirik formüllere alternatif olabilir. -Bina cephelelerinde WDR dağılımını simüle edebilir.	-Deneysel çalışmalara alternatif olabilir. -Bina geometrisi, çevre topografyası, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, türbülans yoğunluğu, yüzey pürüzlülüğü, doku ve nem içeriği de dahil olmak üzere çok çeşitli parametreden sonuçların çok kolay biçimde etkilenmesi -Genellikle HAD yerine yarı-ampirik formüller kullanılır.	-Rüzgâr çalışmalarda alternatif olabilir. -Binaların oluşturduğu kirliliği dağılımını yüksek doğrulukla simüle edebilir. -Kentsel alan gibi senaryolarda LES tercih edilebilir.	-Rüzgâr çalışmalarda alternatif olabilir. -Binalarda oluşan rüzgâr yüklerini doğrulukla simüle edebilir. -Genellikle teklî yapılar için uygulanabilir. -Sonuçların doğruluğu için doğrulama çalışması gerektirmesi.	tüneli alternatif
HAD Dezavantajları	-İç ortam parametresi olan ortam nemi genellikle simüle edilmez. -Sonuçların doğruluğu için doğrulama çalışması gerektirmesi.	-Uygun model seçimi noktasında yaşanan sorunlar (çoklu bina konfigürasyonları için kararlı RANS modelinin yetersiz olduğu durumlar vb.) -Sonuçların doğruluğu için doğrulama çalışması gerektirmesi.	-Bina geometrisi, ortam topografyası, bina cephesindeki rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, türbülans yoğunluğu ve yağmur damlası boyutu dağılımı gibi pek çok parametreden sonuçların etkilenmesi. -Sonuçların doğruluğu için doğrulama çalışması gerektirmesi.	-Örnek çalışma oldukça azdır. -Bina geometrisi, çevre topografyası, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, türbülans yoğunluğu, yüzey pürüzlülüğü, doku ve nem içeriği de dahil olmak üzere çok çeşitli parametreden sonuçların çok kolay biçimde etkilenmesi -Genellikle HAD yerine yarı-ampirik formüller kullanılır.	-Bina geometrisi, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, türbülans yoğunluğu, kirliliği partikül boyutu ve konsantrasyonu gibi parametrelere sonuçların etkilenmesi. -Sonuçların doğruluğu için doğrulama çalışması gerektirmesi.	-Binalarda oluşan rüzgâr yüklerini doğrulukla simüle edebilir. -Genellikle teklî yapılar için uygulanabilir. -Sonuçların doğruluğu için doğrulama çalışması gerektirmesi.	tüneli alternatif
Doğrulama Çalışmaları	Rüzgâr Tüneli ve Saha Ölçümleri (genellikle saha ölçümleri kullanılır)	Rüzgâr Tüneli ve Saha Ölçümleri	Rüzgâr Tüneli ve Saha Ölçümleri	Rüzgâr Tüneli (genellikle uygulanmaz), Saha Ölçümleri, Yarı-Ampirik Formüller	Rüzgâr Tüneli ve Saha Ölçümleri	Rüzgâr Tüneli ve Saha Ölçümleri	Rüzgâr Tüneli ve Saha Ölçümleri
Örnek Çalışmalar	Den Hartog ve diğerleri, 2000.	-He ve Song, 1999. -Blocken ve Persoon, 2009.	-Tang ve Davidson, 2004. -Briggen ve diğerleri, 2009.	-Blocken ve diğerleri, 2011.	-Gousseau ve diğerleri, 2011.	-Shireen ve James, 2017.	

Tablo 3'te mimarlık alanında HAD uygulamalarına göre bazı yaklaşımlara yer verilmiştir. Mimarlık alanında yapılan çalışmaları genel olarak iç ortam çalışmaları ve dış ortam çalışmaları olarak iki grupta ele alınabilir. Dış ortam çalışmaları kendi içinde bina çevresindeki yaya rüzgâr ortamı, bina cephelerinde rüzgârın yönlendirdiği yağmur (WDR), bina cephelerinde konvektif ısı transferi (CHTC), bina çevresinde hava kirletici (partikül) dağılımı ve binalardaki rüzgâr yükleri olarak gruplandırılabilir. Bunlara ek olarak yüksek katlı yapılardaki HAD uygulamaları da bu sınıfta yer alır.

1.4.1. İç Ortamda HAD (CFD) Uygulamaları

Tasarım sürecinin son aşamalarında, uzmanlardan bina hizmetleri için plan ve yerleşim planı önermeleri istenir. Bu süreçte uzmanlar binanın iç mekân iklimini analiz etmeye çalışır ve genellikle mimarlar tarafından tasarım sürecinde daha önce verilen tasarım kararlarından kaynaklanan problemlerle karşı karşıya kalır. Bununla birlikte, nihai tasarım aşamalarında tasarımın şekli ve konfigürasyonu kalıcı hale gelir ve bina hizmetleri ve iç ortam iklimi ile ilgili ön kabuller tasarımda kilitlenir. Bu, dahil olan tüm taraflar için büyük miktarda işgücünü tetiklemeden küçük tasarım değişikliklerini bile gerçekleştirme yeteneğini büyük ölçüde azaltır. Sonuç olarak, örneğin; sağlıklı iç ortam iklimleri bu aşamada neredeyse hiç değiştirilemez. Bu aynı zamanda uzmanların enerji kullanımı gibi alanlarda tasarımları optimize etme olanaklarını da azaltır. Ayrıca son aşamalardaki tasarımların, iç mekân iklimlendirmesi için yeni konseptleri benimsemek yeterli zaman ve bütçeye sahip olmaması da bir diğer problemdir. Tasarım optimizasyonunun gerçekleştirilmesi gerektiğinde, tasarım sürecinin erken aşamalarında başlatılmalıdır. Bunu gerçekleştirmenin bir yolu, tasarım performansını erken aşamalarda daha sistematik bir şekilde analiz etmektir. Dijital görselleştirme gibi modern medyayı kullanan tasarımcılar, gelişmiş simülasyonların ve biçimsel analizlerin avantajlarına kolayca erişebilirler. Bu, tasarımcıların iç mekân iklimi gibi alanlarda daha dengeli ve motive edici kararlar almalarını sağlayacaktır (Den Hartog vd., 2000).

Bina performansını kesin olarak belirlemenin tek yolu, gerçek hayat deneyleri yapmaktır. Bu, durumların ölçekli modellerini oluşturmayı ve gerçekçi koşullar altında davranışı gözlemlemeyi içerir. İç mekân hava akışı söz konusu olduğunda deneyler; çok fazla zaman, deneyim ve bütçe gerektirir. Bu deneyleri, modellerin serbestçe değişebildiği ve her varyantın ayrı bir test gerektirdiği erken tasarım aşamalarında gerçekleştirmek

neredeyse imkansızdır. Daha uygulanabilir bir çözüm ise tahminleri test etmek için HAD simülasyonlarını kullanmaktır. Doğru miktarda doğru girdi verildiğinde, HAD, iklim parametrelerinin çoğunun projeksiyonlarını herhangi bir zamanda veya binanın herhangi bir yerinde sağlayabilir (Tablo 3). Ayrıca, iklim uzmanları tarafından nihai olarak tasarım performansını doğrulamak için kullanılabilecek sıcaklık salınımları ve türbülans gibi dinamik olguları simüle edebilir.

Tablo 4. İç mekân iklim parametreleri ve HAD (Den Hartog vd., 2000)

İç Mekân İklimi Parametresi	HAD Tarafından Destek
Hava Sıcaklığı (At)	Evet
Radyant Sıcaklık (Rt)	Evet
Hava Hızı (Av)	Evet
Havadaki Nem (Rv)	Hayır
Havalandırma Oranı (Nv)	Evet
Kirlilik Konsantrasyonu (Cp)	Modellendiğinde Evet

Binaların iç ortam iklimi dört konfor alanından oluşmaktadır: termal konfor, kokusal konforu, işitsel konfor ve görsel konfor. Hava akışı ve havalandırma gibi ilgili konular hem termal hem de kokusal konforu etkiler. Termal konfor, diğerlerinin yanı sıra hava sıcaklığından (At), radyant sıcaklıktan (Rt), hava hızından (Av) ve hava neminden (Rv) etkilenir. Metabolizma ve giyim gibi insana bağlı faktörlerin, bu fiziksel faktörlerin deneyimlenme biçimi üzerinde güçlü bir etkisi vardır. Sağlıklı bir hava kalitesinin sürdürülmesi, böylece koku alma konforunun sürdürülmesi, bir alandaki kirlilik konsantrasyonunu (Cp) azaltmak için alanın havalandırılmasını (Nv) ifade eder. Havalandırma durumunda, hava akışının termal konfor (hava akımı) ile ilgili faktörler üzerinde bir etkisi vardır. Rahatsızlığı ve hatta sağlıksız bir iç ortam iklimini önlemek için bu ünitelerin miktarları dikkatli bir şekilde yönetilmeli ve sınır değerler arasında tutulmalıdır.

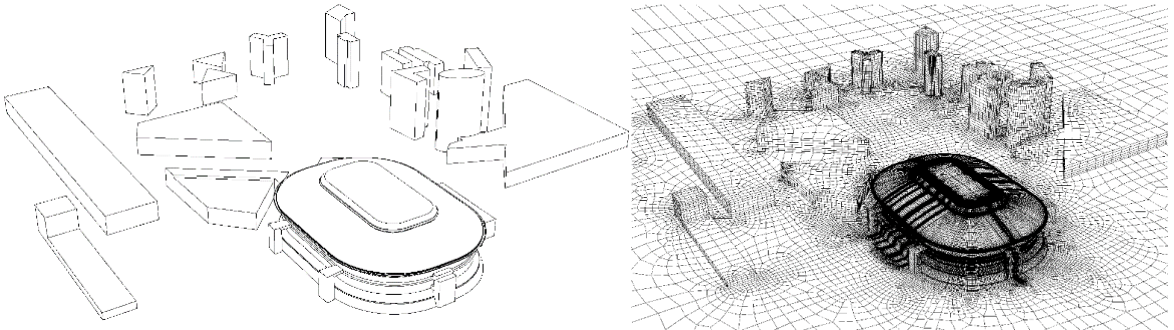
1.4.2. Dış Ortamda HAD (CFD) Uygulamaları

Mimarlıkta ve yapılarda HAD uygulamalarının zamanla geliştiği ve kullanımının yaygınlaştığı bir diğer alan ise yapılı çevre yani yapıların dış ortamıdır. Dış ortam çalışmaları iç ortam çalışmalarına oranla daha güncel ve gelişmekte olan bir konudur. Dış ortam bina performans simülasyonlarında HAD'a yönelik genel olarak 4 konu ele alınmaktadır:

- Binaların etrafındaki yaya rüzgâr ortamı,
- Bina cephelerinde WDR,
- Bina dış yüzeylerinde konvektif ısı transfer katsayıları ve
- Binaların etrafındaki hava kirletici dağılımı (Blocken vd., 2011).

Bu konular dışında binalardaki rüzgâr yükleri ve doğal olarak havalandırılması da ele alınmıştır. Bununla birlikte, literatürde yer alan çalışmalarda HAD kullanımında iç ortam uygulamaları oldukça açıklayıcı ve anlamlı biçimde yer alırken, dış ortam çalışmaları henüz gelişim aşamasındadır.

Karmaşık vaka incelemelerinde, yaya rüzgâr rahatsızlığı ve hava kirletici dağılımı gibi rüzgârlı çevre sorunları, atmosferik sınır katmanlı rüzgâr tünellerinde hala tipik olarak araştırılırken, dış bina yüzeylerinde WDR'ye maruz kalma ve konvektif ısı transferi katsayıları genellikle basitleştirilmiş ampirik veya yarı ampirik formüllerle tahmin edilmektedir. HAD bu konularda rüzgâr tüneli gibi fiziksel modelleme gerektiren uygulamalara ve ampirik/yarı ampirik formüllerle yapılan hesaplamalara güçlü bir alternatif olabilir (Blocken vd., 2011).



Şekil 9. Karmaşık iç ve dış ortamlar için yüksek çözünürlüklü hesaplamalar: Kentsel rüzgâr akışı ve çok işlevli bir stadyumun iç mekân doğal havalandırması için hibrit gövdeli ızgara (5,6 milyon hücre) (van Hooff ve Blocken 2010b)

Şekil 9’da yer alan çalışma literatürde HAD’ın iç ve dış ortam uygulamalarına yönelik örneklerden biridir. Van Hooff ve Blocken (2010b) tarafından yürütülen çalışmada Amsterdam/Hollanda’da yer alan Johan Cruyff Arena’nın iç ortamı ve stadyumun çevresi bir bütün olarak ele alınmış ve bu şekilde HAD simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma iç ortam iklimlendirme ve dış ortam rüzgâr etkilerini bütüncül bir biçimde değerlendirmesi açısından önemlidir.

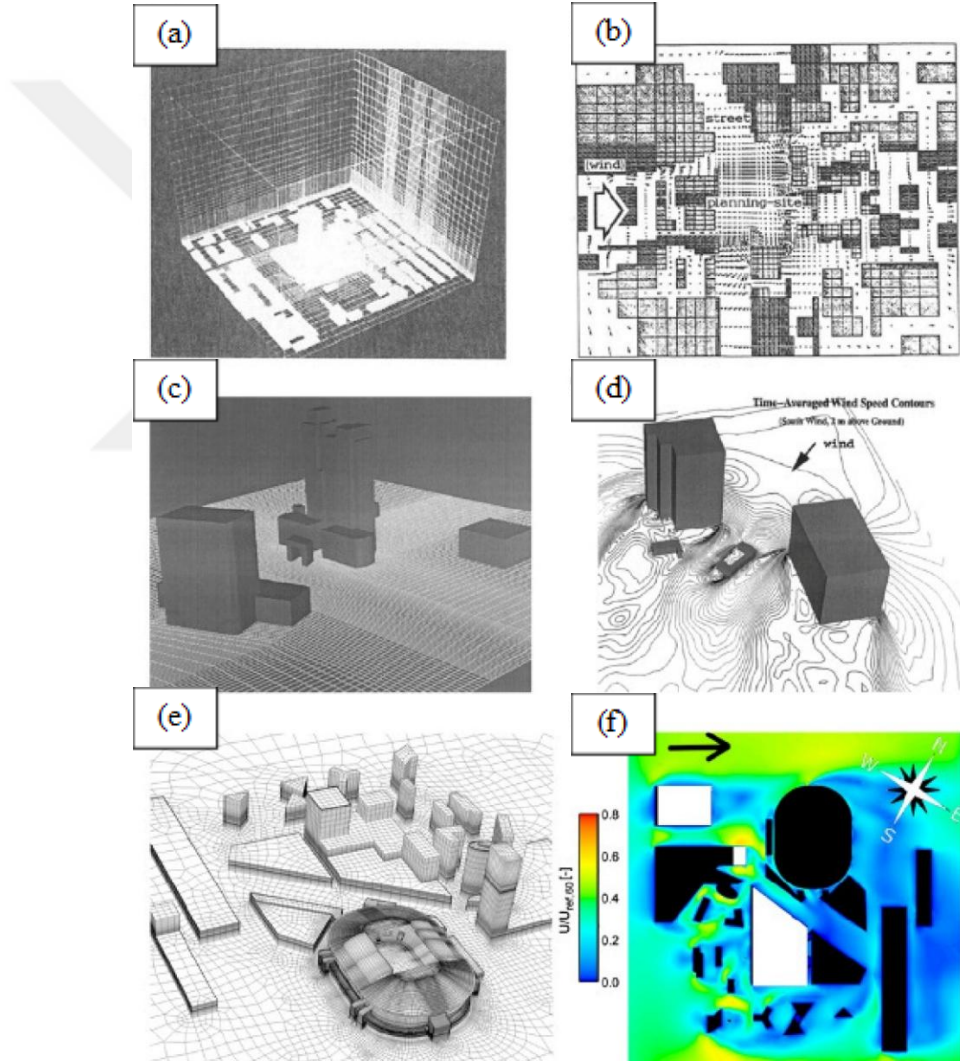
- Binaların Çevresindeki Yaya Rüzgâr Ortamı

Yüksek binalar yaya seviyesinde yüksek rüzgâr hızına neden olabilir ve bu da rahatsız edici ve hatta tehlikeli koşullara yol açabilir. Rüzgâr rahatsızlığı ve rüzgâr tehlikesi, yeni binaların başarısı için zararlı olabilir. Bugün, pek çok şehir yetkilisi, yeni bir yüksek bina için inşaat iznini ancak bir rüzgâr konfor çalışması, yaya rüzgâr ortamı için olumsuz sonuçların sınırlı kaldığını gösterdikten sonra vermektedir.

Bir rüzgâr konforu çalışması genellikle üç tür bilgi/verinin bir kombinasyonu ile gerçekleştirilmektedir. Bunlar; istatistiksel meteorolojik bilgiler, aerodinamik bilgi ve konfor kriteri. Aerodinamik bilgilerin bir kısmını sağlamak için HAD veya rüzgâr tüneli verileri kullanılabilir. Rüzgâr konforu çalışmaları, yaya yüksekliğinde ($z = 1,75$ veya 2 m) en azından ortalama rüzgâr hızı vektör alanı hakkında bilgi gerektirir. Bu bilgi rüzgâr tüneli modellemesi veya HAD ile elde edilebilir. Rüzgâr tüneli testleri genellikle Lazer Doppler Anemometri (LDA) veya Hot Wire Anemometri (HWA) ile noktasal ölçümlerdir. Ayrıca geçmişte kum erozyonu ve kızılötesi termografi yöntemleri de kullanılmıştır (Blocken vd., 2011).

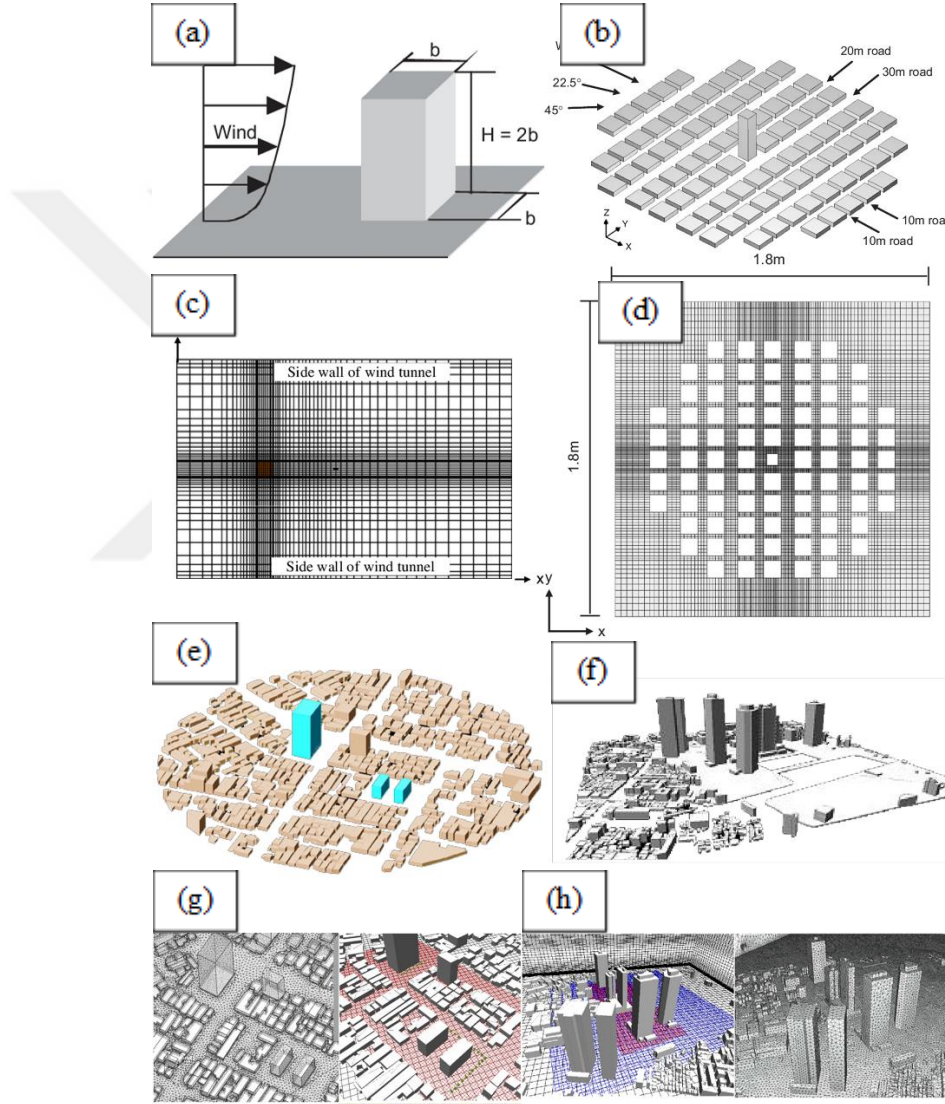
Yaya seviyesi rüzgâr konforu çalışmalarında HAD’ın ana avantajlarından biri, tüm akış alanı verilerini sağlayarak zamandan tasarruf sağlamaktır. Eksikliklerine rağmen, $k-\epsilon$ modeli veya diğer türbülans modelleri ile RANS modellemesi, yaya düzeyinde rüzgâr çalışmaları için en popüler yaklaşım haline gelmiştir. Literatürde temel olarak tekil binaların veya genel bina konfigürasyonlarının etrafındaki yaya rüzgâr ortamını incelemeye yönelik çalışmaların yanı sıra karmaşık kentsel ortamlardaki yaya rüzgâr koşullarına ilişkin çeşitli HAD çalışmaları da yapılmıştır. Bu çalışmaların bazı hesaplama ızgaraları ve sonuçlarının tipik sunumları Şekil 10’da gösterilmektedir. Bu çalışmaların neredeyse tamamı RANS metodu ve $k-\epsilon$ modelinin bir versiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Tek istisna, LES’i kullanan He ve Song’un (1999) çalışmasıdır. Çalışma kentsel bir ortamda yer alan yapıların akışkan performanslarını diğer çalışmaların aksine RANS metoduyla değil LES metoduyla ele almaktadır.

Yaya rüzgâr ortamına yönelik HAD çalışmalarında genel yaklaşımlardan biri de doğrulama çalışmalarıdır. Bu alanda HAD çalışmalarında genel ifadeler sağlama girişimlerinde sayısal hatalardan (ayırıklaştırma hataları ve yinelemeli yuvarlama hataları gibi) ve fiziksel modelleme hatalarından (RANS, türbülans modeli, basitleştirilmiş sınır koşulları vb.) kaynaklı hatalar sonuçları kolaylıkla etkileyebilir. Doğrulamak için yapılan birçok çalışma, rüzgâr tüneli ölçümleri ve saha ölçümleri ile HAD'ın doğrulanmasında bu yaklaşımı benimsemiştir. Literatürde çoklu bina yapılanmalarının HAD simülasyonu doğrulaması yönelik de bazı çalışmalar bulunurken sayıları oldukça azdır.



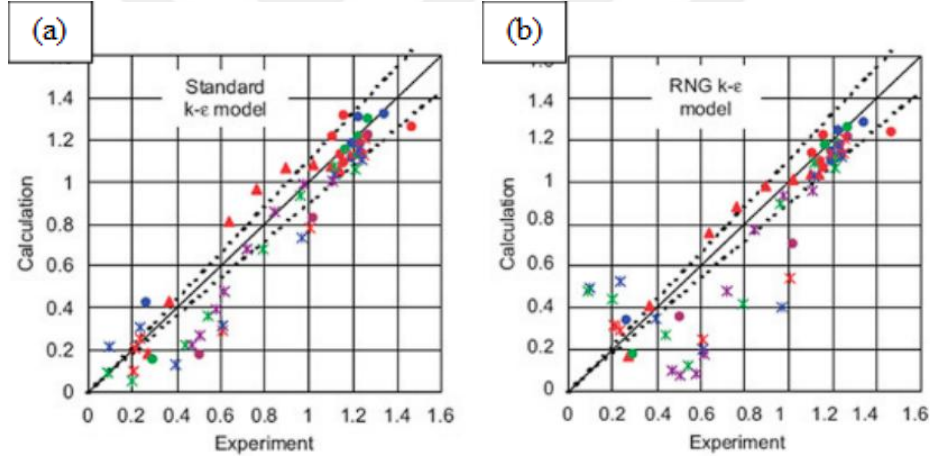
Şekil 10. Kentsel alanlarda yaya seviyesindeki rüzgâr ortamına ilişkin CFD çalışmalarına örnekler: (a-b) Izgara (38895 sonlu eleman) ve sürekli RANS simülasyonlarına dayalı rüzgâr hızı vektörleri (Gadilhe vd., 1993), (c-d) LES'e dayalı ızgara (toplam hücre sayısı bilinmiyor) ve rüzgâr hızı konturları (He ve Song, 1999), (e-f) Izgara (2,8 milyon hücre) ve RANS'a dayalı rüzgâr hızı oranı konturları (Blocken ve Persoon, 2009)

Literatürde dış ortam HAD uygulamalarına yönelik en kapsamlı araştırmalardan biri de Yoshie vd. (2007) tarafından yapılan çalışmadır. Şekil 11’de yer verilen çalışmada öncelikle farklı bina kombinasyonlarını incelerken daha sonra bu bina konfigürasyonlarından yola çıkarak Tokyo’da bir kentsel alanda çeşitli analizler gerçekleştirmiştir. Burada öncelikle tekil yapı ve alçak katlı yapıların arasında yer alan yüksek katlı bir yapı örnek olarak oluşturulmuştur.



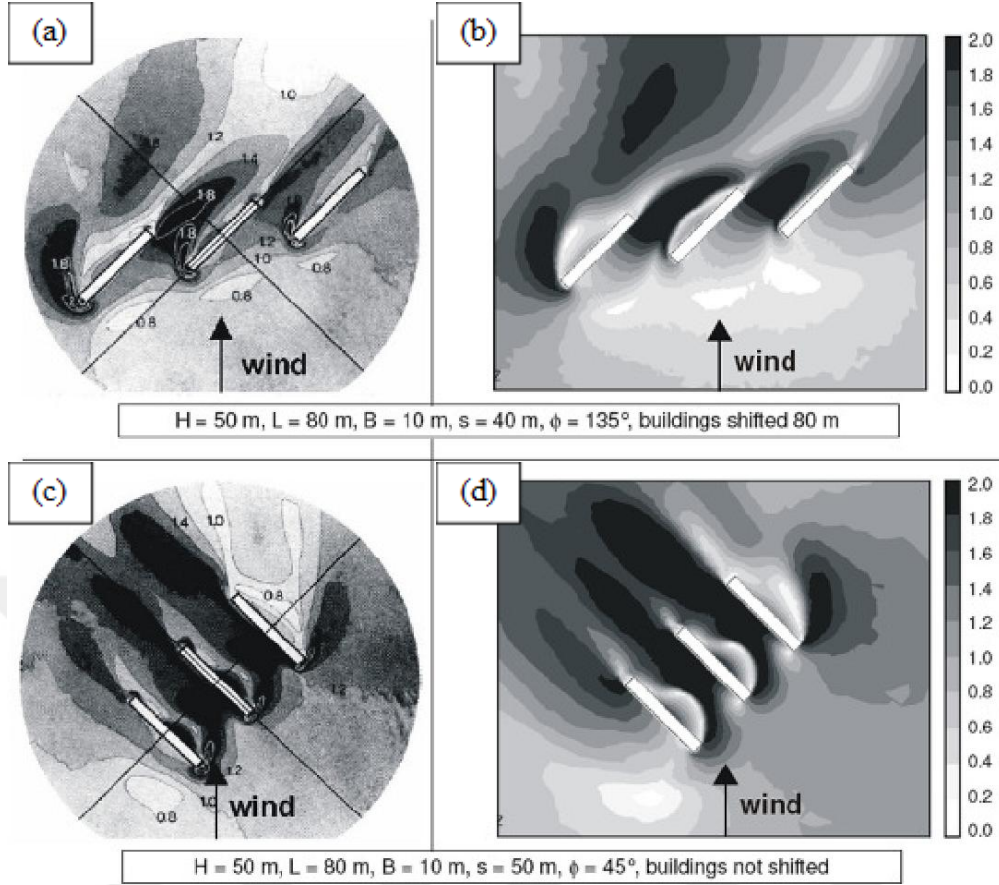
Şekil 11. Yoshie vd. tarafından yapılan doğrulama çalışmalarında bina konfigürasyonları, (a-b) Yalıtılmış binanın geometrisi ve yapılandırılmış ızgarası (1.0×10^5 hücre), (c-d) Az katlı binalarla çevrili yüksek binanın geometrisi ve yapılandırılmış ızgarası (1.3×10^6 hücre), (e-f) Batırma Geometrisi-sınır (0,25 milyon hücre) ve gerçek kentsel alandaki bina kompleksi ızgaraları (Niigata), (g-h) Geometri, batık sınır (2,95 milyon hücre) ve gövdeye uygun (1,18 milyon hücre) gerçek kentsel alanda (Shinjuku, Tokyo) bina kompleksi ızgaraları (Yoshie vd., 2007)

Ayrıca Yoshie ve diğerlerinin (2007) yaptığı az katlı binalarla çevrili yüksek bina için yapılan simülasyonlar standart k- ϵ modeli ve RNG k- ϵ modeli ile yapılmıştır. Sonrasında bu iki farklı türbülans modeli rüzgâr tüneli sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Yüksek rüzgâr hızı olan bölgelerde, standart k- ϵ modeli rüzgâr tüneli sonuçlarına göre yaklaşık %15 oranında sapmıştır. Düşük rüzgâr hızı bölgelerinde, 4 katına kadar farklılıklar bulunmuştur. RNG k- ϵ modelinin sonuçları, yüksek rüzgâr hızı bölgelerinde performansın iyileştiğini, ancak düşük rüzgâr hızı bölgelerinde performansın yine kötüleştiğini göstermiştir. Niigata'daki gerçek kentsel alan için HAD çalışmasında yüksek ve düşük rüzgâr hızı bölgelerindeki farklı performansa ilişkin benzer sonuçlar bulunmuştur: yüksek rüzgâr hızı bölgelerinde, tahminler genellikle ölçümlerin %20'si içindeyken, rüzgâr hızı düşük rüzgâr hızı bölgeleri, bazı konumlarda 5 veya daha fazla kat, genellikle önemli ölçüde sapma yaşanmıştır (Şekil 12).



Şekil 12. Yoshie vd. (2007) tarafından izole edilmiş bina için rüzgâr hızı oranının HAD sonuçları ile rüzgâr tüneli ölçümlerinin karşılaştırılması, [(a) standart k- ϵ modeli ile RANS, (b) RNG k- ϵ modeli ile RANS. Semboller şunlara atıfta bulunur: Δ = binanın önü; o = binanın yan tarafı; x = binanın arkası. Farklı renkler, binanın önündeki, yanındaki ve arkasındaki çeşitli konumları ifade eder.]

Blocken ve Carmeliet (2008), üç paralel bina konfigürasyonu için k- ϵ modeli ile RANS HAD simülasyonları gerçekleştirmiş ve sonuçları tarafından yapılan kum erozyonu rüzgâr tüneli deneyleriyle karşılaştırmıştır. Karşılaştırmalarda yapı çevrelerinde oluşan yüksek rüzgâr hızlı bölgelerde HAD ve rüzgâr tüneli çalışması arasında büyük benzerlikler tespit edilmiştir. Düşük rüzgâr hızı bölgelerinde ise ciddi oranda sapmalar bulunmaktadır. Bu karşılaştırmalardan ikisi Şekil 13'te gösterilmektedir ve Yoshie vd. (2007) tarafından yapılanlara çok benzer sonuçlar vermektedir.



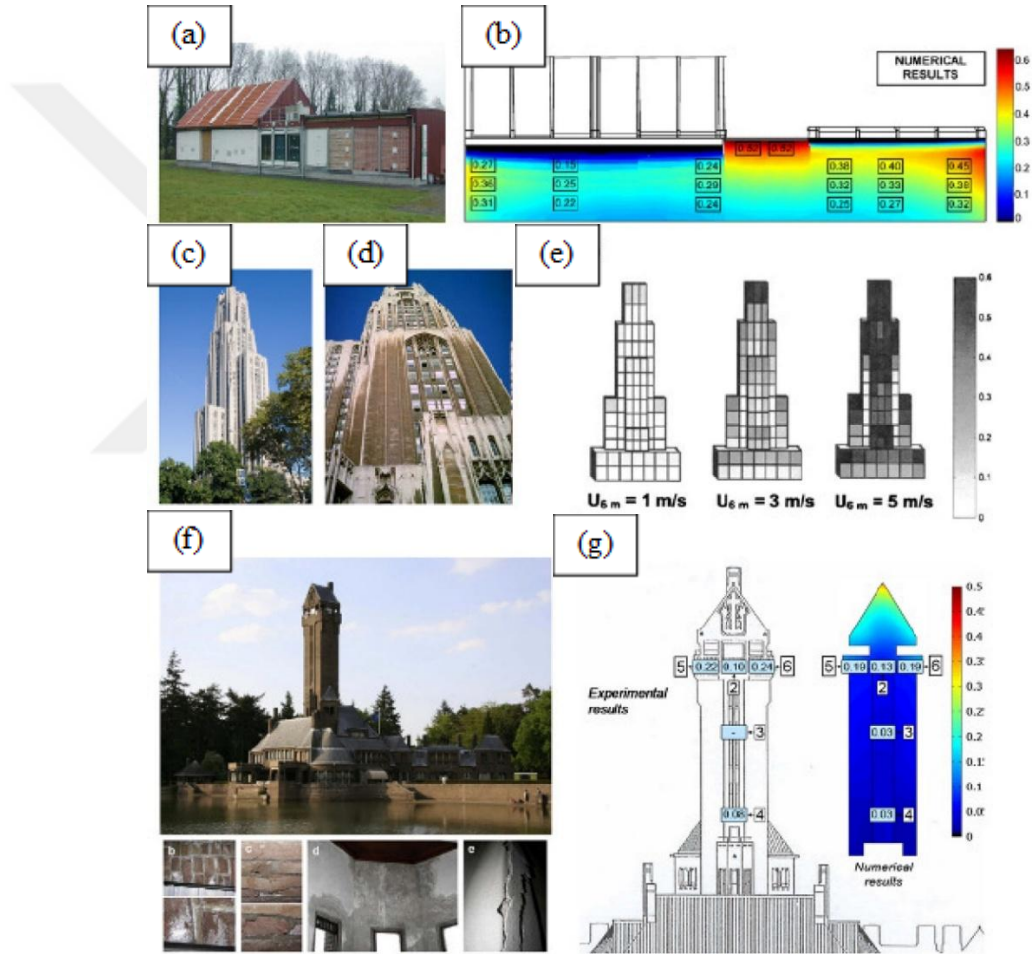
Şekil 13. Blocken ve Carmeliet (2008) tarafından paralel bina konfigürasyonları için doğrulama çalışması, (a) kum erozyonu kontur çizimleri, (b) (1,5 milyon hücre) için CFD sonuçları; (c) Kum erozyonu grafikleri, (d) HAD sonuçları (0,7 milyon hücre)

- Bina Cephelerinde Rüzgârın Yönlendirdiği Yağmur (WDR)

WDR, bina cephelerinin higrotermal performansını ve dayanıklılığını etkileyen en önemli nem kaynaklarından biridir. Yıkıcı özelliklerinin sonuçları birçok şekilde olabilir. Gözenekli malzemelerdeki nem birikiminin, yağmur suyunun nüfuz etmesine, neme bağlı tuz göçüne, termal ve nem gradyanlarına bağlı yapısal çatlamaya yol açabileceği bilinmektedir.

Bina cephelerinde WDR yoğunluğunun değerlendirilmesi karmaşıktır, çünkü çok çeşitli parametrelerden etkilenir: bina geometrisi, ortam topografyası, bina cephesindeki konum, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, türbülans yoğunluğu, yağış yoğunluğu ve yağmur damlası boyutu dağılımı gibi. CFD, zaman alıcı ve pahalı deneylerden kaçınmak ve (yarı) ampirik formüllerden daha ayrıntılı ve doğru bilgi sağlamak için değerli bir alternatif olabilir.

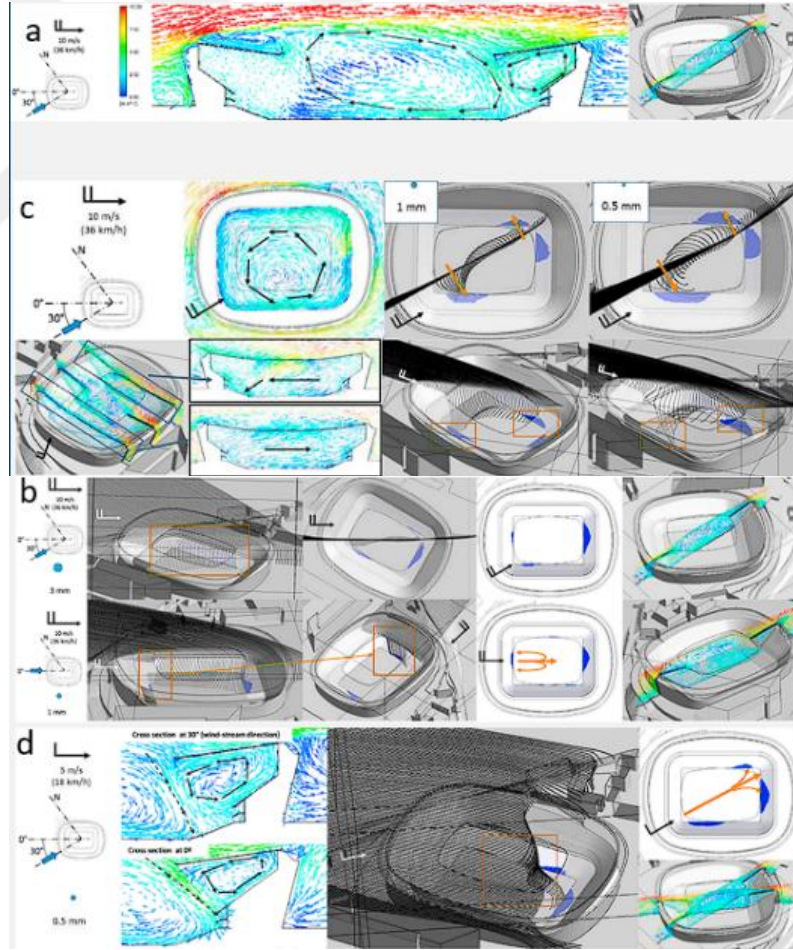
Choi, WDR için bir sabit durum simülasyon tekniği geliştirmiş ve uygulamıştır. Rüzgâr akışı modelini çözmeyi ve bu modeldeki yağmur damlalarının yörüngelerini hareket denklemlerini çözerek (Lagrangian parçacık izleme) hesaplamayı içerir. Bu teknik, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve yatay yağış yoğunluğunun verili (sabit) değerleri için bina cephelerinde WDR'nin mekânsal dağılımının belirlenmesini sağlar. Bu HAD simülasyonlarının çoğu, kapanış sağlamak için RANS yaklaşımına ve bir k- ϵ türbülans modeline dayanır (Blocken vd., 2011). Şekil 12'de literatürde yer alan bazı WDR'ye yönelik HAD çalışmaları yer almaktadır.



Şekil 14. Bina cephelerinde rüzgarla yönlendirilen yağmurun CFD doğrulama çalışmaları. (a) Belçika, Leuven'deki VLIET test binası, (b) Güneybatı rüzgâr yönüne sahip bir yağmur olayından sonra güneybatı cephesinde yakalama oranı konturları (Blocken ve Carmeliet 2007); (c) Bilgi Katedrali; (d) Yüzey kirlenme desenleriyle Bilgi Katedrali; (e) Farklı referans rüzgâr hızları için güneybatı cephesindeki yakalama oranları (Tang ve Davidson, 2004); (f) neme bağlı hasar belirtileriyle Hollanda'daki Av Köşkü St. Hubertus; (g) Bir yağmur olayının sonunda ölçülen (solda) ve simüle edilmiş (sağda) yakalama oranlarının, cepheye dik rüzgâr yönü ile karşılaştırılması (Briggen vd. 2009)

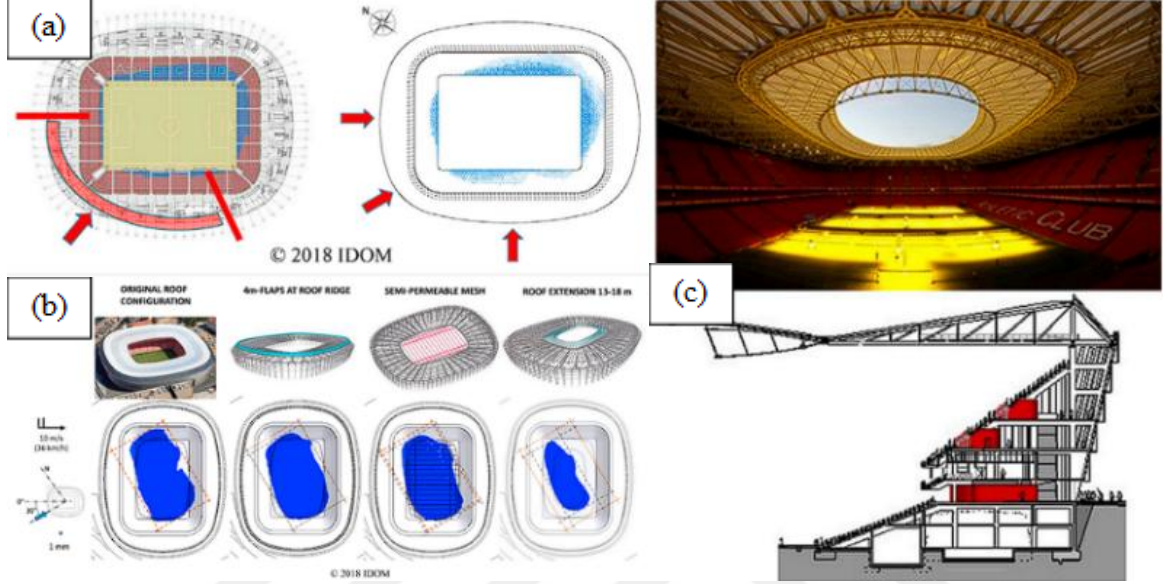
Literatürde WDR'ye yönelik HAD doğrulama çalışmaları şimdiye kadar oldukça sınırlı kalmıştır. Doğrulama çalışmaları genellikle rüzgâr tüneli yerine yerinde ölçüm metoduyla yapılmıştır. Öte yandan bazı araştırmacılar simülasyonlar ile ölçümler arasında önemli tutarsızlıklar bulurken, kimileri ise iyi doğruluk elde ettiğini belirtmiştir. Ayrıca doğrulama çalışmaları genellikle az katlı yapılara yoğunlaşmıştır.

WDR'ye yönelik son yıllarda yapılan HAD çalışmalarından bir diğeri ise Llarena vd. (2018) tarafından yürütülmüş çalışmadır. Çalışmada İspanya'daki bir WAS (World Architecture Festival) ödüllü (2015'te tamamlanan en iyi spor yapısı) stadyum olan San Mames Stadı incelenmiş. Stadın çatısındaki WDR problemine HAD yöntemi kullanılarak farklı alternatif strüktürler türetilmiştir. Ayrıca çalışma HAD simülasyon sonuçlarının yerinde ölçüm yöntemiyle desteklendiği bir örnektir. Şekil 15'te simülasyon aşamaları yer almaktadır. Çatıda yapılacak strüktürel eklentilerin WDR'ye etkisi irdelenmiştir.



Şekil 15. Orijinal stadyum yapılandırması için rüzgâr akış modeli ve yağmur damlalarının yörünge etkisi (Llarena vd., 2018)

Yapılan çalışmada öncelikle yoğun WDR'ye maruz kalan bölgeler HAD simülasyonları ve sahada yapılan ölçümlerle tespit edilmiştir. Sonrasında yapılan çatı örtüsü eklenti önerilerinde HAD simülasyonu yardımıyla WDR yoğun bölgeler tespit edilmiş ve optimizasyon çalışması yapılmıştır.



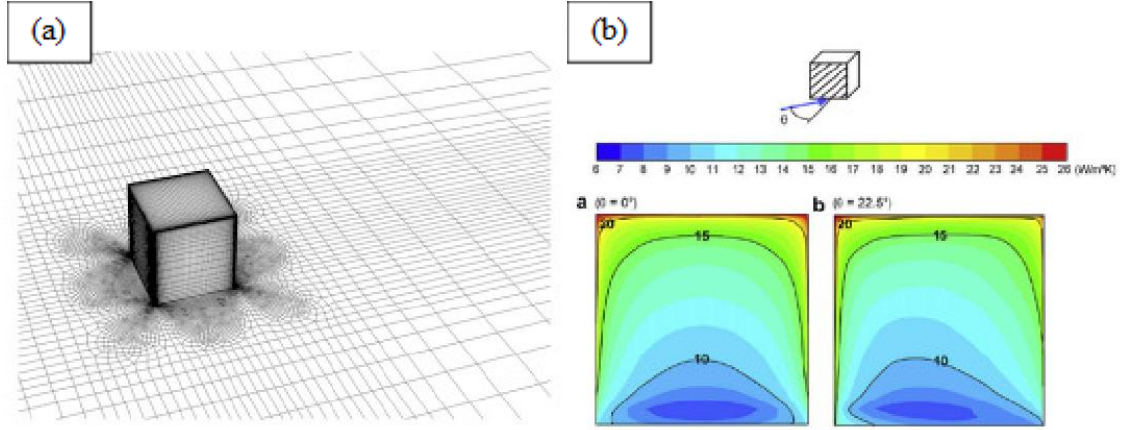
Şekil 16. (a) Yerde yapılan ölçümlerin HAD sonuçlarıyla korelasyon örneği. (b) Farklı alternatifler arasındaki ıslatma modeli karşılaştırması örneği. (c) Yeni San Mames stadyumu için seçilen çatı eklentisinin görünümü ve kesiti (Llarena vd., 2018)

- Bina Cephelerinde Konvektif Isı Transfer Katsayıları (CHTC)

Bina cepheleri boyunca dış CHTC değerlerinin belirlenmesi zor bir iştir, çünkü bina geometrisi, çevre topografyası, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, türbülans yoğunluğu, yüzey pürüzlülüğü, doku ve nem içeriği de dahil olmak üzere çok çeşitli parametrelerin karmaşık bir fonksiyonu olduğu içindir. HAD, zaman alıcı ve pahalı deneylerden kaçınmak ve (yarı) ampirik formüllerden daha ayrıntılı ve doğru bilgi sağlamak için bir alternatif olabilir.

Ancak; çok sayıda deneysel araştırma yapılmış olsa da binalar için dış mekân CHTC için HAD analizlerinin sayısı çok azdır. Öte yandan rüzgâr tüneli çalışmalarıyla bu HAD modellerinin doğruluğunun kontrol edildiği çalışma sayısı da oldukça azdır. Hatta bu alanda yapılan çalışmalar RANS modelinin sınırlamaları nedeniyle basit kübik yapıların rüzgâra bakan cephelerini analiz etmekten öteye gidememiştir. Diğer cepheler için doğru sonuçlar elde etmek, hibrit URANS/LES veya LES ile elde edilebilecek iyileştirilmiş akış modellemesi gerektirecektir (Blocken vd., 2011).

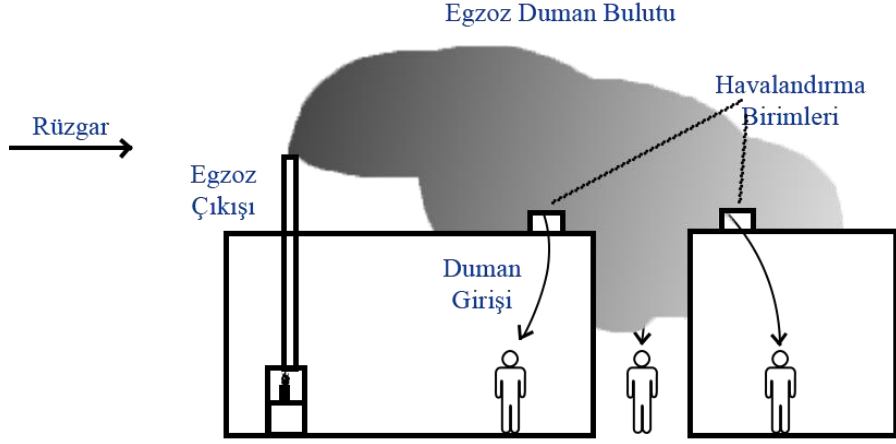
Bu tür yüksek çözünürlüklü HAD simülasyonları, gerçek bina simülasyonu durumları için pek pratik değildir. Bu nedenle, HAD ile doğru bina dış ısı (ve kütle) transferi simülasyonları kesinlikle kolay değildir ve birçok pratik bina simülasyonu çabasının kapsamı dışında kalabilir. Şekil 17’de kübik bir yapıdaki konvektif ısı transferi HAD ile simüle edilmiştir.



Şekil 17. (a) İlk ızgara hücre noktası cepheden 160 μm uzaklıkta olacak şekilde izole edilmiş kübik bir bina modeli etrafında konvektif ısı transferi katsayılarının CFD simülasyonu için yüksek çözünürlüklü ızgara (1,9 milyon hücre); (b) bir referans rüzgâr hızı $U_{10} = 3 \text{ m/s}$ ve $\theta = 0^\circ$ ve $22,5^\circ$ için rüzgâr cephesinde zorlanmış konvektif ısı transfer katsayıları (Blocken vd., 2011)

- Binaların Çevresinde Hava Kirleticisi Dağılımı

Dış ortam hava kirliliği günümüzün en önemli çevre sorunlarından biridir. Geniş bir akut ve kronik sağlık etkileri yelpazesi ile ilişkilidir. Yapılı çevrede, hem yayaların dış mekânda maruz kalması hem de bina sakinlerinin iç mekânda maruz kalması endişe vericidir. Dış ve iç hava kirliliği, bina cepheleri veya çatılarındaki havalandırma girişlerini ve çıkışlarını tasarlayan bina ve iklimlendirme mühendislerinin ana endişesidir. Dış hava kirleticilerinden kaynaklanan iç hava kirliliği, kirli egzoz havasının aynı bina tarafından yeniden yutulmasından veya yakındaki binalar, sokak trafiği, araç park yerleri ve yükleme rampaları ve acil durum jeneratörleri gibi diğer kaynaklardan egzozun alınmasından kaynaklanabilir. Şekil 18’de kentsel bir alanda yapıların çevredeki yapılarla kirleticisi partikül dağılımı üzerinden ilişkisi gösterilmiştir. Kentsel bir alanda bir yapının bacalarından çıkan kirleticisi başka bir yapının havalandırma sistemi aracılığıyla mekanları ve kullanıcıları etkileyebilir.

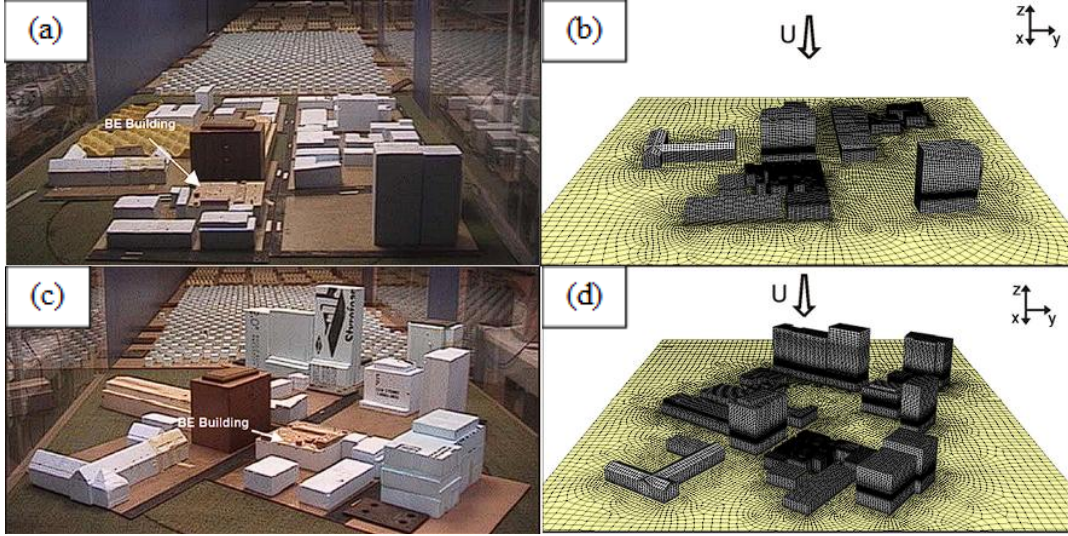


Şekil 18. Hava kirletici dağılım problemlerinin şematik gösterimi: egzozun aynı binaya veya diğer binalara yeniden emilmesi ve sokaklarda birikmesi (Blocken vd., 2011)

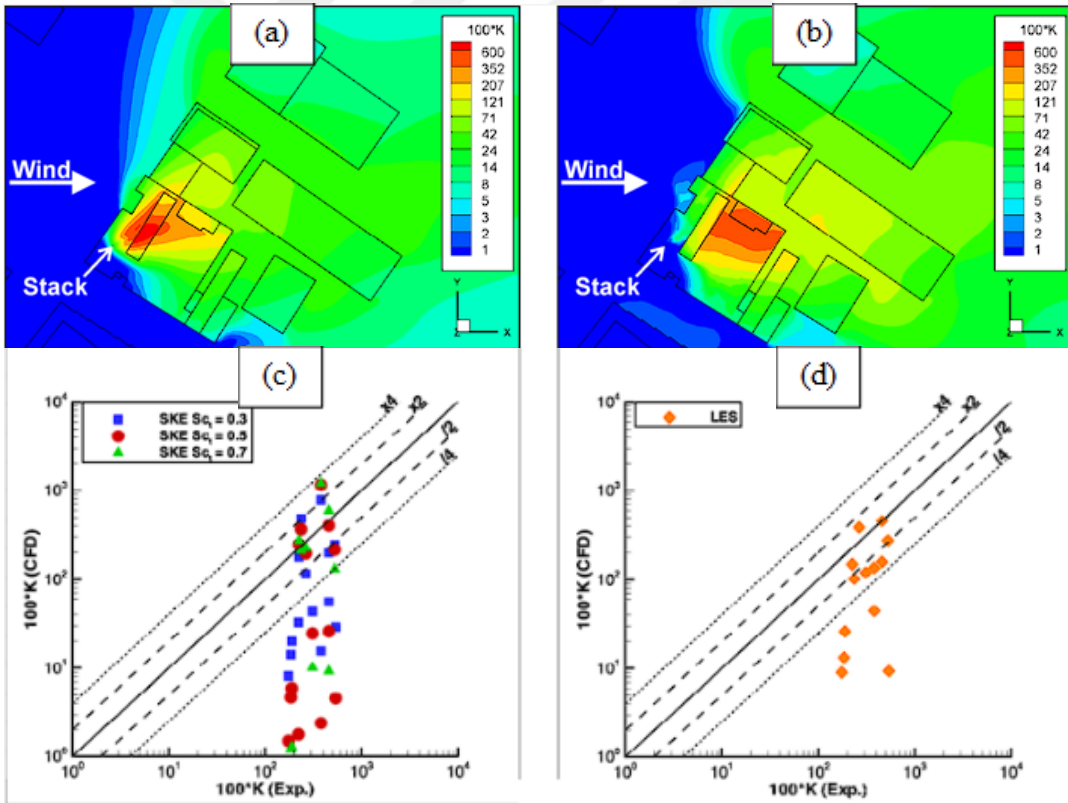
Binaların üzerindeki ve yakınındaki kirletici konsantrasyon dağılımlarının kesin tahmini, bina tasarımı ve değerlendirmesi için önemlidir. Aynı şey sokaklardaki ve meydanlardaki yoğunlaşmalar için de geçerlidir. Bununla birlikte, bu tür konsantrasyonların tahmini, özellikle kentsel çevrede zor bir iştir. Sadece hava kirliliği meteorolojisi ve yayılımı bilgisini değil, aynı zamanda bina aerodinamiği bilgisini de gerektirir çünkü rüzgâr ve binalar duman davranışını güçlü bir şekilde etkileyebilir.

Kirletici konsantrasyon dağılımları yerinde ölçümler, rüzgâr tüneli ölçümleri, (yarı) ampirik formüller ve HAD ile değerlendirilebilir. Geçmişte rüzgâr kaynaklı kirleticilerin davranışlarını daha iyi anlamak için bazı rüzgâr tüneli çalışmaları da yapılmıştır. Bununla birlikte, rüzgâr tüneli testlerinin dezavantajları; zaman alıcı ve maliyetli olabilmeleri, hafif rüzgâr koşulları için uygulanamamaları ve ölçekleme- benzerlik sorunları gibi konulardan dolayı tercih edilmediği durumlar da görülmüştür. Bunun yerine Gauss ve ASHRAE modelleri tercih edilmektedir (Blocken vd., 2011).

Literatürde kentsel alandaki binaların etrafındaki kirletici dağılımına yönelik vakaya dayalı çalışmalardan biri (Şekil 19) Gousseau ve diğerlerinin Montreal, Kanada'daki kentsel bir alanda yaptığı çalışmadır (Gousseau vd., 2011). Çalışmada kentsel alandaki kirletici dağılımının analizinde RANS (Standart k-ε modeli) ve LES olarak 2 farklı HAD (CFD) metodu uygulanmış ve rüzgâr tüneli testleriyle doğrulama yapılmıştır (Şekil 20). Burada amaç RANS ve LES metodlarının kirletici dağılımının tespitinde oluşacak farkları tespit etmek ve uygulanabilirlik açısından doğru modeli oluşturmaktır (Gousseau vd., 2011).



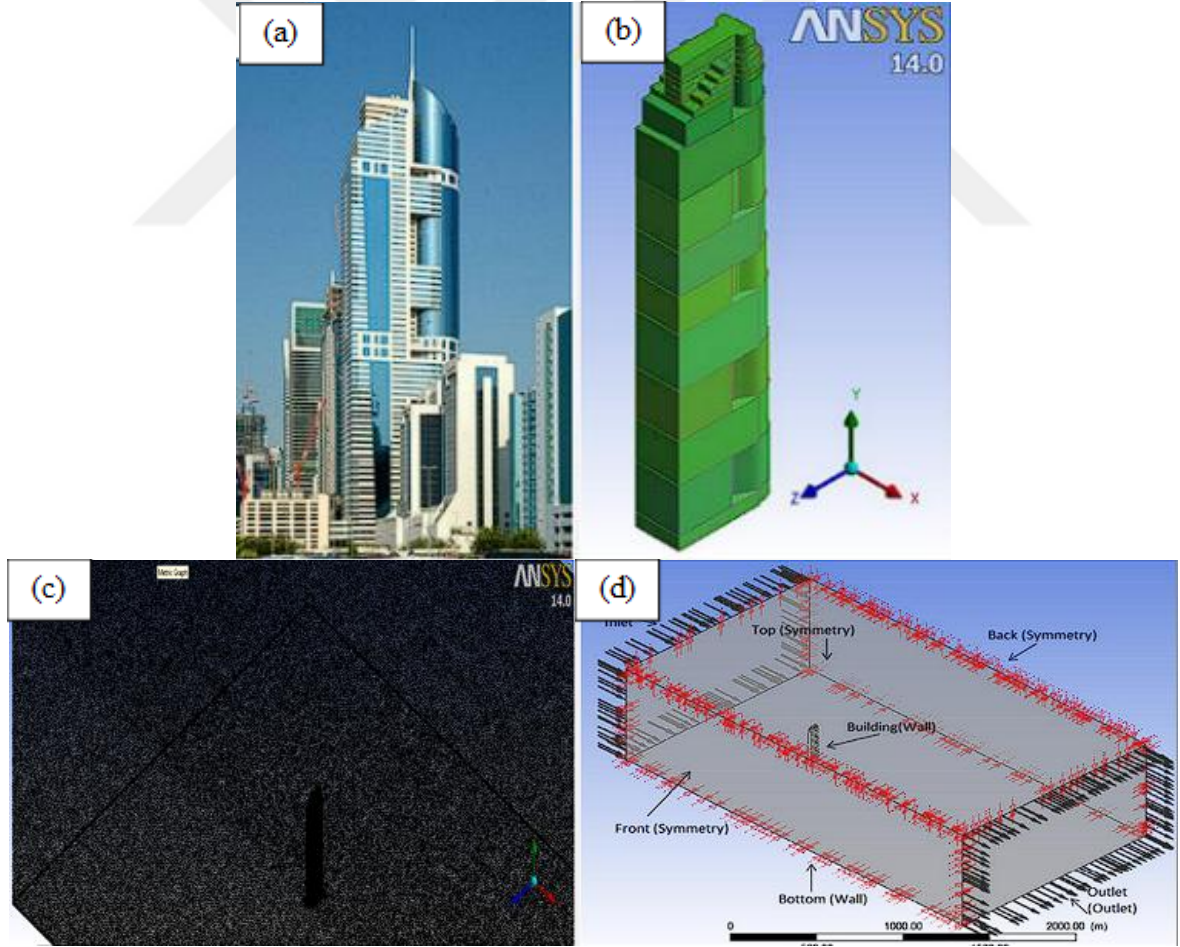
Şekil 19. Güneybatı Rüzgârı Durumu: (a) rüzgâr tüneli modeli ve (b) bina ve zemin yüzeylerinde ilgili hesaplamalı ızgara. Batı Rüzgârı Durumu: (c) rüzgâr tüneli modeli ve (d) bina ve zemin yüzeylerinde karşılık gelen hesaplamalı ızgara (Gousseau vd., 2011)



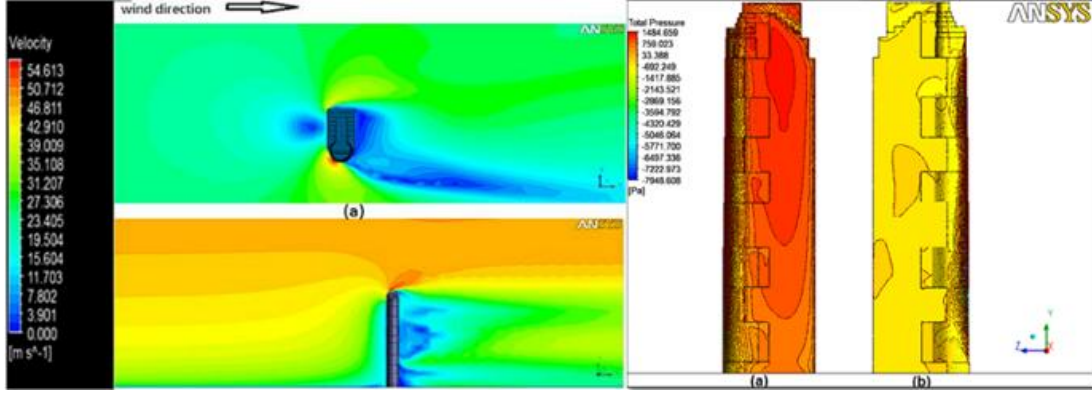
Şekil 20. (a) SKE- $S_{ct}=0.3$ ve (b) LES ile elde edilen batı rüzgârı durumu için bina çatılarında ve çevre sokaklarda 100°K 'lik konturlar. HAD doğrulaması: deneylerle karşılaştırmalı olarak (c) SKE ve (d) LES ile batı rüzgârı durumu için 100°K değerlerinin dağılım grafikleri (Gousseau vd., 2011)

- Binalardaki Rüzgâr Yükleri

Literatürde binalardaki dış ortama yönelik HAD çalışma alanlarından birisi de binaların yüzeylerinde oluşan rüzgâr yükleridir. Bu alanda yapılan çalışmalar genellikle yüksek katlı yapılarda oluşan rüzgâr yüklerine yöneliktir. Shireen ve James'in yaptığı çalışma yüksek katlı yapılardaki rüzgâr yüklerinin tespiti çalışmalarına örnektir. Çalışma kapsamında örnek olarak seçilen yüksek katlı yapılardan biri olan Dubai'deki HHHR Tower'in (Blue Tower) iki farklı cephesindeki oluşan rüzgâr akışının oluşturduğu rüzgâr yükleri RANS (RNG k- ϵ türbülans modeli) HAD metodu ile ANSYS CFX 14.0 yazılımı yardımıyla tespit edilmiştir (Şekil 21). Burada tercih edilen RANS metodunda Standart k- ϵ yerine RNG k- ϵ türbülans modelinin tercih edilmesinin sebebi RNG k- ϵ 'nin yazarlarının ifadesiyle yüksek katlı yapılarda rüzgâr akışı ve rüzgâr yüklerinin analizinde daha tutarlı sonuçlar vermesidir (Shireen ve James, 2017).

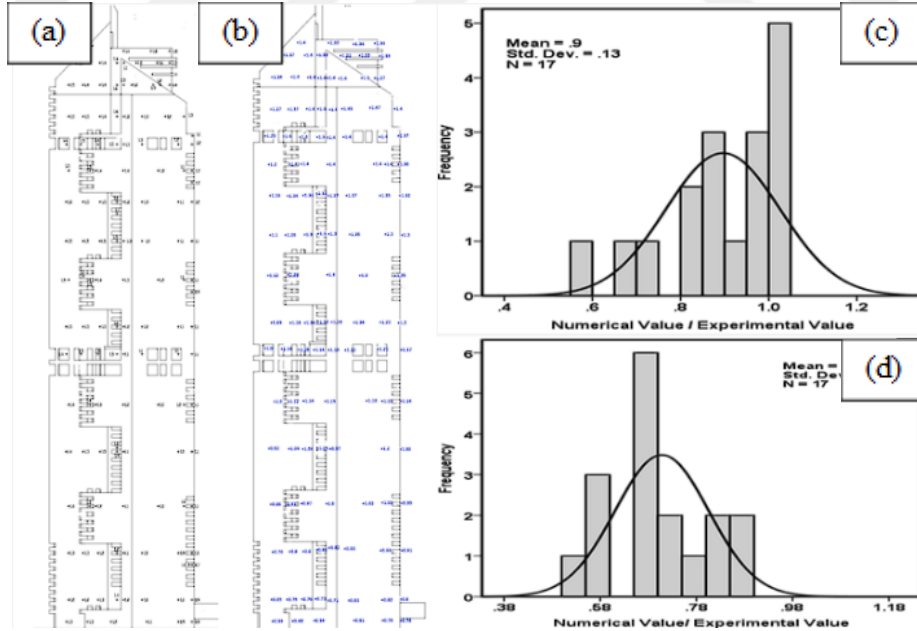


Şekil 21. (a) Dubai'deki HHHR Kulesi, (b) Blue Tower'in CAD geometri modeli, (c) Blue Tower için etki alanı ağı oluşturulması, (d) HHHR Tower modelinin etki alanı içindeki sınır koşulları (Shireen ve James, 2017)



Şekil 22. Blue Tower etrafındaki rüzgâr hızlarının dağılımı: (a) 5 m yükseklikte yatay düzlem, (b) düşey düzlem. Rüzgâr yönü 0° açıda olan bina yüzlerindeki basınç kontur çizgileri: (a) Rüzgâra bakan ceph, (b) rüzgâra bakmayan ceph (Shireen ve James, 2017)

Shireen ve James'in çalışmasında binanın HAD modeli ile 2 farklı cepheden rüzgâr akış analizi (Şekil 22) ve rüzgâr yükü tespitinin ardından rüzgâr tüneli deneyleriyle kıyaslaması yapılmıştır. Şekil 23'te Blue Tower'ın akışla cephelerinde oluşan rüzgâr basınç değerlerinin HAD ve rüzgâr tüneli çalışmalarıyla doğrulanması çalışması yer almaktadır.

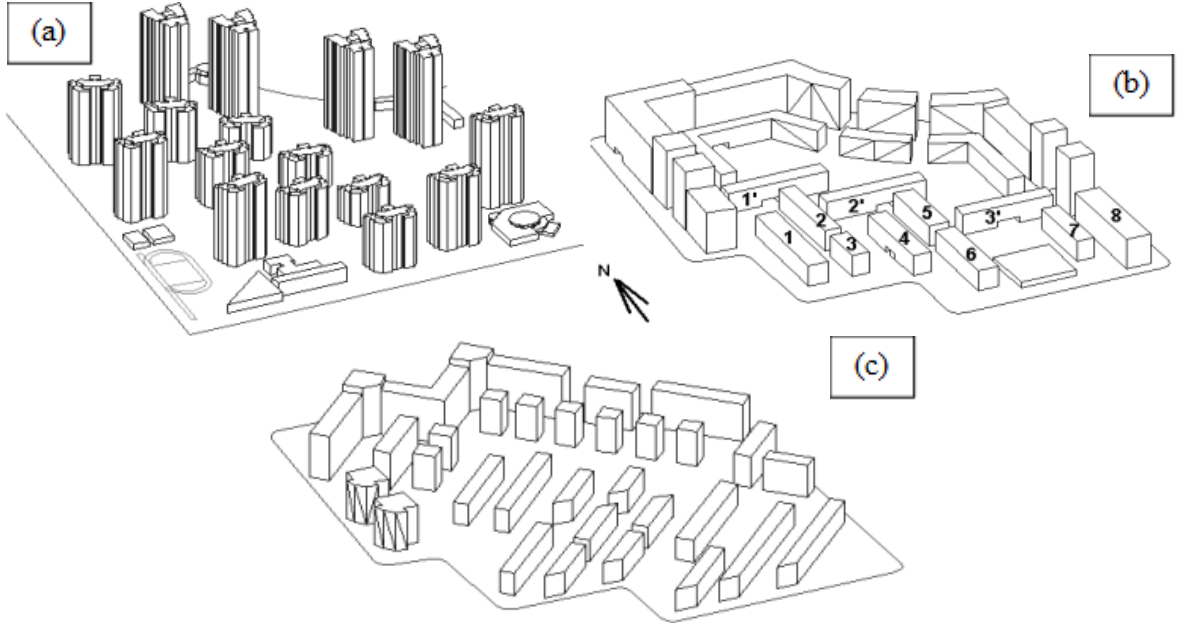


Şekil 23. Rüzgârın 0° açıyla yönlendirildiği Blue Tower'ın rüzgâra bakan yüzündeki kN/m^2 cinsinden rüzgâr basınçları: (a) Rüzgâr tüneli deneyi ile; (b) HAD analizi verileri, (c) Rüzgâr tüneli testinin rüzgâr basınçları ile 0° rüzgâr yönünde Mavi Kule'nin HAD analizi arasındaki karşılaştırma, (d) Rüzgâr tüneli testinin rüzgâr basınçları ile 90° rüzgâr yönünde Mavi Kule'nin HAD analizi arasındaki karşılaştırma (Shireen ve James, 2017)

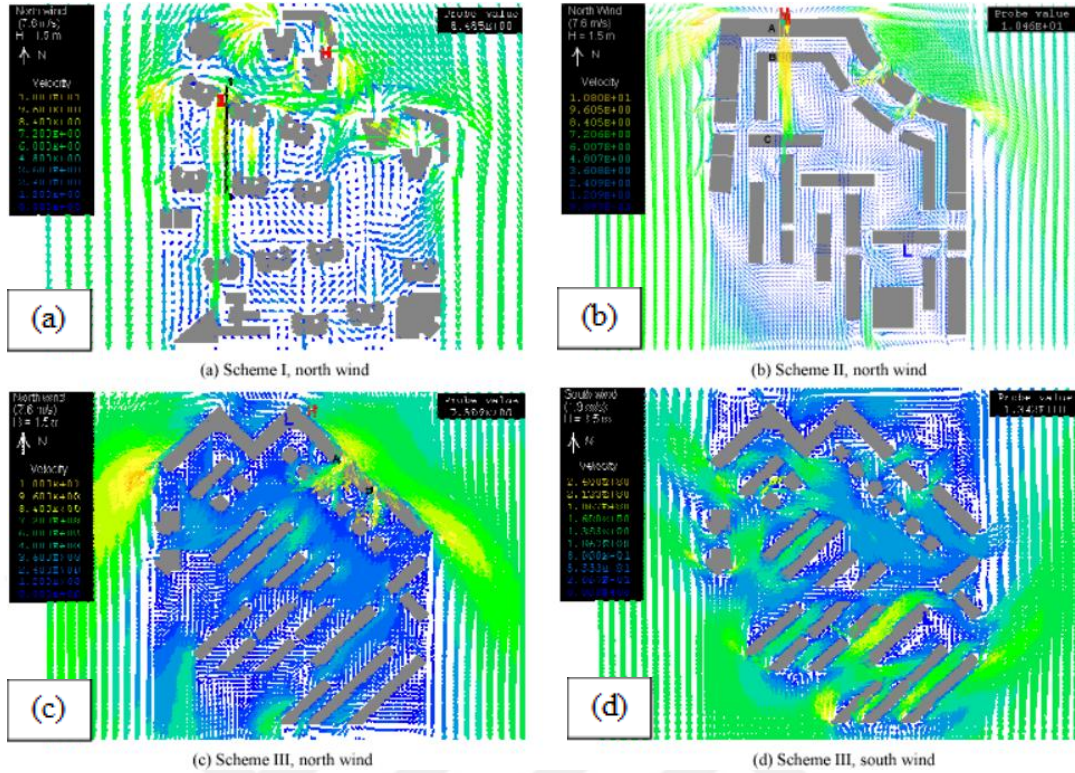
- Yüksek Katlı Yapılarda HAD (CFD) Uygulamaları

HAD'ın mimarlık alanında son yıllardaki öne çıkan uygulama alanlarından biri de yüksek katlı yapılardır. Önceki bölümlerde ele alınan bazı çalışmalar bu alandaki uygulamaların öncüleri olurken (Yoshie vd., 2007), son yıllarda yapılan çalışmalar özellikle yüksek katlı yapıların aerodinamik performansının formları ile nasıl optimize edilebileceğini incelemektedir. Ayrıca son yıllarda bu alanda Türkçe literatürde de öne çıkan çalışmalar olmuştur.

Yüksek katlı yapıların formları üzerinde değişiklikler ile aerodinamik performans optimizasyon çalışmaları 2000'li yılların başlarına dayanmaktadır. Bu konuda yapılmış en eski çalışmalardan biri Chen ve Srebric'in (2000) Pekin'de yer alan yüksek katlı bir konut kompleksini incelediği çalışmasıdır. Çalışma kapsamında Pekin şehir merkezinde kat yüksekliği 33 ile 90 metre arasında değişen 16 yapı örneklem alınarak öncelikle yapılar arasında oluşan akış şemaları incelenmiş daha sonra bölüm ve konut sayısı değiştirilmeden yapıların formları üzerinde çeşitli değişiklikler yapılarak alternatif modeller üretilmiştir (Şekil 24). Çalışma sonunda orijinal model ve alternatif iki modelin aerodinamik performansı değerlendirilmiştir (Şekil 25). Çalışma tasarım aşamasında HAD kullanılarak tasarımların nasıl optimize edilebileceğini ortaya koyması yönüyle önemlidir.

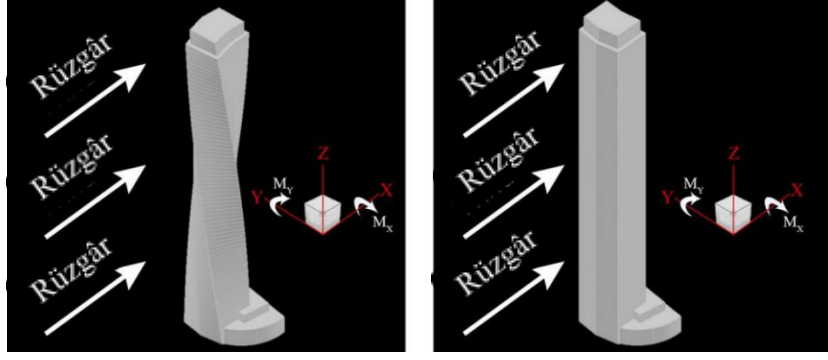


Şekil 24. (a) Pekin'de bulunan yükseklikleri 33-90 m arası değişen konut kompleksi, (b) üretilen ilk alternatif model, (c) ikinci alternatif model ve final tasarımı (Chen ve Srebric, 2000)



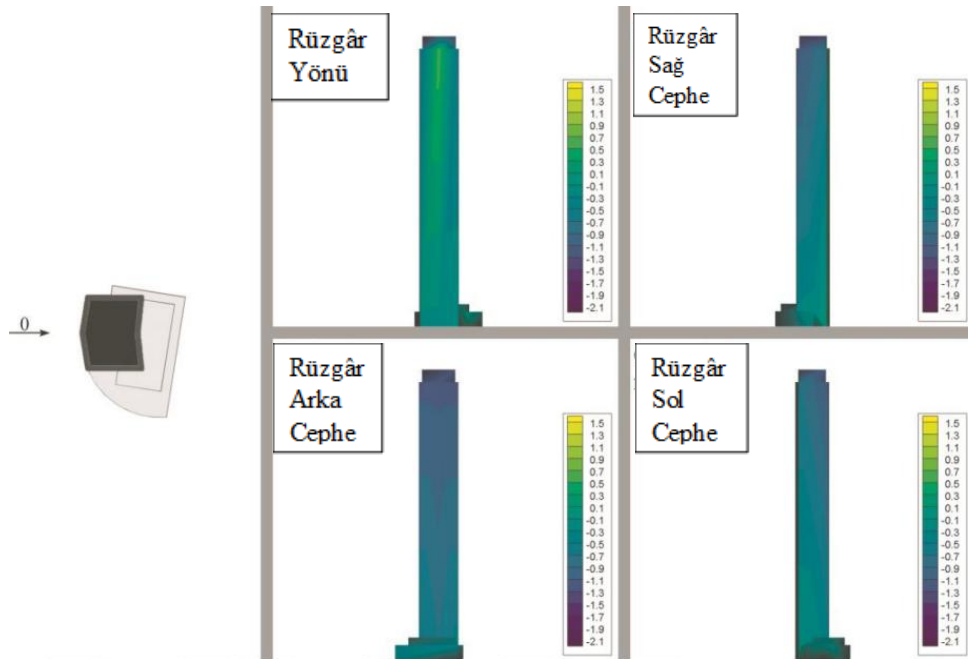
Şekil 25. (a) orijinal bina yapılanmasıyla yaya seviyesinde kuzey yönlü rüzgâr akışı, (b) ilk alternatif modele göre kuzey yönlü rüzgâr akışı, (c) ikinci alternatif modele göre kuzey yönlü rüzgâr akışı (d) ikinci alternatif modele göre güney yönlü rüzgâr akışı (Chen ve Srebric, 2000)

Yüksek katlı yapılarda formun aerodinamik performansını incelemek için yapılan bir başka çalışma ise Bilgen'in prizmatik bir yüksek katlı yapı tasarımı ile aynı tasarımının burkulmuş-kıvrımlı formdaki bir başka alternatifini ile karşılaştırdığı çalışmasıdır (Bilgen, 2009). Çalışmada araştırmacı öncelikle yüksek katlı prizmatik bir yapıyı strüktürel gereklilikleriyle oluşturmuş daha sonra bu binayı burkulmuş-kıvrımlı bir biçimde yeniden tasarlamıştır. Sonrasında oluşan bu iki tasarım aerodinamik performans açısından önce HAD yazılımlarıyla analiz edilmiş ve son aşamada rüzgâr tüneli çalışmalarıyla desteklenmiştir. Çalışma burkulmuş-kıvrımlı yapıdaki yüksek katlı yapılara yeni bir bakış açısı sunmanın yanı sıra Türkiye'deki literatürde yüksek katlı yapılarda aerodinamik alanında yapılan nadir çalışmalardan biri olması yönleriyle önemlidir. Şekil 26'da prizmatik yapı ve prizmatik yapıdan yola çıkılarak tasarlanan burkulmuş-kıvrımlı yapı ve bu yapılara etki eden rüzgârın akış yönü ve yapıların eksenleri gösterilmektedir. Burkulmuş yapı prizmatik yapıyla tabandan itibaren aynı başlayıp kat sayısı arttıkça saat yönünde 90° açı ile burkulmuştur.



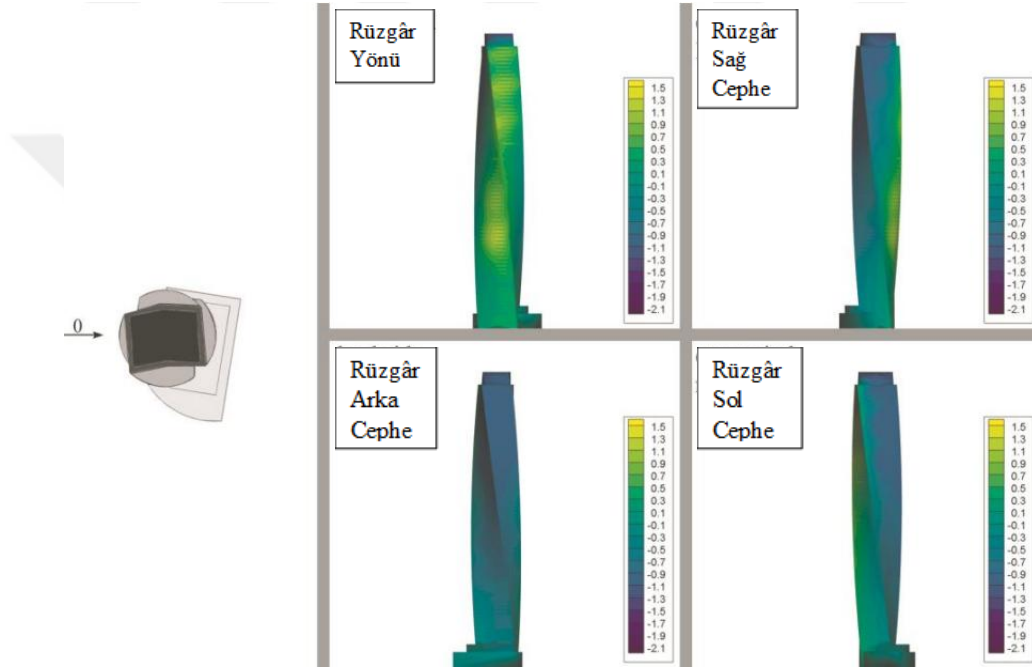
Şekil 26. Burkulmuş (sol) ve prizmatik (sağ) modellerin birincil eksenleri (Bilgen, 2019)

Şekil 27 ise burkulmuş-kıvrımlı yapı ile prizmatik yapının belirtilen rüzgâr yönündeki rüzgâr akışı davranışlarını göstermektedir. Bükümlü model daha az taban eğilme momentine maruz kalsa da özellikle büküm kenarlarında lokalize yüzey basıncı gözlemlenebilmektedir. Buna bağlı olarak bükümlü formun cephe tasarımına ilave zorluklar getirebilir. Burkulma formunun rezonans momentleri her iki yön için de nispeten sabit olup, prizmatik formdaki değişim rüzgâr yönüne bağlı olarak daha büyük ölçekte olabilmektedir. Prizmatik yapının keskin kenarlı formu nedeniyle, girdap oluşturma özellikleri her rüzgâr yönü açısı için farklı olurken, bükümlü form, şekle bağlı olarak daha yumuşak bir tepkiye sahiptir.



Şekil 27. Prizmatik yapıda rüzgârın farklı cephelerdeki davranışları ve cephelerle etkileşimi (Bilgen, 2019)

Şekil 27’de prizmatik formdaki yapının rüzgâr yönündeki cephesinde yoğun biçimde basınca maruz kalırken Şekil 28’de burkulmuş-kıvrımlı formdaki yapıda bu durum kenar bölgelerde görülmektedir. Sonuç olarak, araştırılan bükümlü form hem rüzgâr yönünde hem de rüzgâr yönünün aksi yönünde daha az rüzgâr yükü nedeniyle aerodinamik olarak daha iyidir. Yüksek binaların tasarımında sadece yerçekimi ve rüzgâr yükleri dikkate alınarak prizmatik forma göre bükümlü yapı formu tercih edilebilir. Yani bükümlü form kendi içinde yapısal olarak avantajlar ve dezavantajlar taşımaktadır.



Şekil 28. Burkulmuş-kıvrımlı yapıda rüzgârın farklı cephelerdeki davranışları ve cephelerle etkileşimi (Bilgen, 2019)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışma Alanının Belirlenmesi

Yapılan tez çalışması için seçilen çalışma alanında öncelik yerel çevrede yer alması, çalışma alanına ve alanla ilgili verilere ulaşılabilirlik olmuştur. Öncelikle Trabzon ve çevre illerdeki yüksek katlı yapılar ve yapı adaları incelenmiştir. Sonuç olarak Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki ve Trabzon özelindeki yapılar incelendiğinde hem yüksek katlı hem de rüzgâr etkenine oldukça fazla maruz kalan yapı adalarından biri olan site yerleşkesi örnek alan olarak seçilmiştir. Çalışma alanı seçimindeki etkin parametreler alanın özellikle Karadeniz sahilinin ikliminin önemli tipik özelliklerinden biri olan kuzey ve batı eksenli rüzgâr akışına maruz kalan bir bölgede yer alması, yüksek katlı yapılardan oluşan bir yapı adasında yer alması, problem olarak kabul edilebilecek aerodinamik açıdan belirgin sorunlara sahip olması ve yaya seviyesinde rüzgâr konforu çalışmalarına uygun olmasıdır. Çalışmada yer alan site yerleşkesi Trabzon ili, Yomra İlçesi, Sancak Mahallesi'nde Trabzon-Rize yolu istikametinde sahil kıyısında 43.866 m² bir alanda yer almaktadır (Şekil 29). Çalışmada örneklem olarak seçilen yapılar, birinci etap olarak tanımlanan ve Yomra sahiline bitişik konumlanan alan 21.352 m² alanda yer almaktadır. Bu alanda 4 blok halinde 27 katlı 1 adet (102 bağımsız bölüm), 22 katlı 1 adet (82 bağımsız bölüm), 19 katlı 1 adet (70 bağımsız bölüm), 16 katlı 1 adet (45 bağımsız bölüm), betonarme mesken ve 2 adet otopark bulunmaktadır. Çalışma alanına komşu parselde yer alan ikinci etap yapıları ise 19.183 m² alana sahiptir. Bu alanda ise 1 adet 23 katlı (148 bağımsız bölüm), 1 adet 20 katlı (109 bağımsız bölüm) ve 1 adet 18 katlı (113 bağımsız bölüm) betonarme meskenler bulunmakta ve yapıların 1'er katı bodrum kat statüsündedir. Sitenin diğer parselinde ise yalnızca spor sahaları bulunmaktadır. Yapıların ilk etabına 2013 yılında başlanmış, tüm blokların tamamlanması ve diğer çeşitli düzenleme faaliyetleri 2018 yılına kadar uzanmaktadır.



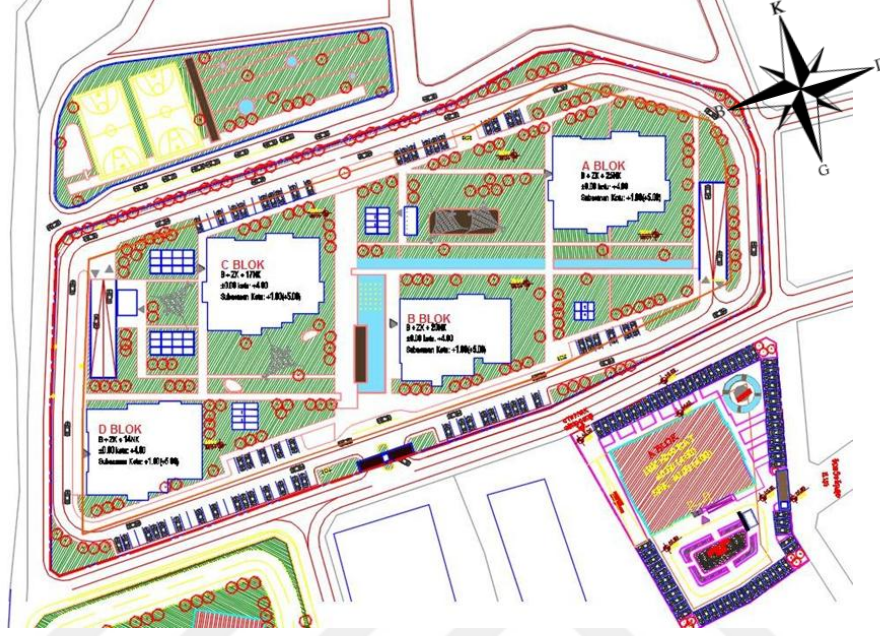
Şekil 29. Çalışma alanı üzerinde yer alan parsel ve komşu parseller; Trabzon, Yomra, Sancak Mahallesi, Trabzon-Rize Yolu (URL-2)

Şekil 30'da görüldüğü üzere çalışma alanındaki yapılar yakın çevrede bulunan yüksek katlı yapılar arasındadır. Çevredeki yapıların tamamının yüksekliği bu alandaki yapılara göre daha azdır. Yapının yakın çevresinde 2 katlı (h: 7,5 m) konut bölgesi yer alırken çevredeki yapıların kat sayısı 5-8 kat (h: 15-25 m) aralığındadır. Bunun yanı sıra yapılar sahil yerleşkesine paralel uzanır.



Şekil 30. Çalışma alanı ve yakın çevresindeki yapıların 3 boyutlu harita görünümü

Şekil 31’deki vaziyet planı 27 katlı A blok, 22 katlı B blok, 19 katlı C blok ve 16 katlı D blok ve spor alanlarını göstermektedir. A, C blok ve spor sahaları alanın kuzeyinde, B ve D blok ise güneyinde yer almaktadır.



Şekil 31. Çalışma alanında yer alan site yerleşkesinin vaziyet planı

Şekil 32’deki görsellerden de görüldüğü üzere yapılar Yomra sahiline paralel biçimde ve sahile oldukça yakın mesafede yer almaktadır. Yapıların yüksekliği ve formundan kaynaklı bazı etkenler yapıları bölgede hâkim olan yüksek hızlı rüzgâr akışına (10,8-13,8 m/sn) uzun süreli maruz bırakmaktadır ve bundan kaynaklı çeşitli rüzgâr konforu sorunlarına yol açmaktadır [(Engin, 2004), (URL-3)].



Şekil 32. Site yerleşkesi birinci etap A, B, C, D blokları ve Trabzon sahilini

Yüksek katlı yapılar inşa aşamasından itibaren çeşitli akışkan problemlerini içinde barındırır. Cephe elemanlarının sabitlenmesi gibi bazı uygulamalar titizlik ve güvenlik önlemlerini gerektirir. Cephe elemanlarının montajı veya yapı kullanımında yüksek hızlı rüzgâr ve yapı etkileşimi önem arz etmektedir (Şekil 33).

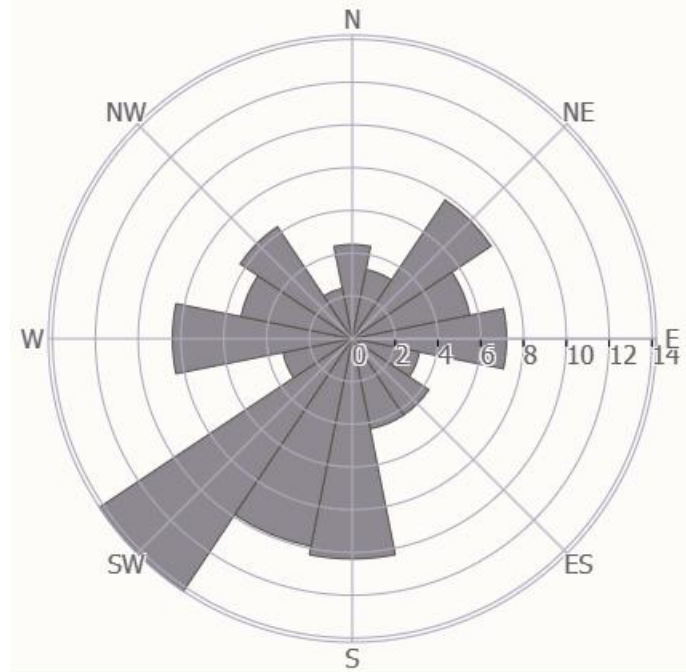


Şekil 33. B blok inşa aşamasından bazı görseller

2.1.1. Rüzgarla İlgili İklim Verileri

Trabzon ili ve çevresi için bölgedeki rüzgâr ile ilgili iklim verilerini incelemek için öncelikle literatür araştırması yapılmıştır. Burada rüzgâr ile ilgi olarak rüzgâr sıklığı (frekansı), rüzgâr hızı ve hâkim rüzgâr yönü araştırmaları çalışma alanının HAD ortamındaki analizi için önem arz etmektedir. Trabzon ve çevresi ile ilgili detaylı rüzgâr araştırmalarını barındıran ilk örneklerden biri “Trabzon İklim Etüdü” çalışmasıdır. Çalışma 1990 yılına kadar geçmişe dönük olarak Trabzon’daki rüzgâr ölçüm istasyonu verileriyle rüzgâr ve bölge iklimi hakkında detaylı bilgi sağlamaktadır (Akkaş, 1990). Trabzon ve çevresi hakkında iklim ve rüzgâr ile ilgili veri sağlayan başka bir çalışma Trabzon ve Çevresinin İklimi’dir. Çalışma yalnızca Trabzon değil Trabzon’un çevre illeri ve ilçeler hakkında da detaylı iklim verileri sağlamaktadır (Karadeniz, 1995). Bu çalışmalar dışında daha güncel tarihli olarak “Karadeniz Bölgesi Meteoroloji Gözlem İstasyonlarının Rüzgâr Hızı Değerleri Kullanılarak Kümelenmesi” adlı çalışma da bölgedeki meteoroloji gözlem istasyonları verilerini kullanarak bölge iklimi hakkında bilgi vermektedir (Kır vd., 2023). Bunlar dışında bölgedeki özellikle yüksek hızlı rüzgâr ve fırtınalara odaklanan çalışmalar da bulunmaktadır. Engin’in “Trabzon’da Fırtınalar” adlı makalesi Trabzon ve çevresinde görülen yüksek hızlı rüzgâr ve fırtınaları tanımlayarak bu rüzgarların görülme sıklığını ortaya koymaktadır (Engin, 2004).

Bir hava hareketi veya hava sirkülasyonu olarak bilinen rüzgâr pek çok açıdan yapıları ilgilendiren önemli bir iklim elemanıdır. Bu hava hareketi yön ve hız parametreleriyle ölçümlenebilir. Genel olarak meteoroloji istasyonlarında rüzgâr hızı m/sn ile ölçümlenir. Trabzon ve Akçaabat istasyonlarında 16 yön ve m/sn cinsinden ölçümlenebilirken Trabzon ilindeki diğer istasyonlarda genellikle Beaufort (Bofor) skalası yöntemiyle ve 8 yön kullanılarak ölçümlenmektedir (Karadeniz, 1995). Trabzon'daki meteoroloji iklim istasyonlarının detaylı veri tutmaya başladığı 1960'lı yıllardan itibaren veriler göz önüne alındığında Trabzon'da ortalama rüzgâr hızı yaklaşık olarak 1,8 m/sn'dir. Rüzgâr hızının aylara göre değişimi göze alındığında aylık ortalamalar 1,5 m/sn ile 1,9 m/sn arasında değişmektedir. Trabzon'da rasat süresi boyunca (günlük) görülmüş en yüksek rüzgâr hızı 32,3 m/sn S yönünde 12.03.1968'de Trabzon istasyonunda ölçümlenmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü). Beaufort (Bofor) skalası verileri bu ölçümlere dahil edilmemiştir. Trabzon'da hâkim rüzgâr yönü istasyonlara göre farklılık gösterirken Trabzon istasyonunda yıl genelinde rüzgâr S, SW, SSW yönlerinde diğer yönlerle göre daha fazla tekrar etmektedir (Şekil 34), en fazla tekrar eden yön ise SW'dir (~%14,2).



Şekil 34. Trabzon meteoroloji istasyonu verilerine göre hâkim rüzgâr yönü grafiği (Karadeniz, 1995)

Tablo 5’te verilen aylık ve yıllık rüzgâr yönü dağılımlarına göre hâkim rüzgâr yönü yıllık ortalamada SW olurken hâkim rüzgâr yönü kimi zaman aylara ve mevsimlere göre değişiklik göstermektedir. Buna göre yıl genelinde hâkim rüzgâr yönünde şubat ayından başlayarak haziran ayına kadar değişim görülmektedir.

Tablo 5. Trabzon’da aylara göre rüzgâr yönlerinin yüzdelik dağılımı ve yıllık ortalamaları (Karadeniz, 1995)

Yön/Ay	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Yıllık
N	1.6	2.3	4.8	5.8	6.9	7	7.2	6.3	4.2	2.7	2.4	1.6	4.4
NNE	1.8	1.9	3.5	4.6	6.4	4.9	3.8	3.9	3.3	2.4	1.4	1.5	3.3
NE	4.3	6.6	8.9	12.2	14	9.7	7.6	6.4	6.3	7.3	5.6	4.1	7.8
ENE	4.2	4.5	6.6	8.9	10	7	4.8	4	4.2	5.3	4.7	3.4	5.6
E	6.6	6.6	10.7	12.8	11.5	8	4.9	3.8	3.5	5.1	6.3	6.1	7.2
ESE	3	2.8	5.4	5	5.2	3.3	2.2	1.8	1.5	2.1	2.4	3.2	3.2
SE	5.1	3.7	5.9	4.6	3.8	4.8	4	3.2	3.2	3.4	4.7	5	4.3
SSE	4.6	3.7	3.7	2.9	2.4	3.9	5.4	5.1	5.3	5	4.7	4.6	4.3
S	12.9	16.8	7.5	5.8	4.5	5.7	7.6	10.9	12.3	12.1	14.3	12.8	10.3
SSW	11.3	10	7.1	5.2	3.1	4.8	8.2	9.9	13.9	13.8	15.2	16	9.9
SW	18.1	13.3	8.2	7.9	7	11.5	14.3	15.8	17.9	18.8	18	19.8	14.2
WSW	4	3.7	2.6	2.4	2.3	3.4	3.6	4.1	2.5	3.5	3.8	3.7	3.3
W	9.4	10.9	8.7	7.6	8.4	8.6	8.9	8.6	8.1	7.1	6.8	7.6	8.4
WNW	6.3	6.7	6.9	5.2	4.9	5.5	5	4.3	4.4	4.7	4.5	5.4	5.3
NW	5.4	5.5	7.8	6.7	6.6	8	7.9	8.1	6.5	5.1	4.2	3.9	6.3
NNW	1.5	1.4	2.2	2.4	3	3.7	4.5	3.7	2.5	1.6	1	1.3	2.4

Tablo 6’da hâkim rüzgâr yönünün bahar mevsimindeki değişimi görülebilir. Buna göre yıl genelinde hâkim rüzgâr yönü SW iken Mart, Nisan ve Mayıs aylarında E ve NE yönleri hakimdir. Ayrıca bu aylarda fırtına oluşumu da görülmektedir.

Tablo 6. Trabzon Meteoroloji İstasyonu verilerine göre aylara göre hâkim rüzgâr yönleri

Ay	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hâkim Rüzgâr Yönü	SW, S	S, SW	E, W	E, NE	NE, E	SW, NE	SW, W	SW, S	SW, SSW	SW, SSW	SW, SSW	SW, SSW

Beaufort (Bofor) skalasına göre kuvvetli rüzgâr (6. seviye, 10.8-13.8 m/sn) ve üzerinde yer alan rüzgâr hızları yüksek hızlı rüzgâr olarak nitelendirilebilir. Beaufort (Bofor) skalasında 8. seviye rüzgarlar ise fırtına (17.2-20.7 m/sn) sınıfında yer alır ve bu yüksek hızlı rüzgarların yapı ile etkileşiminde HAD devreye girer. Trabzon’da görülen yüksek hızlı rüzgâr ve fırtınalarla ilgili veriler irdelendiğinde fırtınaların genellikle NW yönünde ve özellikle kış aylarında etkili olduğu görülmektedir (Engin, 2004). Tablo 7’de Trabzon’da oluşan fırtınaların aylık ortalama dağılımları ve yönleri görülmektedir.

Tablo 7. Bazı yönlere göre aylık fırtına sayıları (Engin, 2004)

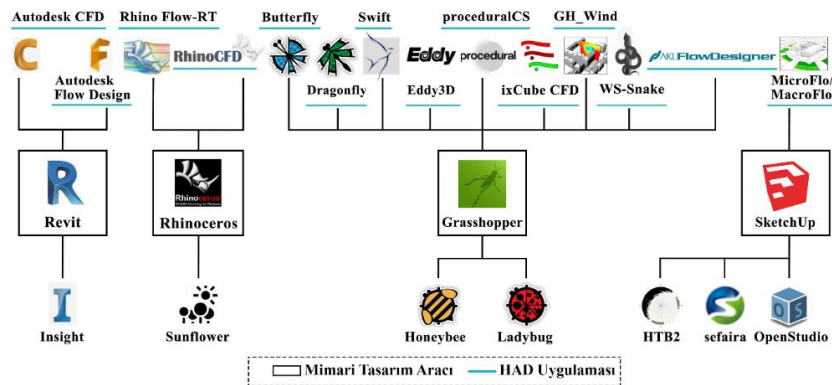
Ay / Yön	NW	W	S	SW
Ocak	20	2	5	2
Şubat	20	2	1	1
Mart	6	2	1	2
Nisan	3	-	-	2
Mayıs	1	-	2	-
Haziran	4	-	-	3
Temmuz	-	-	-	-
Ağustos	1	-	-	-
Eylül	6	4	-	1
Ekim	8	5	-	-
Kasım	11	4	-	1
Aralık	13	5	3	2
TOPLAM	93	24	12	14

2.2. Çalışmanın Amacı, Materyali ve Yöntemi

Simülasyon (simulation) veya Türkçe karşılığı ile benzetim; doğal ve beşerî sistemlerin modellenmesi ve işleyişi hakkında teknik olarak deneyim kazandırma ve deney yapma olanağı sağlayan sistemlerdir (Ören, 2006). Benzetim ile gerçek sistem kimi zaman birbirinden bağımsız olarak ele alınabilse de genellikle var olan bir sistem üzerindeki etkileşimi irdelemektedir.

Çalışmanın bu aşamasında öncelikle yapılan simülasyon çalışmasının amacı, niteliği ve yöntemi açıklanacaktır. Tezin giriş bölümünde belirtildiği üzere çalışma reelde var olan bir yapı adasının yüksek hızlı rüzgâr ile etkileşimini ve özellikle bu etkileşimin ortaya çıkardığı sorunları ele almaktadır. Çalışmanın amacı HAD simülasyonlarının yapı tasarımı aşamasında optimizasyon ve tasarımın uygulanması sonrasında iyileştirme faaliyetlerinde kullanılabilirliğini ortaya koymaktır.

Çalışmada kullanılacak HAD simülasyon yazılımının seçiminde birçok etken belirleyici olmuştur. Öncelikle yapılan literatür taramasında mimarlık disiplinde kullanılmış ve bu alanda kullanılabilirliği test edilmiş bazı yazılım paketleri irdelenmiştir. Seçilecek yazılımın erişilebilirliği, kullanılacak diğer CAD yazılımlarıyla entegrasyonu ve evrensellik gibi öncelikler belirlenmiştir. Hu ve diğerlerinin mimarlık alanında kullanılabilir HAD yazılımları ve eklentilerini irdileyen çalışmasına göre bu yazılım paketleri işlevlerine ve işlem kapasitelerine göre sınıflandırılmıştır (Hu vd., 2023). HAD simülasyonu için Autodesk CFD Ultimate 2024 yazılım paketi kullanılmış olup bu yazılım paketinin seçilmesinin temel sebebi seçilen yazılım paketinin mimarlık alanında kullanılan Autodesk Revit, Trimble Sketchup ve Rhinoceros 3D/Rhino yazılımlarıyla doğrudan uyumlu ve etkileşimli çalışmasıdır. Bu yazılım paketinin seçilmesindeki bir diğer etken ise kullanıcı arayüzünün (user-interface), Ansys Fluent gibi diğer HAD yazılım paketlerine göre daha basit ve kullanımının daha kolay olmasının yanı sıra HAD paketini çalıştıracak sistemin gereksinimleri de (CPU, RAM vb. sistemin teknik özellikleri) rakiplerine oranda daha düşüktür. Bu etkenler HAD paketine kullanıcının erişilebilirliğini artırırken ekonomik ve finansal olarak erişim daha uygundur. Ayrıca bulut sistemi (cloud) üzerinden analiz seçeneği de karmaşık ve uzun simülasyonları gerçekleştirme imkânı sunmaktadır.



Şekil 35. Tasarım platformları için HAD simülasyonlarına entegre edilen eklentiler ve performans simülasyonlarına entegre edilen eklentiler (Hu vd., 2023)

Şekil 35’te mimarlık alanında kullanılan çeşitli HAD yazılımları, eklentileri ve bu yazılımları destekleyen çeşitli CAD yazılımlarına yer verilmiştir. Bu yazılım paketleri çeşitli esneklikler sunarken HAD simülasyonunun türüne göre de tercih imkânı sunmaktadır. Tablo 8’de bu HAD yazılım-eklemleri paketlerinin avantajları-dezavantajları, kullanım alanına ve kullanılacak CAD yazılımına göre sınıflandırılması gösterilmektedir. Tabloya göre çalışma kapsamında kullanılacak Autodesk CFD yazılım paketi Autodesk Revit CAD ve BIM yazılımı ile doğrudan etkileşimli çalışırken bu HAD yazılımı hava akışı, kirlilik ve termal çalışmalar için uygundur.

Tablo 8. Tasarım platformlarına entegre edilen HAD eklentilerinin farklı yönleriyle kapsamlı biçimde karşılaştırılması (Hu vd., 2023)

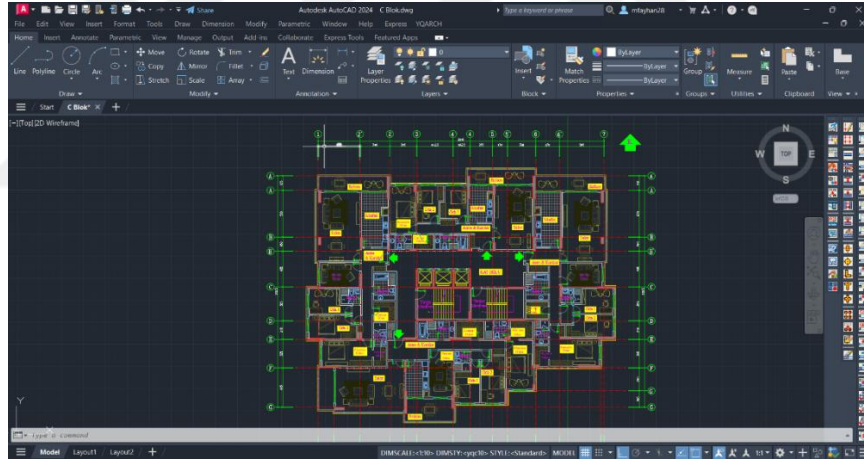
HAD Uygulaması	Tasarım Platformu	HAD Çözücü	HAD Simülasyonları			Diğer Simülasyonlar			Erken Tasarım Aşamalarıyla Uygulanabilirlik
			Hava Akışı	Kirlilik	Termal	Gün Işığı	Radyasyon	Enerji	
Autodesk CFD	Autodesk Revit	Autodesk CFD	✓	✓	✓				★★★
Autodesk Flow Design			✓						★★
RhinoCFD	Rhino	PHOENICS	✓	✓	✓				★★★
Rhino Flow-RT		Simerics-MP	✓		✓				★★★
Butterfly	Grass hopper	Open FOAM	✓						☆
Swift			✓	✓		✓	✓	✓	★★
Eddy3D			✓		✓				★
ProceduralCS			✓		✓	✓	✓	✓	★★
ixCube CFD			✓						★
GH_Wind		FFDSolver	✓						★
Dragonfly		ENVI-met	✓		✓		✓		☆
WS-Snake		–	✓						★
Flow Designer		Flow Designer	✓	✓	✓	✓	✓		★★★★
MicroFlo	SketchUp	IES(VE)	✓						★★
MacroFlo			✓		✓				★★

Yapılan literatür taramasında mimarlık alanında yapılan çalışmalarda analizlerin genellikle RANS (steady) metodu ve standart k- ϵ türbülans modeli kullanılarak yapıldığı ancak yüksek katlı yapılar ve yüksek rüzgâr hızı ile ilgili çalışmalarda RNG k- ϵ türbülans modelinin de tercih edildiği ve çalışmaya uygunluğu da görülmüştür. Bu nedenle simülasyon çalışmasında mevcut durumun analizi için standart k- ve RNG k- ϵ olmak üzere iki farklı türbülans modeli kullanılmıştır.

2.2.1. Simülasyon Aşamaları

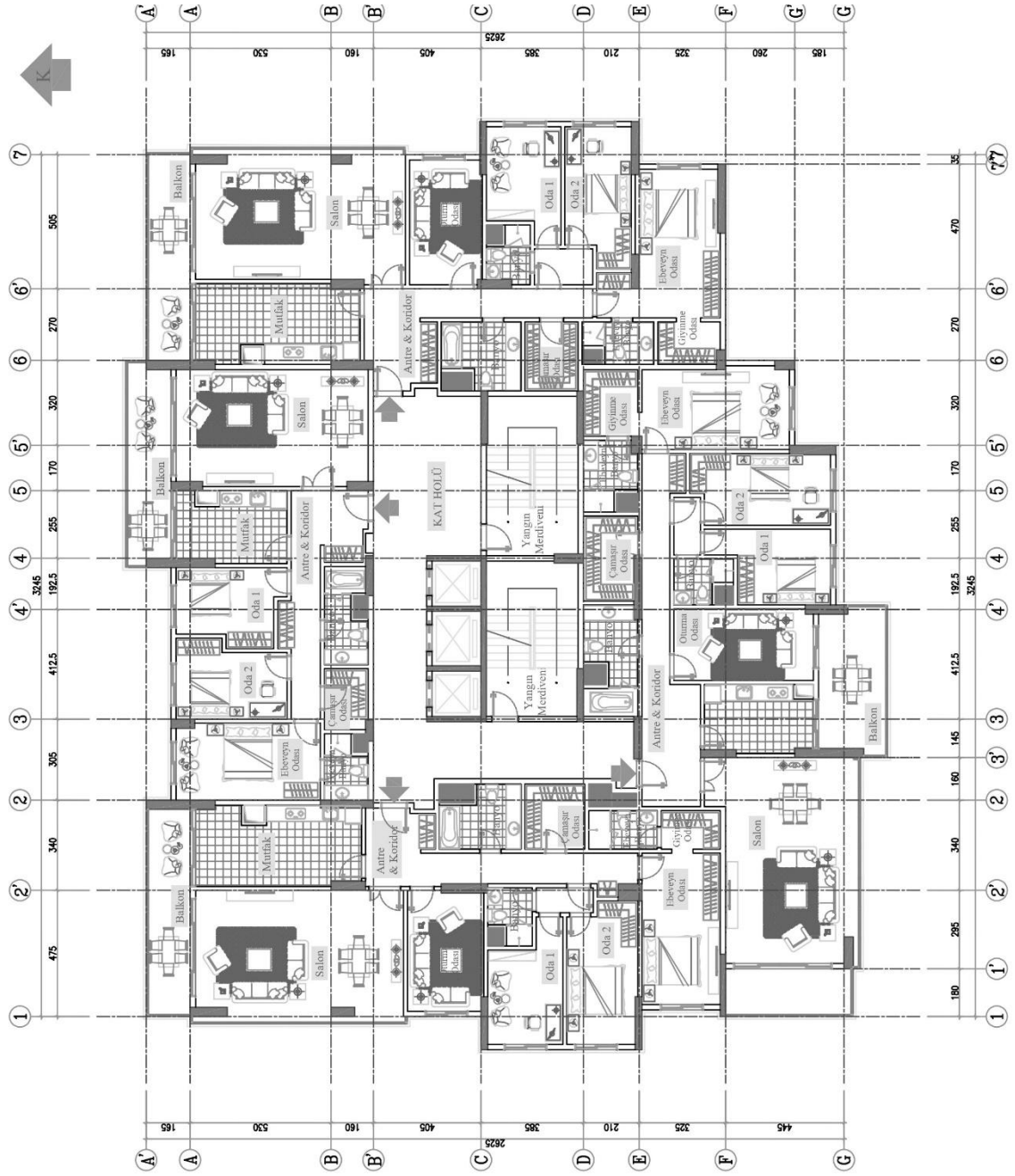
- CAD Geometrisinin Oluşturulması

HAD yazılımına yüklenecek CAD geometrisini oluşturmak için öncelikle yapı adasında bulunan yapıların kat planlarına ulaşılmıştır. Bu aşamada öncelikle kat planı CAD ortamına aktarılmış ve 3 boyutlu modellemeye uygun hale getirilmiştir (Şekil 36).

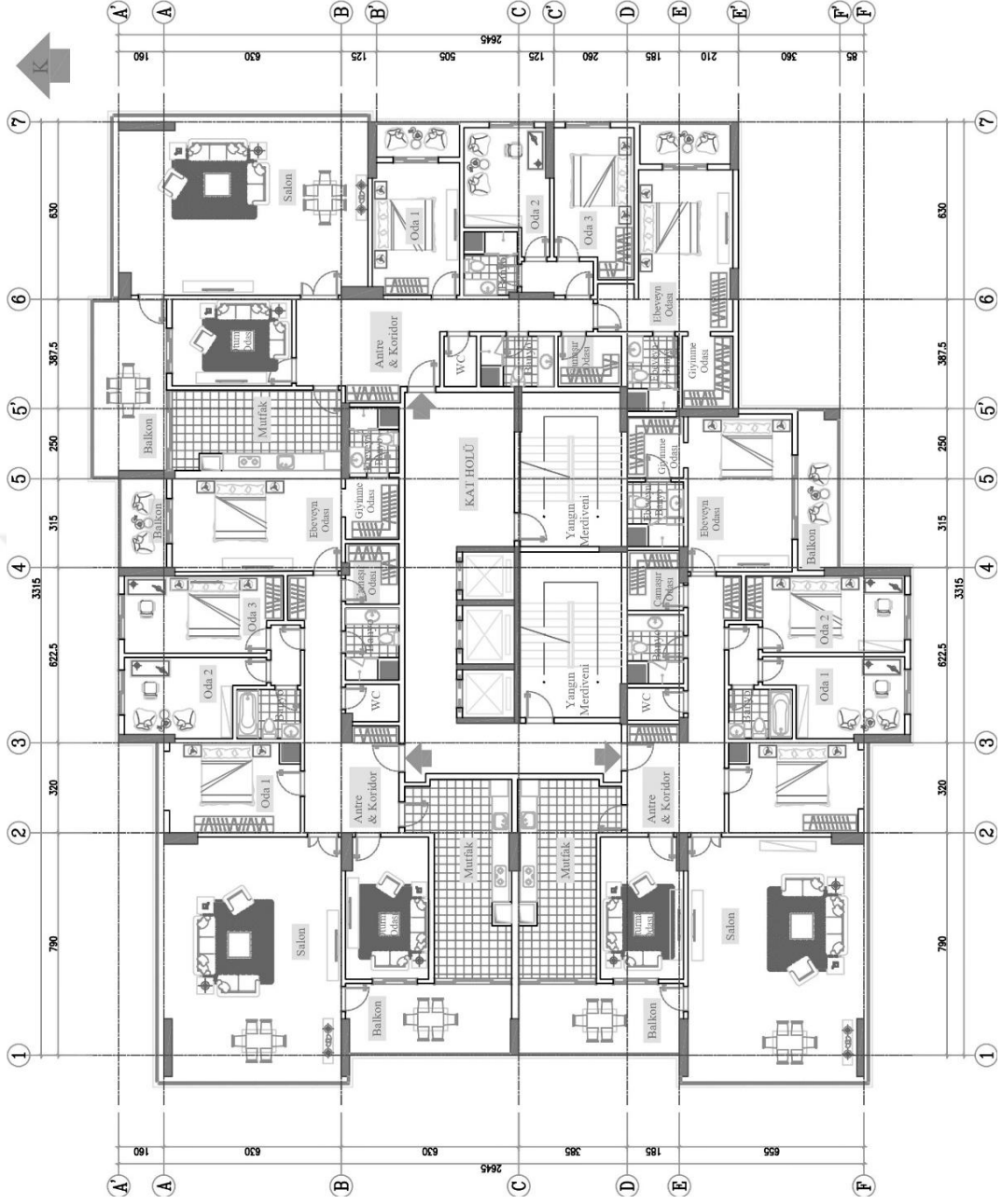


Şekil 36. AutoCAD yazılımında kat planının oluşturulması ve Revit modeline hazır hale getirilmesi

Şekil 37 ve 38’de kat planı verilen A, B, C, D Bloktaki yapılar daha sonra Autodesk Revit yazılımında 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Modelleme esnasında yapının özellikle dış cephesi, cephede plandan dolayı oluşan girinti-çıkıntılar, kat sayıları, yükseklikleri simülasyonun başarımı için yapıların reel halinden referans alınarak oluşturulmuştur. Pencere ve duvar öğeleri gibi bazı yapısal öğelerin yanı sıra yapının balkonlarında bulunan hareketli cam imalatlar da modelde işlenmiştir fakat modelin detay seviyesi simülasyonun süresini ve başarımını etkileyeceği için bu öğeler geometrik açıdan basitleştirilerek aktarılmıştır.

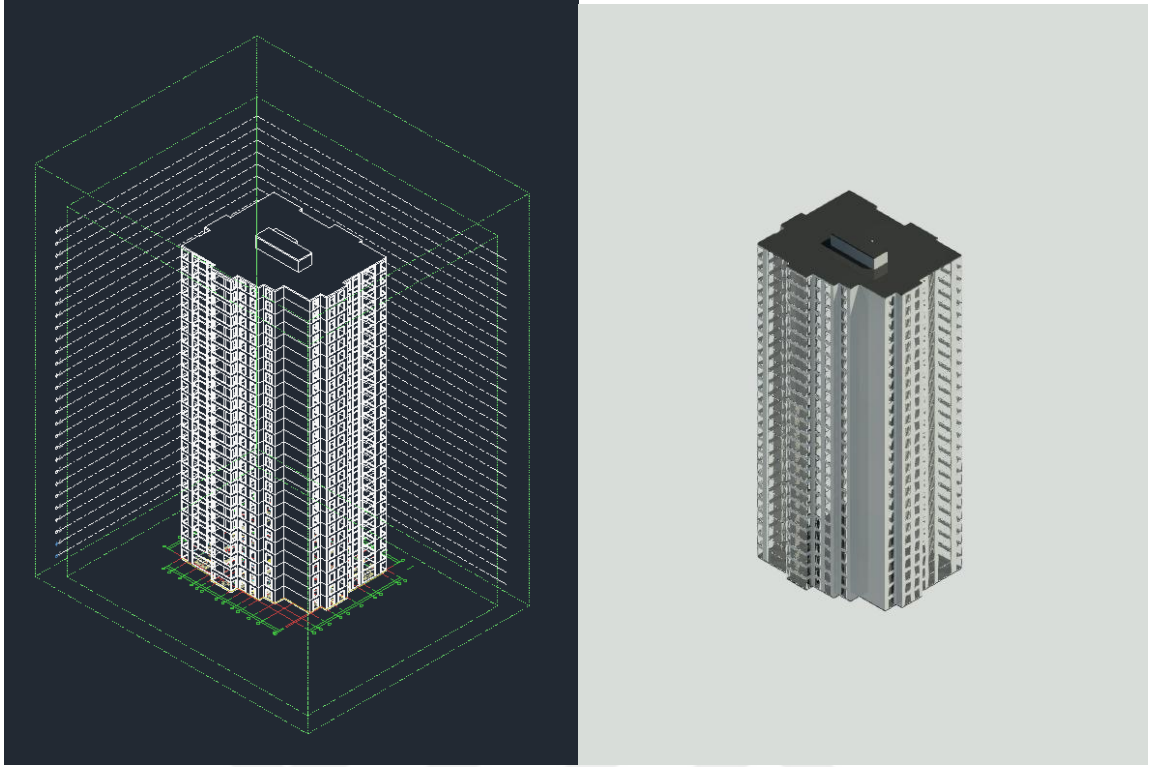


Şekil 37. A, B, C Blok kat planı, ölçek: 1/250

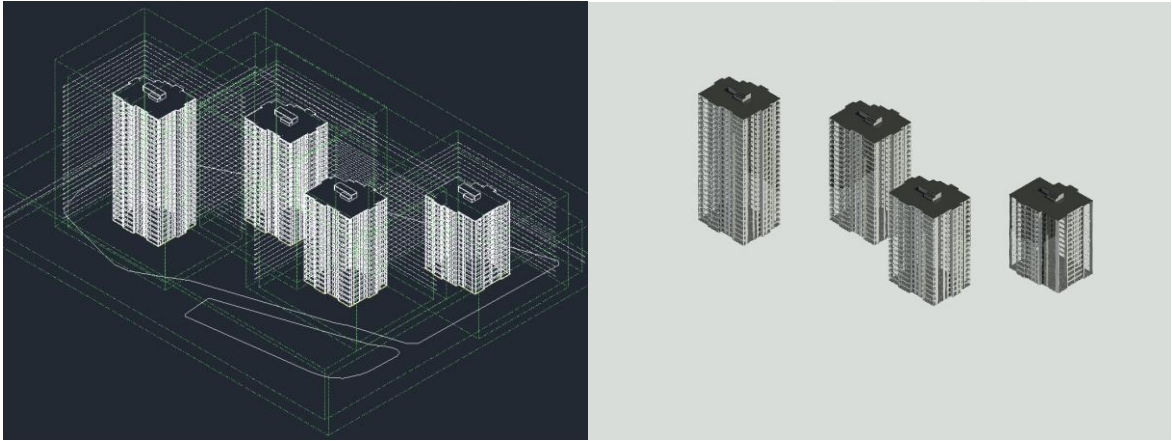


Şekil 38. D Blok kat planı, ölçek: 1/250

Şekil 37 ve Şekil 38’de kat planları verilen A, B, C ve D blok yapıları 3 boyutlu olarak Revit yazılımında modellenirken yapıların yükseklikleri ve kat sayıları mevcut durumdakine uygun biçimde modellenirken (Şekil 39) yapıların konumları ve birbirlerine göre durumları vaziyet planından referans alınmıştır (Şekil 40). Şekil 40’da yapıların konumları ve yükseklikleri Revit yazılımında 3 boyutlu modelleme yöntemiyle gösterilmektedir.



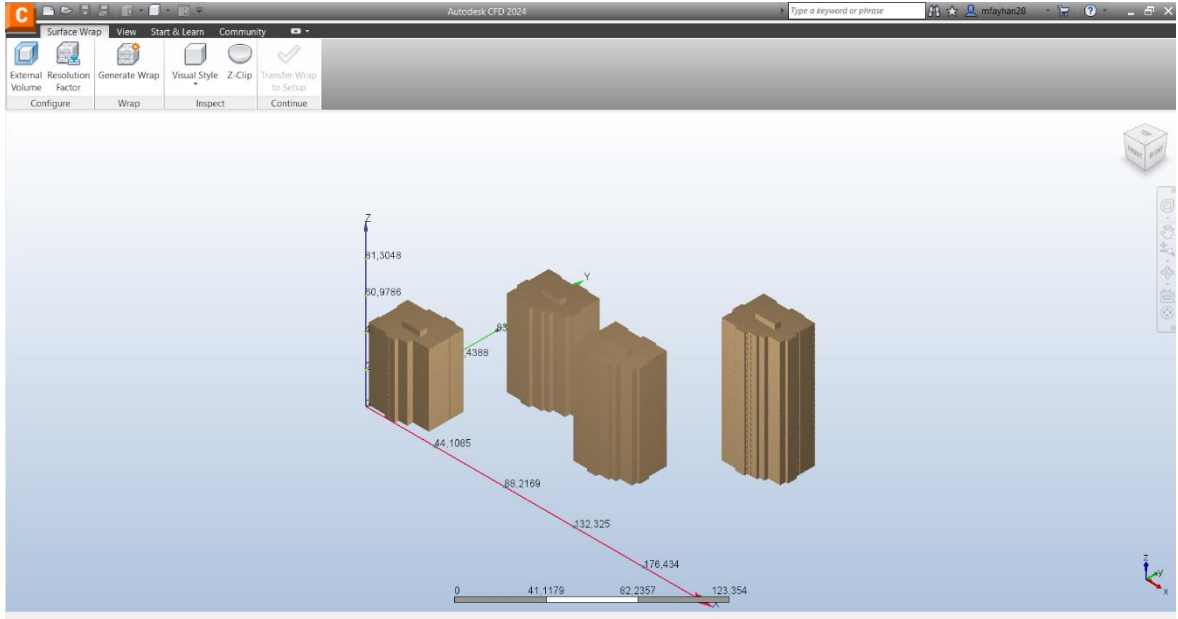
Şekil 39. Autodesk Revit yazılımı aracılığıyla yapı adasındaki 27 katlı A Blok'un modellenmesi



Şekil 40. Autodesk Revit yazılımı aracılığıyla yapı adasındaki tüm yapıların 3 boyutlu olarak modellenmesi

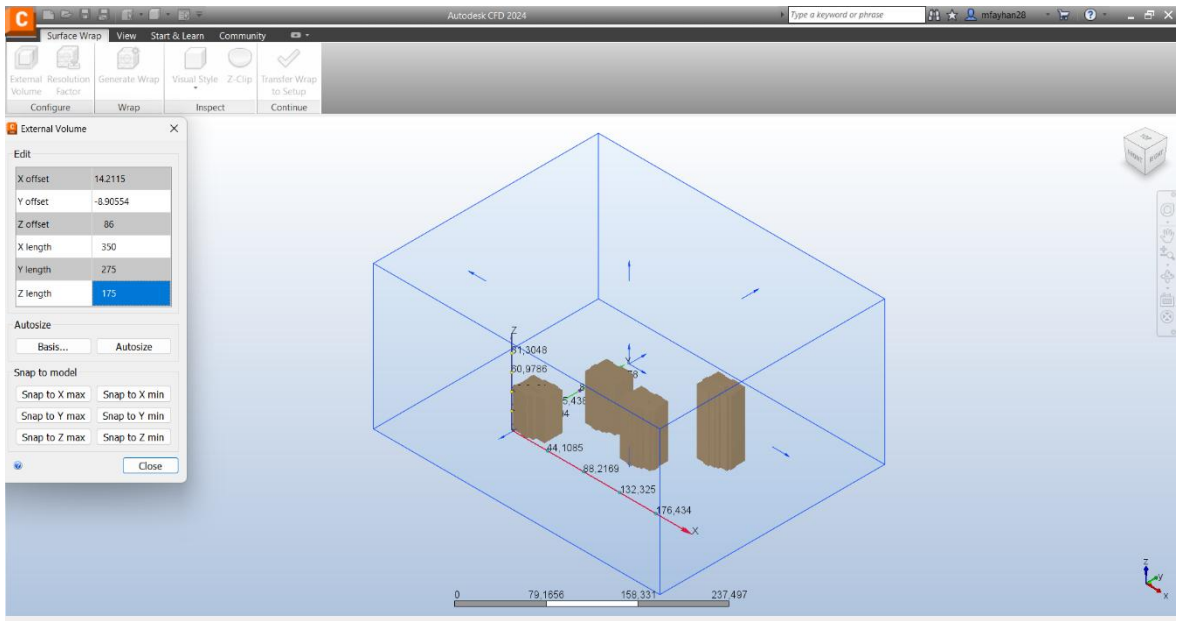
- Çalışma Alanının Sınırlarının Belirlenmesi ve Izgara (Mesh) Oluşturulması

Çalışmanın bu kısmı simülasyon yazılımına girişi kapsamaktadır. Simülasyon yazılımına giriş yapıldıktan sonra kullanıcı arayüzünden yeni proje oluşturulur. Bu kısımda daha önce oluşturulmuş CAD geometrisi yazılıma yüklenir (Şekil 41).



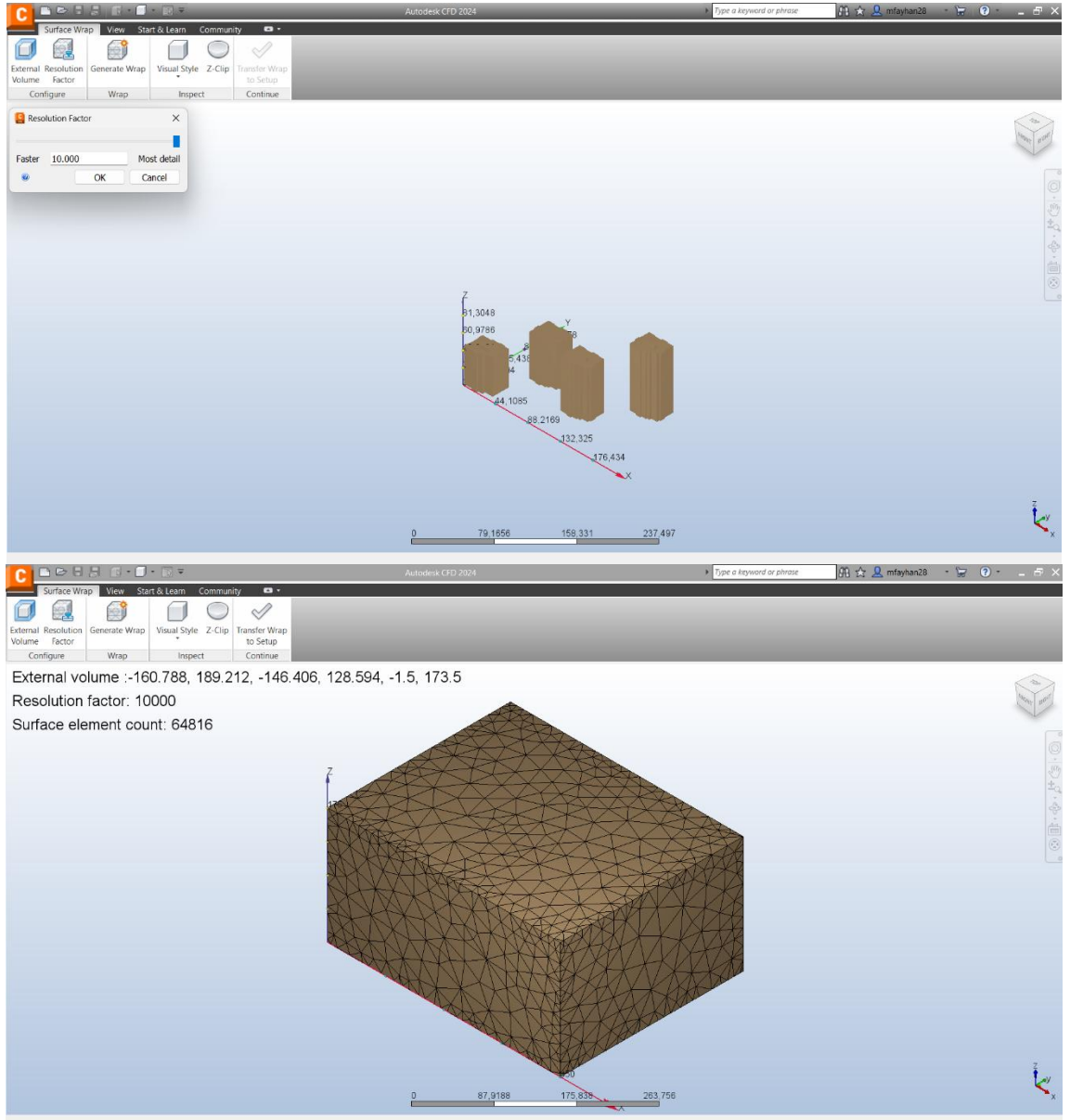
Şekil 41. CAD geometrisinin Autodesk CFD Ultimate yazılımına aktarılması

Daha sonra modelin dışında bir sınır alanı belirlenir. Çalışma alanının sınırı bir rüzgâr tüneli olarak da düşünülebilir. Çalışma alanının büyüklüğü analizde kullanılan sonlu elemanları doğrudan etkileyeceği için işlem süresini değiştirir ve hesaplama gücüne bağlıdır. Bu aşamada işlem gücü ve zaman düşünülerek 350x275x175m (x,y,z) ölçülerinde bir alan seçilmiştir (Şekil 42).



Şekil 42. Simüle edilecek alanın sınırlarının belirlenmesi

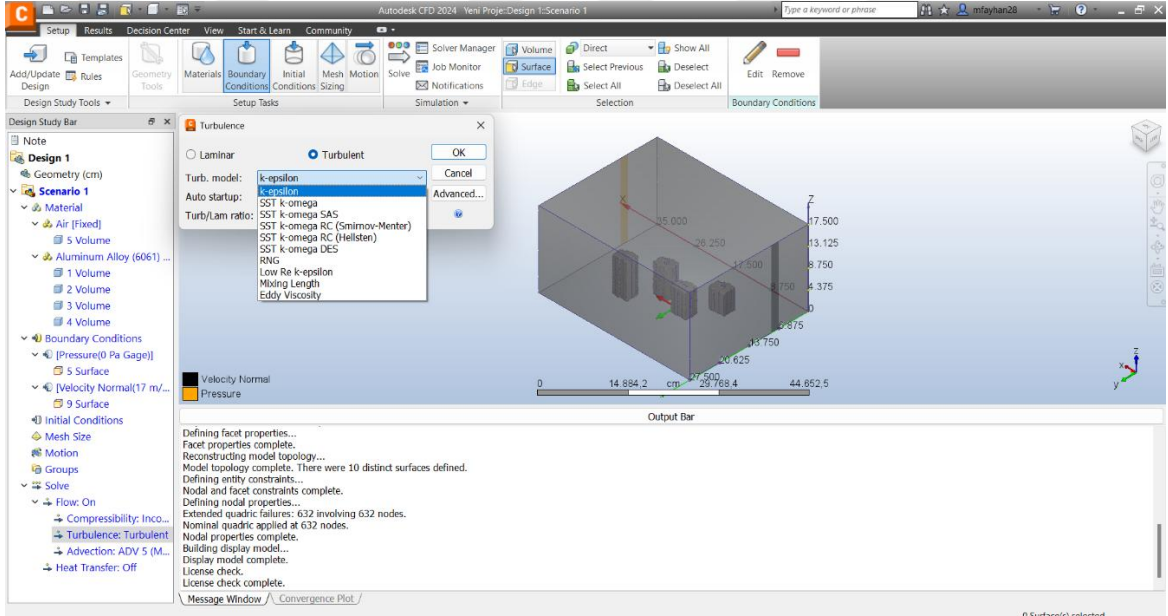
Bu aşamada yapılacak diğer işlem ise ızgara (mesh) çözünürlüğünün belirlenmesidir. Izgara çözünürlüğü yapılacak olan benzetimin sonlu eleman sayısını doğrudan etkilemektedir. Burada düşük çözünürlükte bir ızgarada yapılacak bir benzetimin sonlu eleman sayısı ve işlem süresi düşeceği gibi doğrulama kısmında bazı problemleri beraberinde getirebilmektedir. Aynı şekilde yüksek çözünürlüklü bir ızgarada ise işlem süresi oldukça zaman alacak ve simülasyon sisteminin donanımsal gereksinimleri karşılanmıyorsa zamansal ve finansal açıdan ekonomik olmayacaktır. Çalışma kapsamında en yüksek çözünürlük olan 10.000 değeri seçilmiştir (Şekil 43).



Şekil 43. Izgara çözünürlüğünün belirlenmesi ve ızgara (mesh) oluşturma işlemi

- Malzeme ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Bu aşamada yapının cephesinde kullanılan materyal, çalışma alanındaki hava ve akışkan hızı, basınç gibi sınır koşulları simülasyon aracı üzerinde belirlenir. Bu çalışmada yapıların cephesinde alüminyum kompozit materyal kullanılmıştır. Programa cephe malzemesi olarak bu materyal ve özellikleri girilmiştir. Daha sonra rüzgârın akış yönüne göre rüzgâr hızı (velocity) vektörünün yönü ve büyüklüğü girilmiştir. Çalışma kapsamında yüksek rüzgâr hızları örneklem alındığı ve yapıların bulunduğu bölgede yılda ortalama belirli bir sayıda fırtına oluşumu gözlemlendiği için bu büyüklük 17 m/sn olarak belirlenmiştir. Diğer sınır koşulu olan basınç (pressure) akışkanın karşı yönünde 0 Pa olarak belirlenmiştir (Şekil 44).



Şekil 44. Simülasyon aracı üzerinde sınır koşulları, materyallerin, akış tipi ve türbülans modelinin belirlenmesi

- Akış Tipi ve Türbülans Modelinin Belirlenmesi

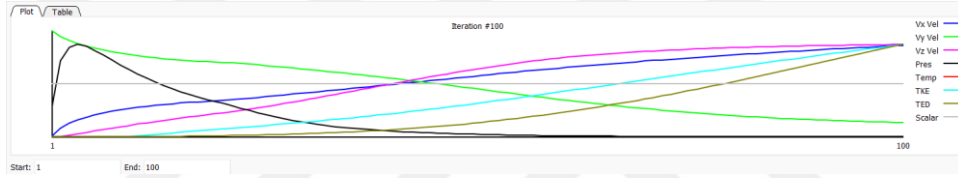
Bir akışkanın bir boru içinde oluşturduğu akış tiplerini laminar, türbülanslı ve geçişli olmak üzere üç sınıfta inceleyebiliriz. Fakat burada bahsedilen laminar akış genellikle sıvılarda görülürken türbülanslı akışı rüzgârın veya havanın akış hareketine benzetebiliriz. Dolayısıyla dış ortamda bir yapının çevresinde oluşan akış tipi türbülanslı akış olarak nitelendirilebilir. Çalışmada literatürdeki diğer vaka tabanlı çalışmalardan yola çıkılarak standart k-ε ve RNG k-ε türbülans modelleri kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

- Simülasyon Süreci

Simülasyon süreci kullanılan simülasyon sisteminin işlem gücüne (donanımsal özelliklerine), simülasyondaki sonlu eleman kümesine, simülasyonun ızgara (mesh) çözünürlüğüne, çalışma alanının boyutuna ve CAD geometrisinin karmaşıklığına göre zamansal ve finansal farklılıklar gösterebilmektedir.

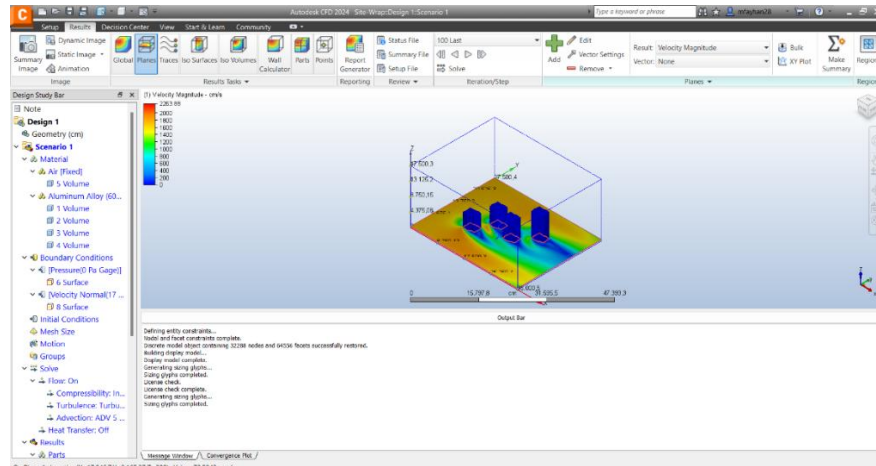
- Analiz Sonuçlarının Elde Edilmesi

Simülasyon süreci tamamlandıktan sonra analiz sonuçları görsel olarak oluşturulabilir. Sonuçlar görselleştirilirken rüzgâr hızı, basınç vb. parametreler için tablolar oluşturulabildiği gibi rüzgâr akışını belirli düzlemlere (planes) yansıtarak gözlemlemek de mümkündür (Şekil 45).



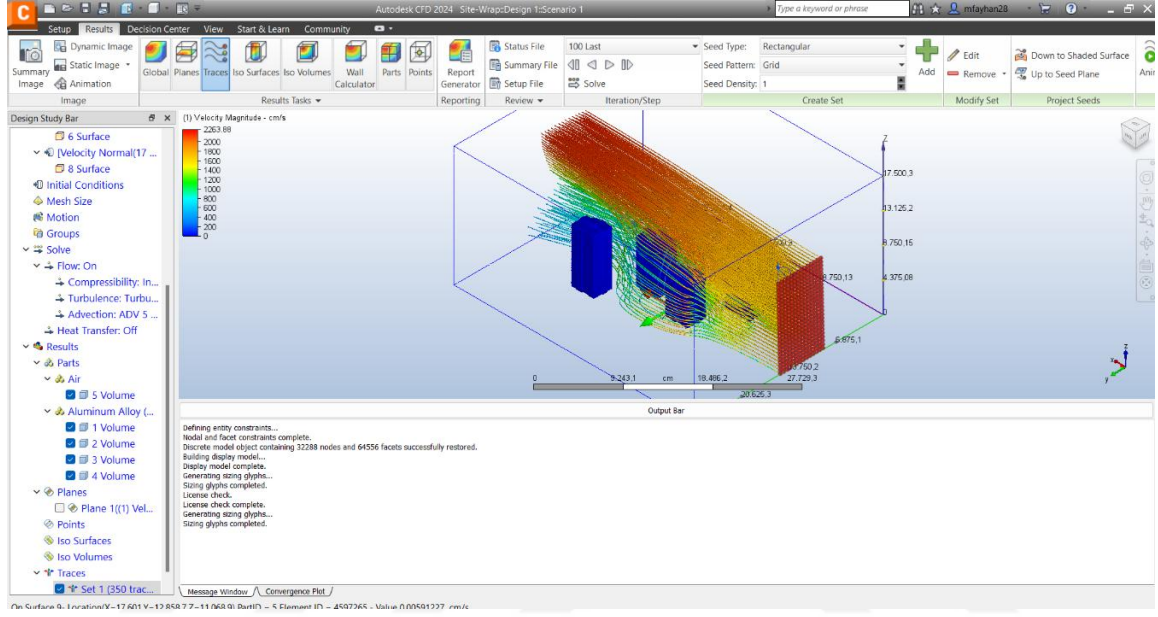
Şekil 45. Rüzgâr hızı vektörleri, basınç, sıcaklık gibi parametrelerin simülasyon sürecindeki değişkenliği

Örneğin; yapı çevresinde yay seviyesindeki rüzgâr konforunu araştıran bir çalışmacı z ekseninde yaya seviyesinde bir düzlem oluşturup akış hızının yüksek olduğu bölgeleri ve tehlikeli olabilecek noktaları belirleyebilir (Şekil 46).

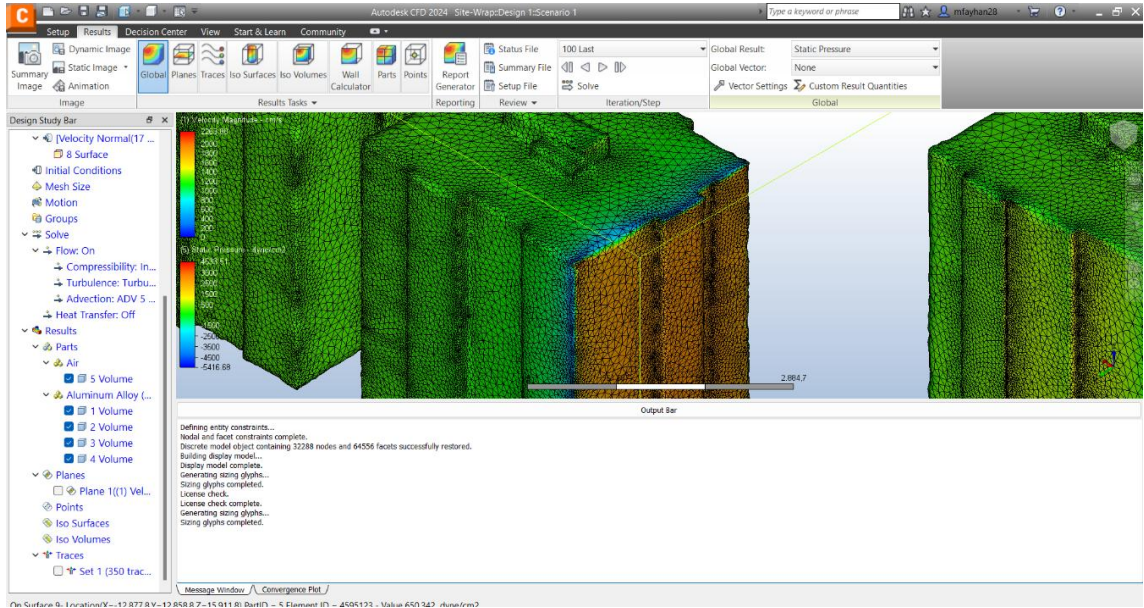


Şekil 46. Yapılan rüzgâr akış simülasyonunda z ekseninde düzlem (plane) aracı kullanılarak yaya seviyesi rüzgâr hız vektörlerinin incelenmesi

Bunun yanı sıra yapının çevresinde oluşacak rüzgâr kuvvetlerini-izleri (traces) aracıyla oluşturmak da mümkündür. Aynı zamanda oluşturulan bu izlerin (traces) zamana bağlı olarak hareketi gözlemlenip animasyon aracıyla akış animasyonu elde edilme imkânı mevcuttur (Şekil 47). Ayrıca yapılarda oluşturulan ızgaralar ve cephelere etki eden statik rüzgâr basıncı gibi değerler de burada görüntülenebilir (Şekil 48).



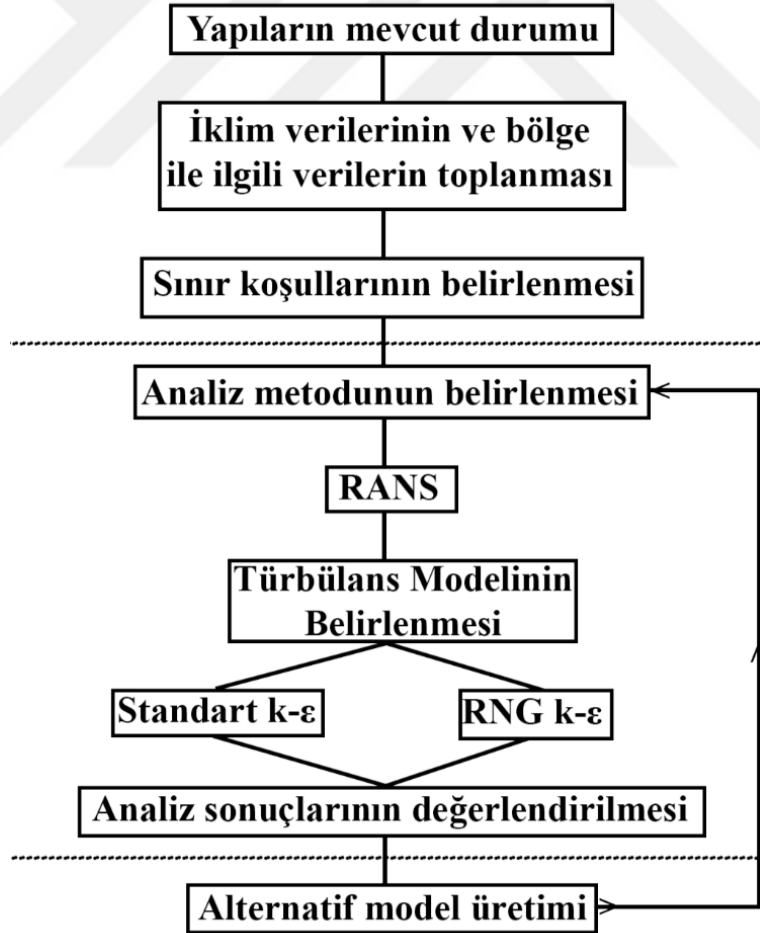
Şekil 47. Autodesk CFD Ultimate'de iz (traces) aracı kullanılarak yapıların çevresinde oluşan akış hız (velocity) vektörlerinin görselleştirilmesi



Şekil 48. Yapıların üzerinde oluşan statik basınç ve yapıların ızgara (mesh) görünümü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere geometrisi CAD ortamında oluşturulan, sınır koşulları belli, analiz metodu ve analizde kullanılacak türbülans modeli belirtilen mevcut yapının yapılan HAD analizi sonuçlarına yer verilecektir. Öncelikle mevcut yapı konfigürasyonunun kuzey (N) ve batı (W) yönünde 17 m/s hızdaki akışkanla etkileşimi, rüzgâr hızı ve cephelerde oluşan statik basınç verileri ele alınacaktır. Ardından birinci alternatif model olarak oluşturulan yapıların kat sayıları ve yükseklikleri düşürülerek oluşturulan model aynı sınır koşulları ve şartlarda analiz edilmiştir. Bundan sonraki adımda ise ikinci alternatif model olarak çevre ile uyumlu, aerodinamik açıdan iyileştirilmiş ve olabildiğince optimize edilmiş bir alternatif model sunmak amaçlanmıştır.



Şekil 49. Mevcut tasarımın ve alternatif modellerin analizinde takip edilecek adımlar

Çalışma kapsamında listede verilen simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Analizlerin sonlu eleman, ızgara (mesh) ve düğüm sayıları gibi diğer bilgiler yanlarında yer almaktadır.

1. Mevcut Yapıların Analizi

- a. Mevcut yapıların kuzey (N) yönlü rüzgâr ile etkileşimi [350m, 275m, 175m (x,y,z), 876.663 akışkan düğümü (nodes), 265.891 katı düğümü, 1.142.524 toplam düğüm, 4.760.001 akışkan sonlu elemanı (elements), 1.953.977 katı sonlu elemanı, 6.713.978 toplam sonlu eleman]
- b. Mevcut yapıların batı (W) yönlü rüzgâr ile etkileşimi [350m, 275m, 175m (x,y,z), 876.883 akışkan düğümü, 265.115 katı düğümü, 1.141.948 toplam düğüm, 4.760.987 akışkan sonlu elemanı, 1.949.851 katı sonlu elemanı, 6.710.568 toplam sonlu eleman]
- c. Mevcut yapılara etki eden statik basınç kuvvetleri

2. Birinci Alternatif Modelin Analizi

- a. Birinci alternatif modelin kuzey (N) yönlü rüzgâr ile etkileşimi [350m, 275m, 125m (x,y,z) 592.547 akışkan düğümü, 174.702 katı düğümü, 767.249 toplam düğüm, 3.214.008 akışkan sonlu elemanı, 1.286.677 katı sonlu elemanı, 4.500.685 toplam sonlu eleman]
- b. Birinci alternatif modelin batı (W) yönlü rüzgâr ile etkileşimi [350m, 275m, 125 m (x,y,z), 592.864 akışkan düğümü, 174.270 katı düğümü, 767.134 toplam düğüm, 3.214.940 akışkan elemanı, 1.283.496 katı elemanı, 4.498.436 toplam sonlu eleman]
- c. Birinci alternatif modele etki eden statik basınç kuvvetleri

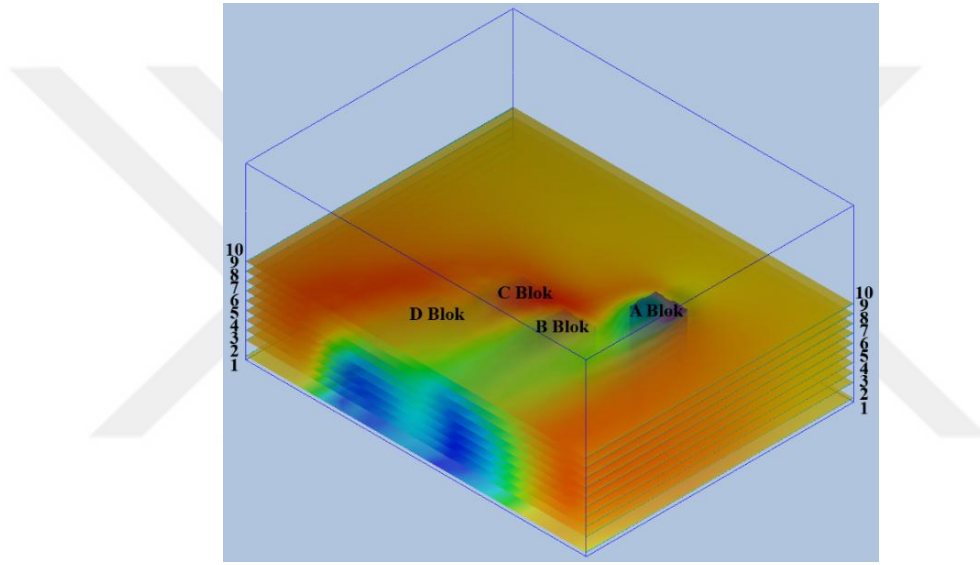
3. İkinci Alternatif Modelin Analizi

- a. İkinci alternatif modelin kuzey (N) yönlü rüzgâr ile etkileşimi [350m, 300m, 100m (x,y,z), 289.488 akışkan düğümü, 42.820 katı düğümü, 332.308 toplam düğüm, 1.563.753 akışkan sonlu elemanı, 350.088 katı sonlu elemanı, 1.913.841 toplam sonlu eleman]
- b. İkinci alternatif modelin batı (W) yönlü rüzgâr ile etkileşimi [350m, 300m, 100m (x,y,z), 289.826 akışkan düğümü, 43.042 katı düğümü, 332.868 toplam düğüm, 1.565.982 akışkan sonlu elemanı, 351.594 katı sonlu elemanı, 1.917.576 toplam sonlu eleman]
- c. İkinci alternatif modele etki eden statik basınç kuvvetleri

3.1. Mevcut Yapıların Analizi

Bu bölümde daha önceki bölümlerde HAD simülasyonuna hazır hale getirilen ve sınır koşulları belirlenen yapılar analiz edilmiştir. Simülasyonlar aynı hızda akışkan altında yapılmış olup yapıların kuzey (N) ve batı (W) yönündeki rüzgâr ile etkileşimini ve aerodinamik performansını irdelemektedir. Analiz sonuçları iki farklı türbülans modeli ile birlikte tablolştırılmış olup sırasıyla sonuçlar ele alınacak ve irdelenecektir.

3.1.1. Mevcut Yapıların Kuzey (N) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi

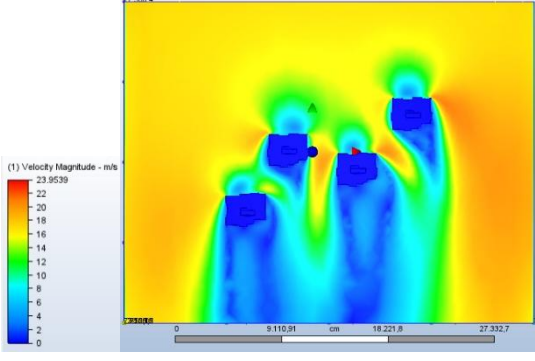
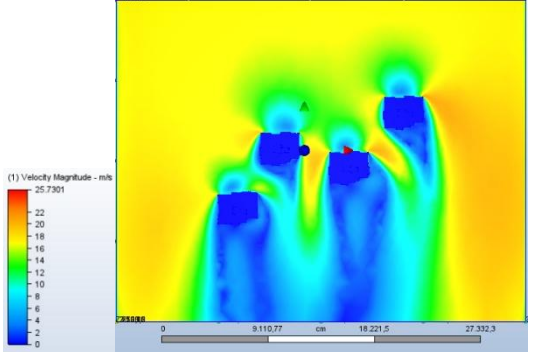
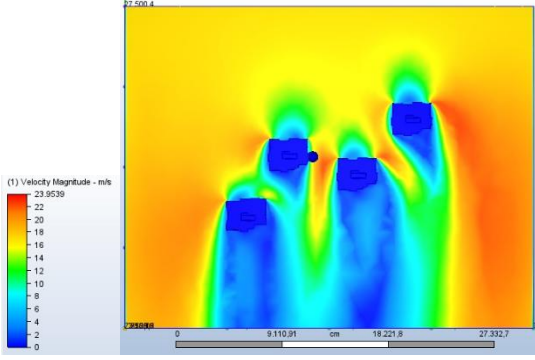
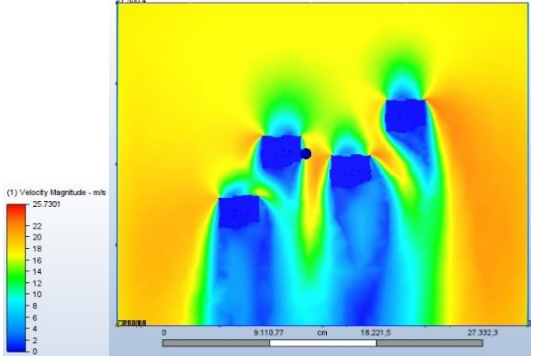


Şekil 50. Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları

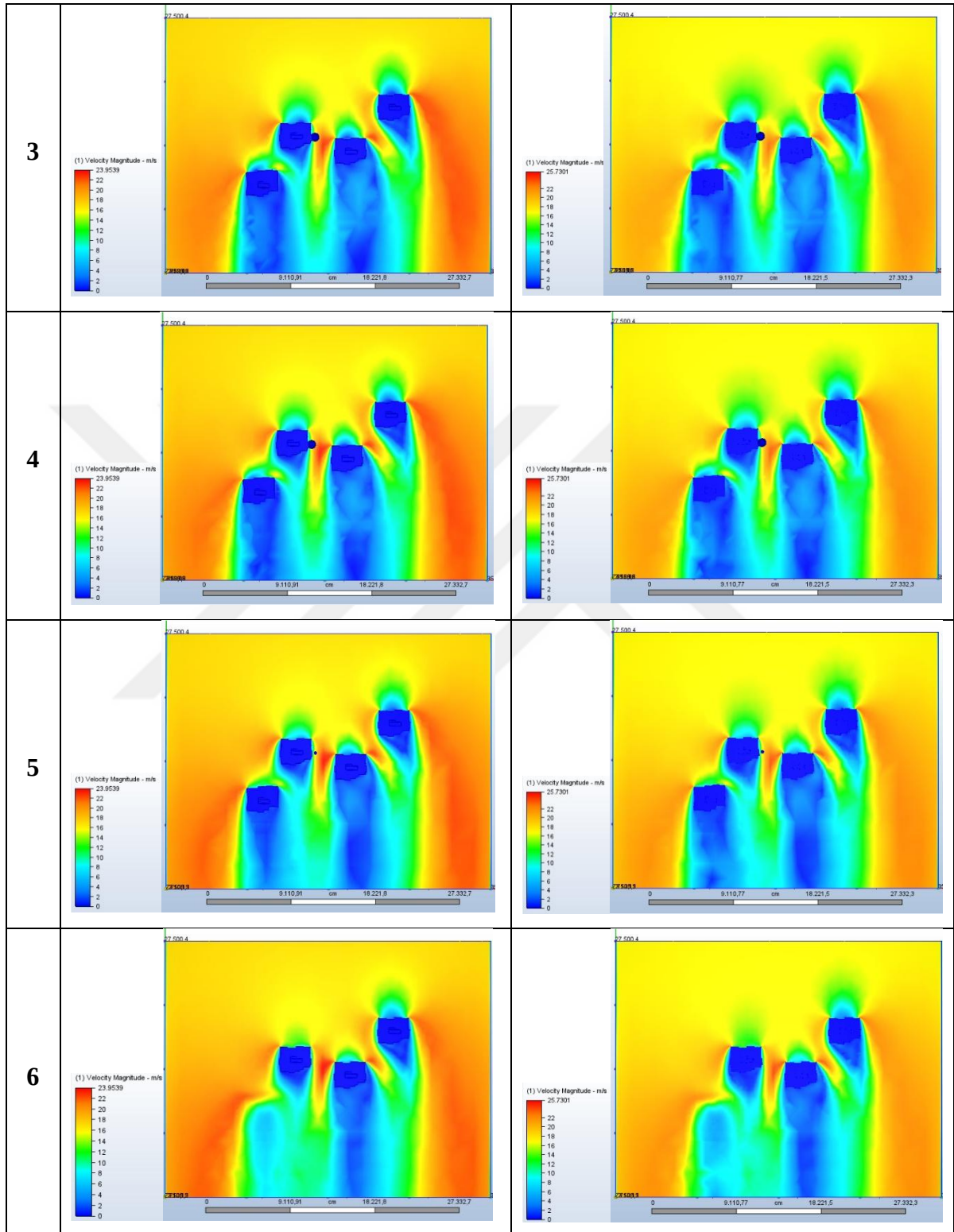
Şekil 50’de verilen şemada mevcut yapıların kuzey yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren yatay (x-y) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 8 metre aralıklarla oluşturulmuştur (yaya seviyesinden geçen kesit zeminden 1,5 m yükseklikte). Bu kesitler sırasıyla Tablo 9’da verilmiştir. Tablo 9’da 1. katman yaya seviyesi rüzgâr akışını temsil etmektedir. Bu katmanda görüldüğü üzere çalışma alanındaki D Blok, C Blok’un iz bölgesinde (wake) kalmaktadır. Dolayısıyla D Blok’un kuzey cephesindeki rüzgâr davranışını kısmen belirlemektedir. 5. katmana kadar bu etki net biçimde kendini göstermektedir. D Blok ve B Blok’un arkasında çok geniş bir iz bölgesi oluşurken bu bölgede rüzgâr hızı düşüken girdap oluşumu görülmekte ve akışkan davranışı kararsızdır. A, B ve C Blok yapıları arasındaki mesafe az olduğu için birbirlerini etkilemekte ve aralarında rüzgâr hızının hızlı bir değişim gösterdiği gradyan (gradient) bölgesi

oluşturmuştur. Burada iki yapı arasında yatayda bir çizgi çizildiğinde bu çizgi üzerinde hareket eden bir yayanın sırasıyla 2-4-8-16-20 m/s gibi değişken hızlarda rüzgâr akışına maruz kalacağı öngörülebilmektedir. Aynı zamanda D Blok'tan A Blok'a doğru doğru yönünde hareket eden bir yaya veya havadaki bir cisim çok değişken rüzgâr hızlarına maruz kalmaktadır. A, B, C, D Bloktaki yapıların her yükseklikte kuzeye bakan cephedeki köşelerinde gradyan düzeyi yüksektir. Çatıda ve cephedeki bu ayrılma bölgeleri köşeli bir yapıya sahip olduğu için aerodinamik açıdan dezavantaj barındırmakta ve yüzeye çarpan rüzgâr hızını artırmaktadır. Ayrıca yapıda zeminden üst katlara doğru gidildikçe (katman numarası yükseldiğinde) yüksek hızlı rüzgârın yapının cephelerine yaklaştığı ve bu bölgelerde gradyan oluşturduğu gözlemlenmektedir. Örnek; A Bloktaki yapının zemin katındaki cephe elemanının maruz kaldığı rüzgâr hızı (1. katman), çatı katına yakın bölgedeki (9. katman) cephe elemanına göre daha düşüktür. Aynı zamanda zemin kattaki cephe elemanının yüksek rüzgâr hızı bölgesine uzaklığı da çatı katındaki elemene göre daha fazladır. Yapıda yüksek katlara çıkıldıkça birim mesafedeki rüzgâr hızı değişimi (gradyan düzeyi) alt katlara göre daha fazladır.

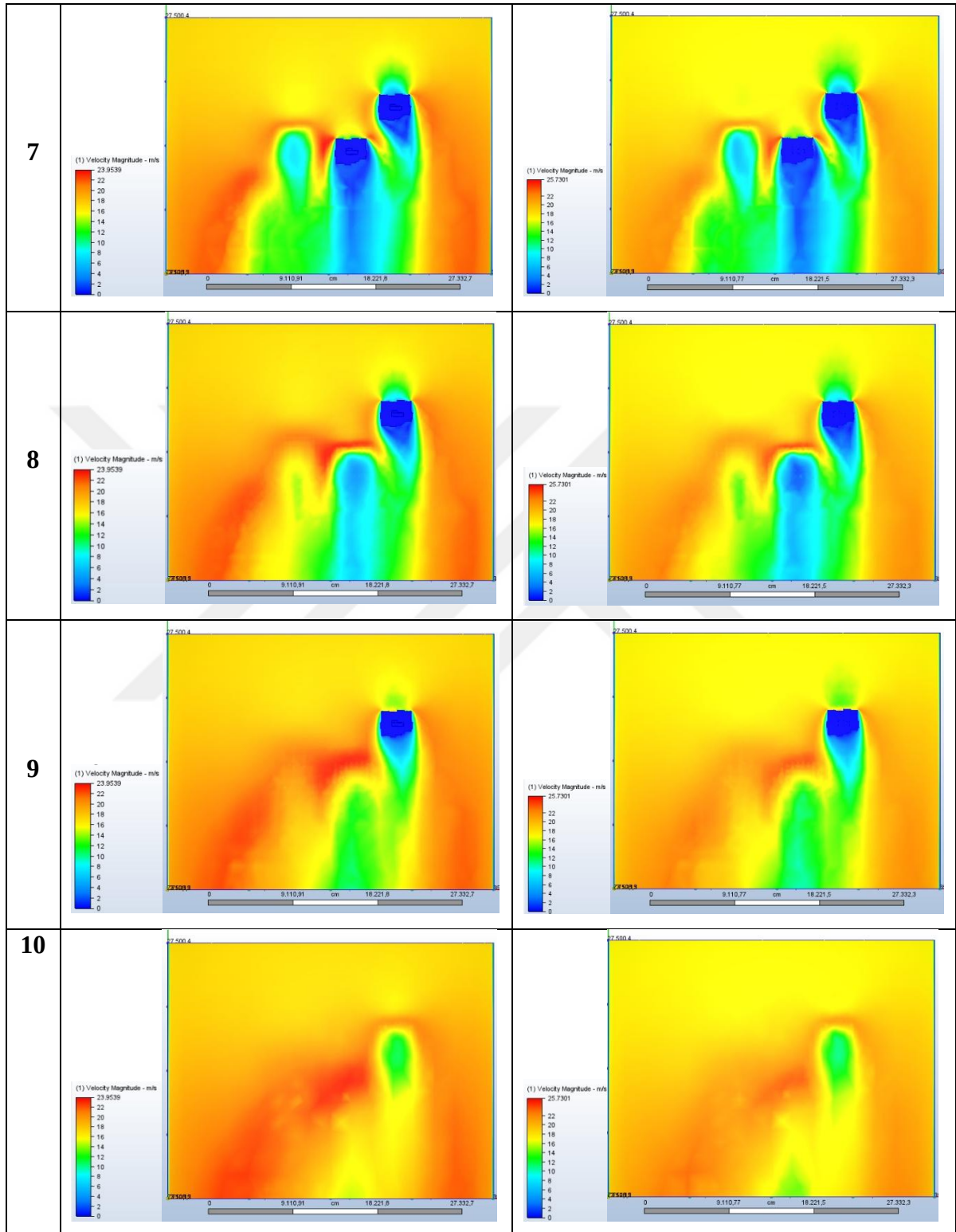
Tablo 9. Kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y)

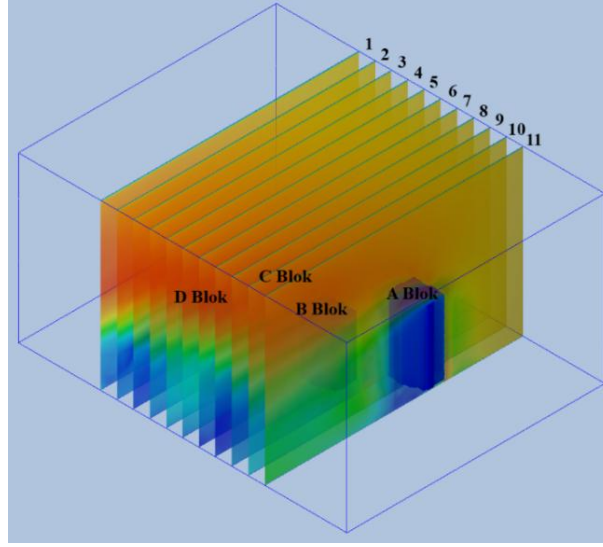
No	Standart k-ε Türbülans Modeli	RNG k-ε Türbülans Modeli
1		
2		

Tablo 9'un devamı



Tablo 9'un devamı





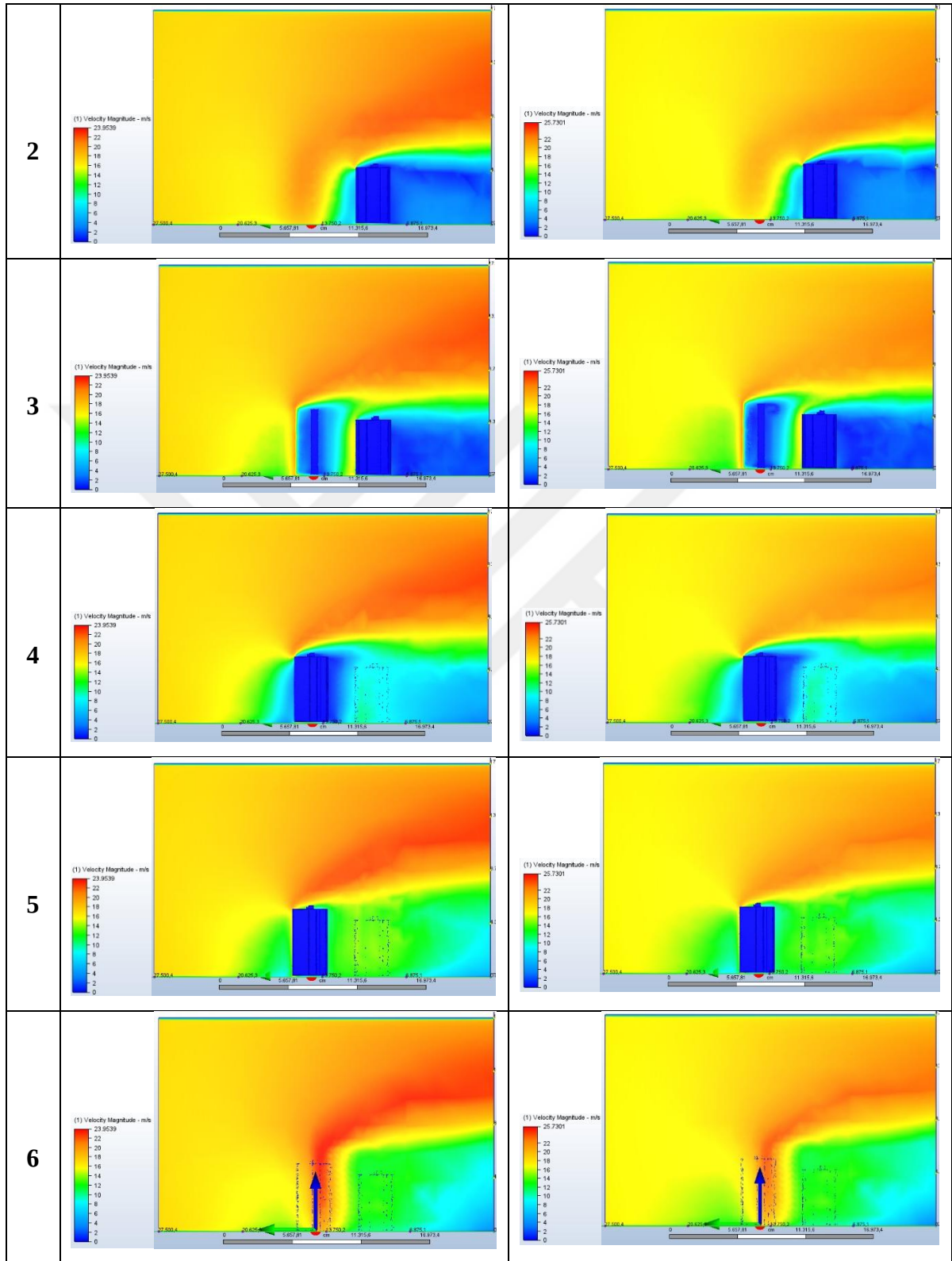
Şekil 51. Analiz sonuçlarından y-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları

Şekil 51’de verilen şemada mevcut yapıların kuzey yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren düşey (y-z) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 15 m aralıklarla oluşturulmuştur. Kesitler sırasıyla Tablo 10’da verilmiştir. Tablo 10’da 1. katmandan başlayarak sırasıyla D, C, B, A bloktaki yapıların rüzgâr ile etkileşimi düşey kesitler ile aktarılmıştır. 1. ve 2. katman D Blok’un rüzgâr ile etkileşimini ve yapının arkasında bir iz bölgesi (wake) oluşumunu gösterir. 4. katmanda D Blok’un etkisi azalırken C Blok’un hem ön hem de arka cephesinde wake alanı oluştuğu ve iki yapının arasında yatayda gradyan (değişim) seviyesi yüksek bir bölge oluştuğu gözlemlenmiştir. 6. katmanda C ve B Blok’un arasındaki bölge 7. ve 8. Katmanlarda B Blok’un akış davranışı, 9. Katmanda en yüksek katlı yapı olan A Blok’un önünde ve arkasında gradyan bölge oluşmaktadır. 10. Katmanda B Blok’un A Blokla oluşturduğu etkileşim yapının arkasında yer almaktadır.

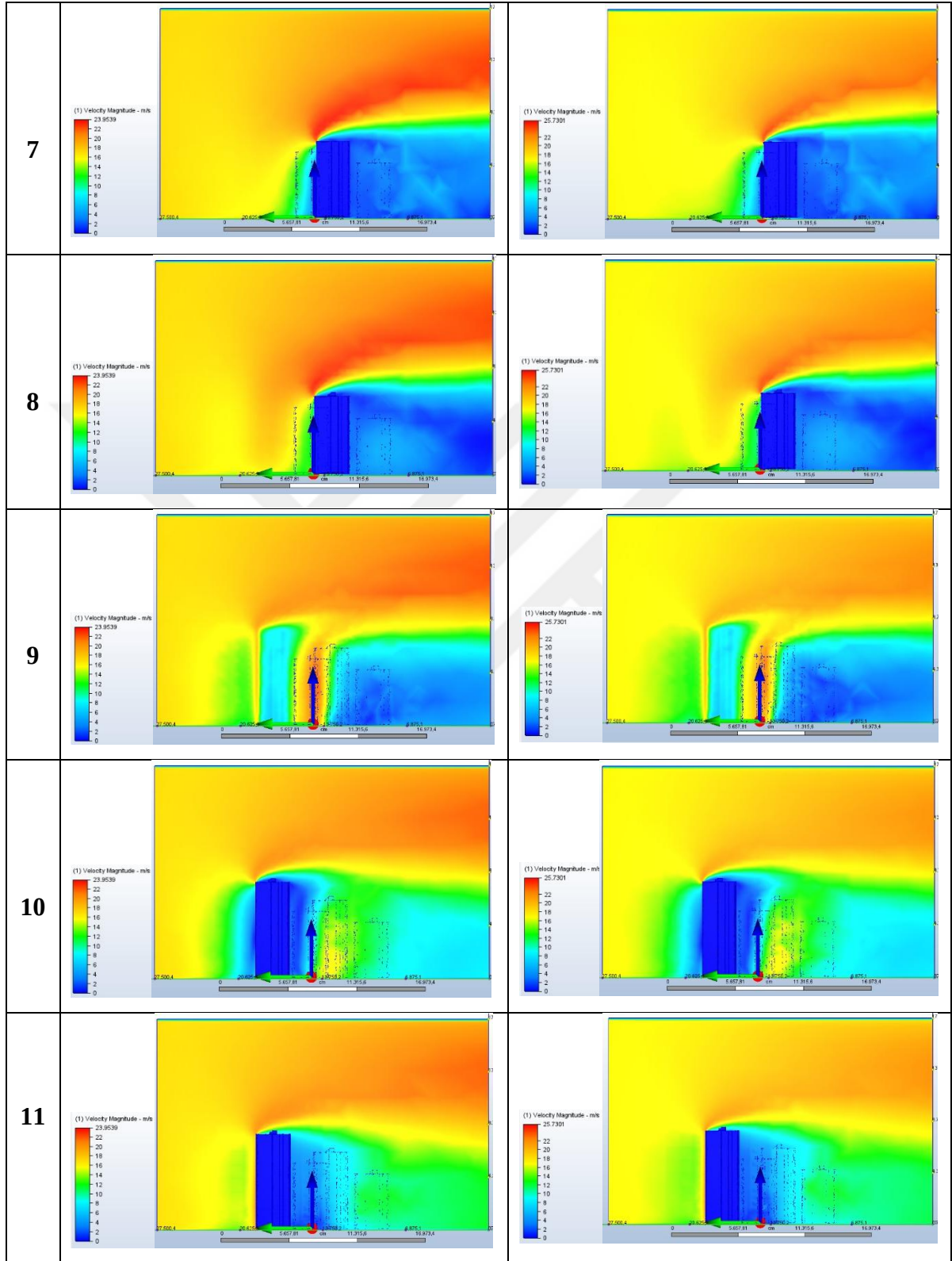
Tablo 10. Kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (y-z)

No	Standart k-ε Türbülans Modeli	RNG k-ε Türbülans Modeli
1		

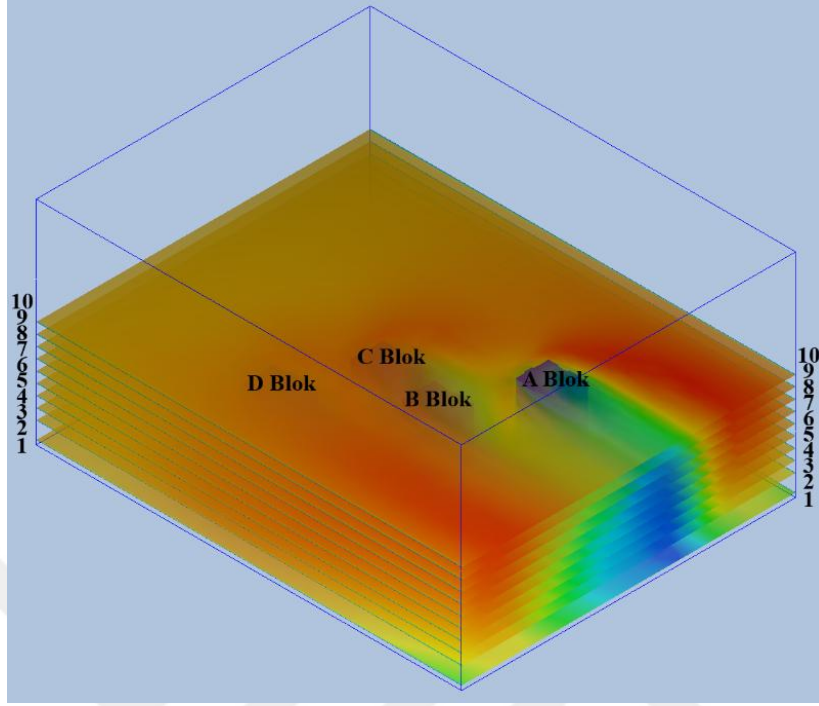
Tablo 10'un devamı



Tablo 10'un devamı



3.1.2. Mevcut Yapıların Batı (W) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi



Şekil 52. Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları

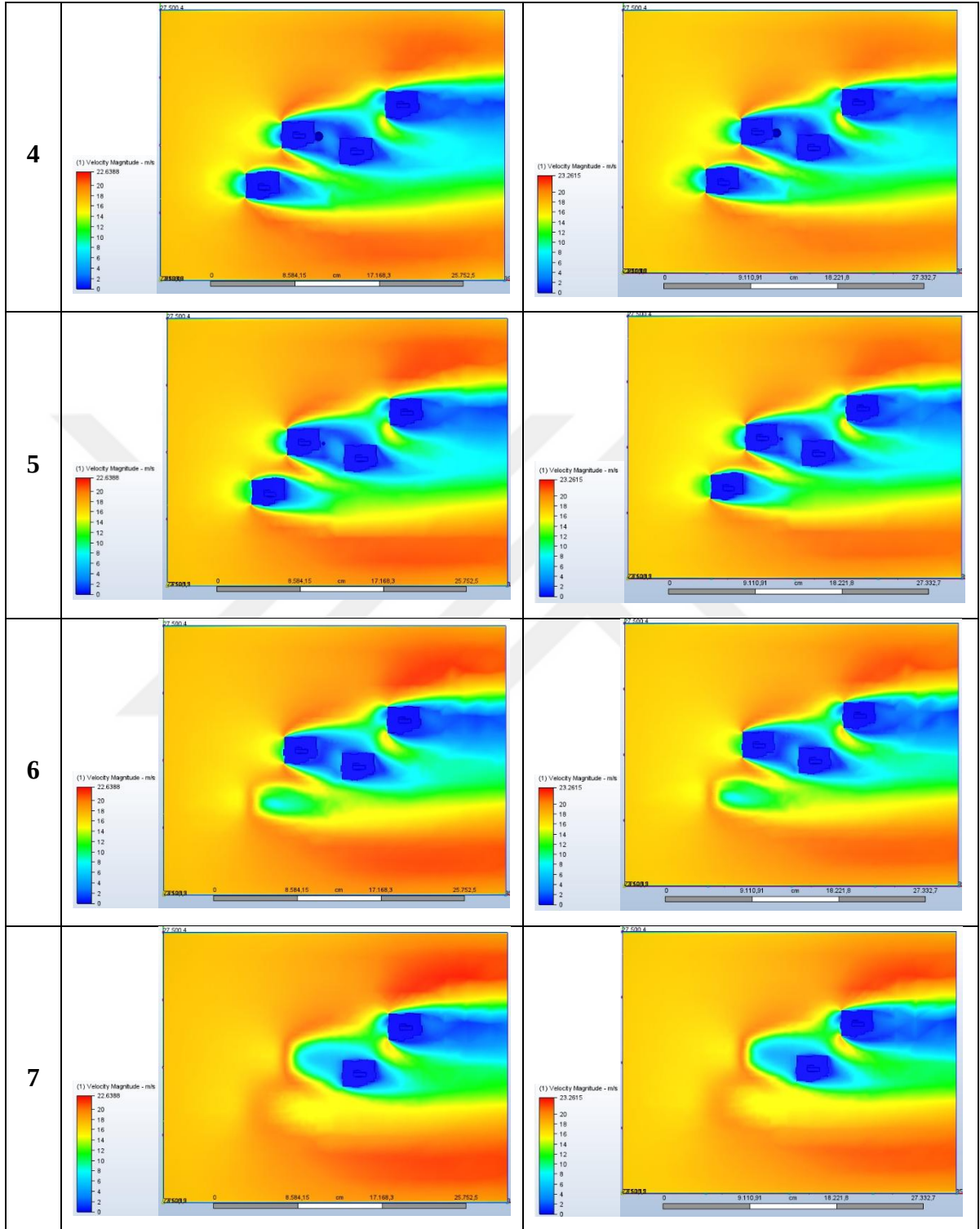
Şekil 52’de verilen şemada mevcut yapıların batı yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren yatay (x-y) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 8 m aralıklarla oluşturulmuştur (yaya seviyesinden geçen kesitin zeminden yüksekliği 1,5 m). Bu kesitler sırasıyla Tablo 11’de verilmiştir. Tablo 11’de 1. katman yaya seviyesi rüzgâr akışını temsil etmektedir. Bu katmanda görüldüğü üzere çalışma alanındaki B Blok, C Blok’un iz bölgesinde (wake) kalmaktadır. Bu bölgede genel olarak rüzgâr akış hızı düşüken sonraki katman görsellerinden anlaşıldığı üzere bu bölgede girdap oluşumu ve düzensiz (kararsız) bir akış söz konusudur. Dolayısıyla C Blok’a çarpan rüzgâr akışının B bloktaki sakinleri olumlu (daha az rüzgâra maruz kalma) veya olumsuz anlamda (kirletici dağılımı) etkileyebilir. Bir diğer konu ise bu iz bölgesinde kendi içinde hava sirkülasyonu gerçekleşmesidir. Ayrıca yaya seviyesinden başlamak üzere C ve D blok arasındaki bölgede gradyan (gradient) düzeyi yüksektir. Bunun anlamı o bölgede çizgisel olarak hareket eden birisinin sürekli olarak farklı rüzgâr hızındaki akışkanlara maruz kalmasıdır. Örneğin; D Blok’tan C Blok’a doğru hareket eden bir yaya birkaç adımda sırasıyla 1-2-4-8-12-14-16-20-22 m/s hızlı rüzgarlara maruz kalabilir. Aynı şekilde A, C, D Bloktaki yapıların her yükseklikte batıya bakan cephedeki köşelerinde de gradyan düzeyi yüksektir. Bu bölgeler köşeli bir hatta

sahip olduğu için aerodinamik açıdan dezavantaj oluşturur ve yüzeye çarpan rüzgâr hızını artırmaktadır. Bu bölgelerde yürüyen bir yayanın çok kısa mesafelerde çok yüksek rüzgâr değişimlerine maruz kalacağı için yüksek rüzgâr hızı olan günlerde denge sorunları yaşayabilmesi olasıdır. Yapıların güney cephesindeki kademeli hareket rüzgâr akışını aerodinamik biçimde yönlendirebildiği için aerodinamik açıdan yapının güney cephesini daha iyi hale getirmektedir. Tablo 11’ de dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise 6,7,8 ve 10 numaralı katmanlarda yapılar görünmese bile yapıların çatısından aşırılan rüzgârın etkisinin devam etmesi ve çatının rüzgâr akış hızını artırdığı için bu bölgelerde gradyan oluşumunun gözlemlenmesidir.

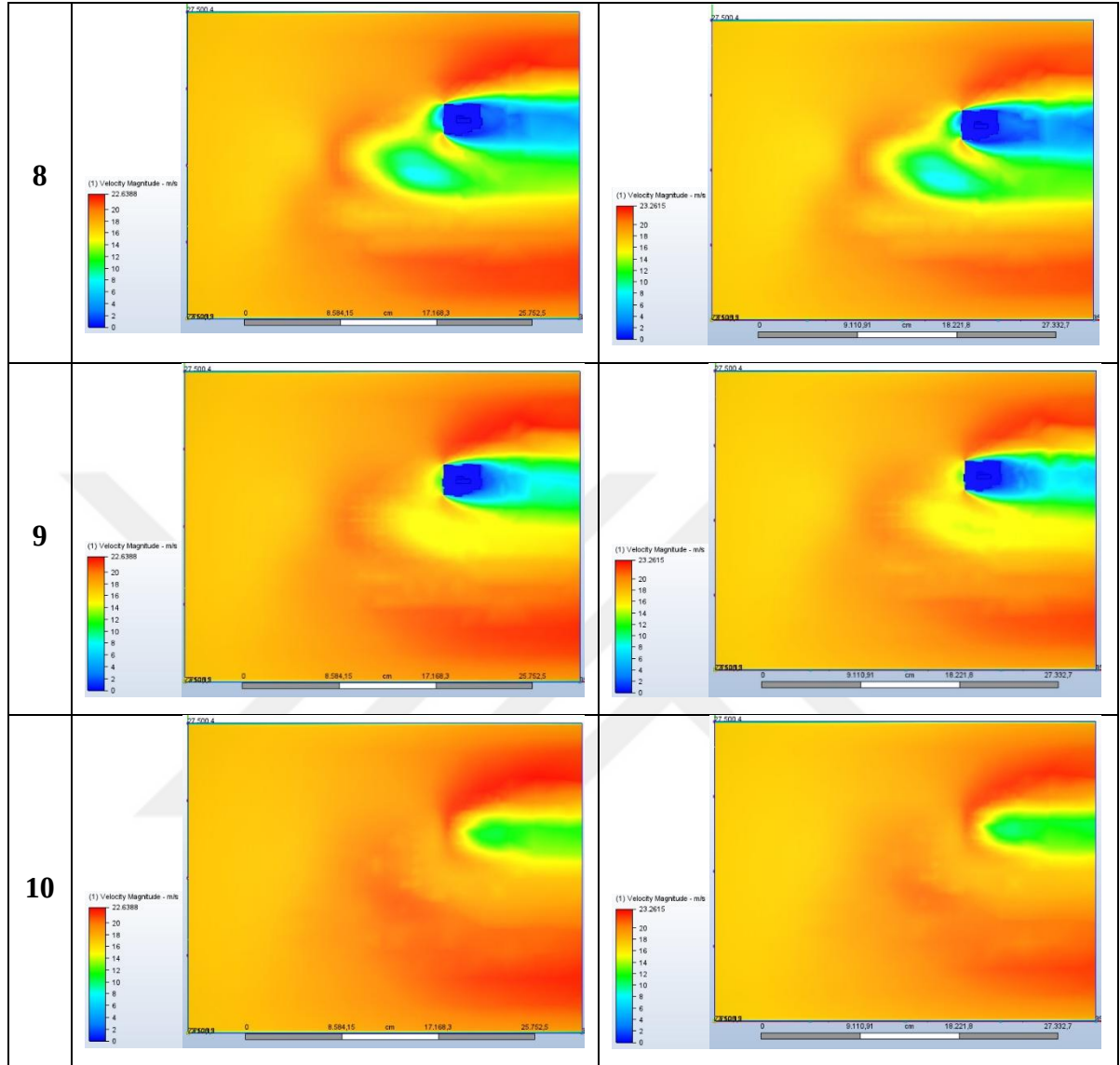
Tablo 11. Batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y)

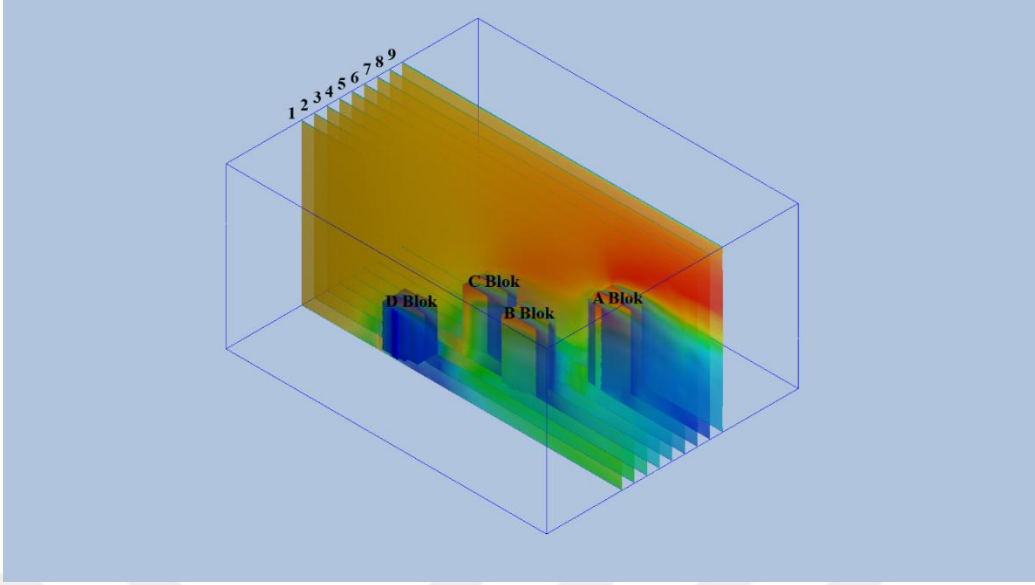
No	Standart k-ε Türbülans Modeli	RNG k-ε Türbülans Modeli
1		
2		
3		

Tablo 11'in devamı



Tablo 11'in devamı

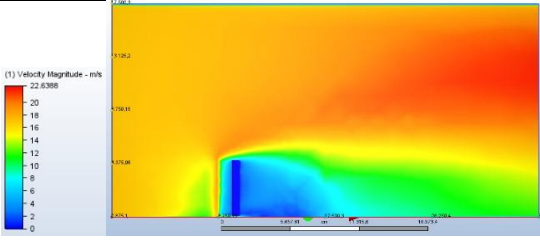
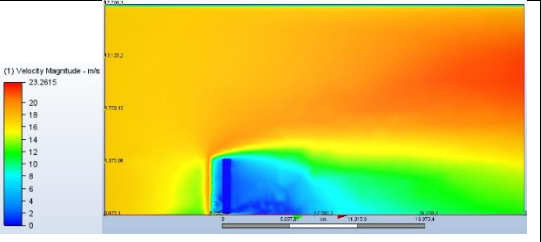
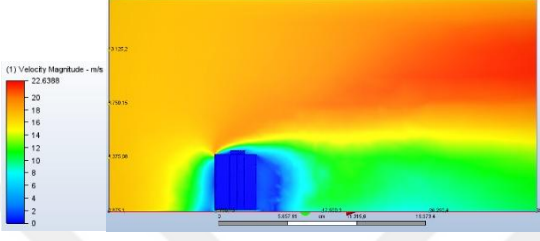
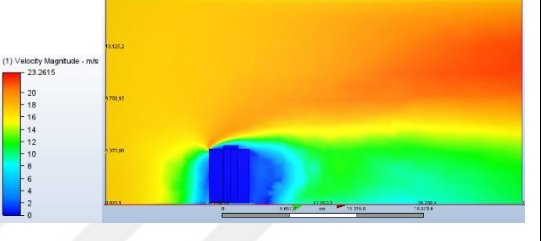
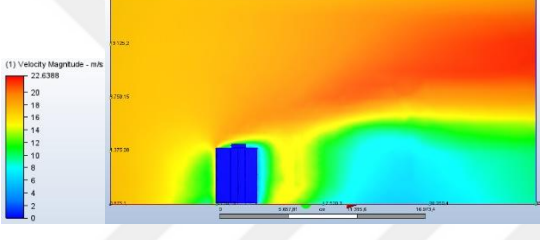
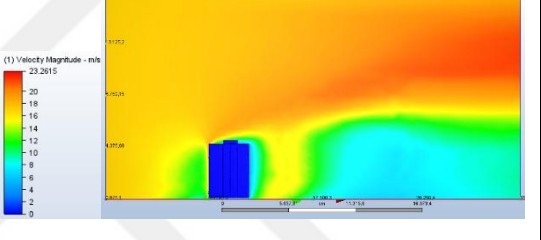
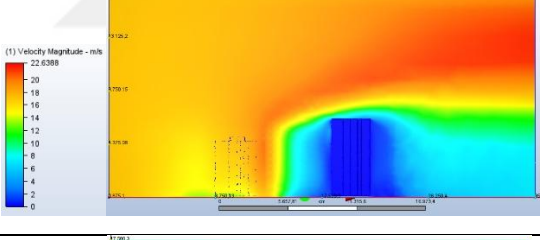
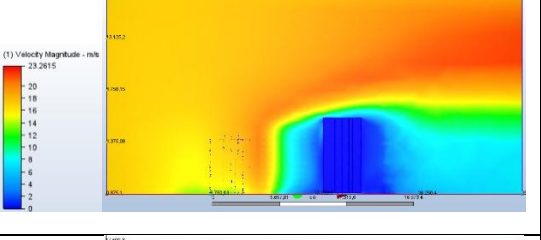
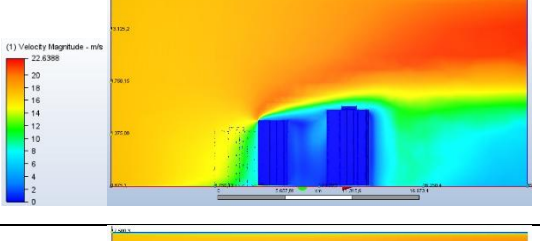
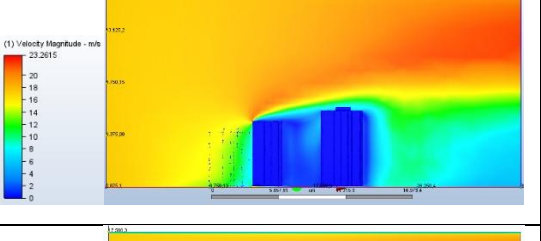
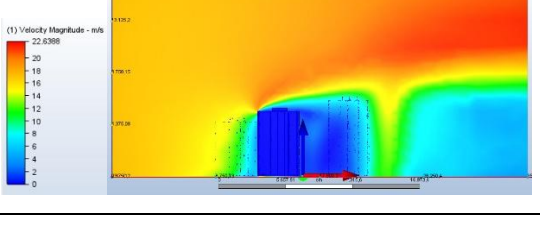
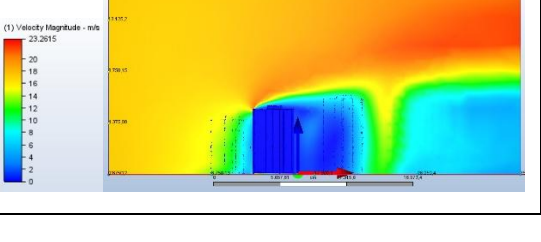




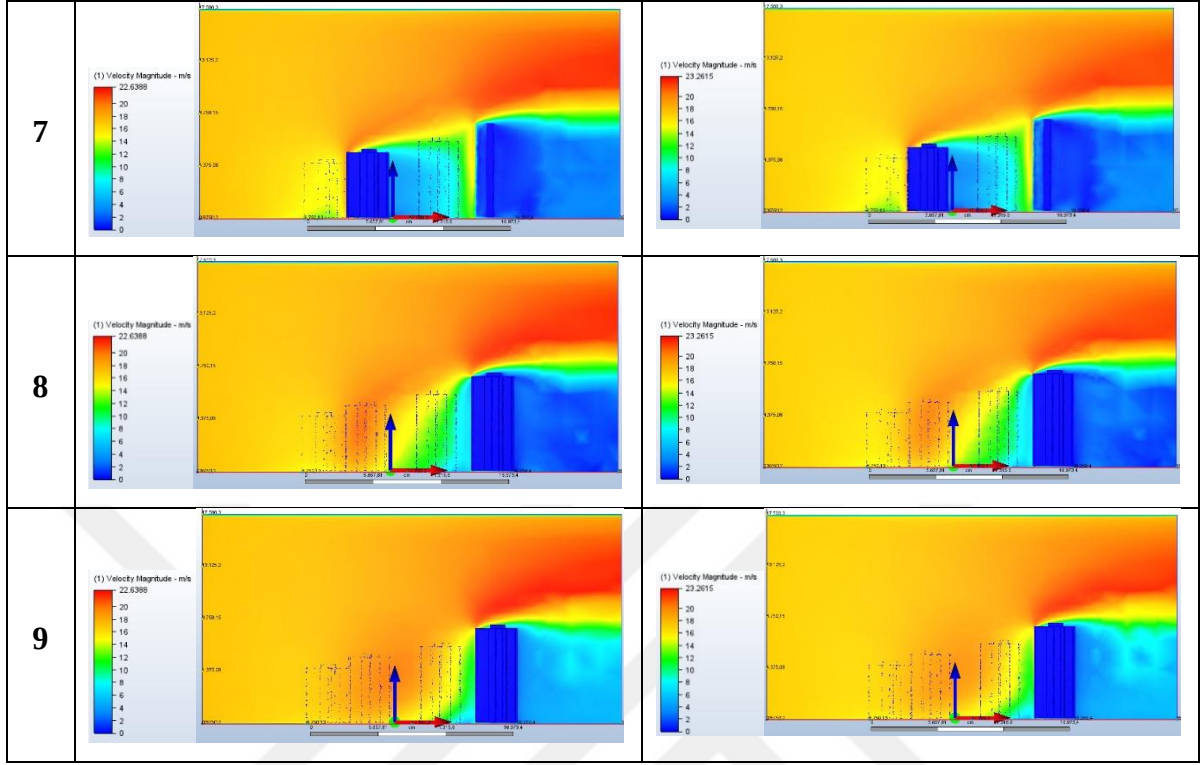
Şekil 53. Analiz sonuçlarından x-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları

Şekil 53'te verilen şemada mevcut yapıların batı yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren düşey (x-z) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 15 m aralıklarla oluşturulmuştur. Kesitler sırasıyla Tablo 12'de verilmiştir. Tablo 12'de 1. katmandan başlayarak sırasıyla D, B, C, A bloktaki yapıların rüzgâr ile etkileşimi düşey kesitler ile aktarılmıştır. 1. ve 2. katman D Blok'un rüzgâr ile etkileşimini göstermektedir. Yapının cephesine çarpan rüzgâr aerodinamik açıdan dezavantajlı teras çatıdan yükselerek ve hızlanarak yapının üstünden aşırılır. Yapının arkasında bir iz bölgesi (wake) oluşur. Bu bölge genel olarak düşük rüzgâr hızına sahipken girdap oluşumu gözlemlenir. 3. katman görselinde D Blok'un etkisi azalırken B Blok'un hem ön hem de arka cephesinde wake alanı olduğu gözlemlenmektedir. Bu katmanda iki yapının arasında yatayda gradyan (değişim) seviyesi yüksek bir bölge olduğu gözlemlenmektedir. 4. ve 5. katmanlarda B ve C Blok'un arasındaki düşük rüzgâr hızına sahip iz bölgesi gözlemlenmektedir. 6. ve 7 katmanlarda A Blok'un etkisi iyice görülmeye başlanırken en yüksek katlı yapı olan A Blok'un önündeki gradyan bölge dikkati çekmektedir. Ayrıca 8. ve 9. katmanlardan anlaşılacağı üzere rüzgâr hızı A Blok'un çatısının akışkan yönünde köşe noktasında maksimuma ulaşmaktadır. Yapılarda üst katlara çıkıldıkça rüzgâr hızı artmakta ve konfor azalmaktadır. Bu noktadaki basınç çok düşükken yapının çatısında çok net bir gradyan bölgesi oluşturur. Örneğin; yapının çatısına düşey bir çizgi indirildiğinde o çizgi üzerindeki hız değerleri çok kısa bir mesafede 8-10-16-20-22 m/s gibi değerleri görebilmektedir. Ayrıca A Blok'a çarpan rüzgârın oluşturduğu akış geniş çevrede etkisini devam ettirmektedir.

Tablo 12. Batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-z)

No	Standart k-ε Türbülans Modeli	RNG k-ε Türbülans Modeli
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Tablo 12'nin devamı

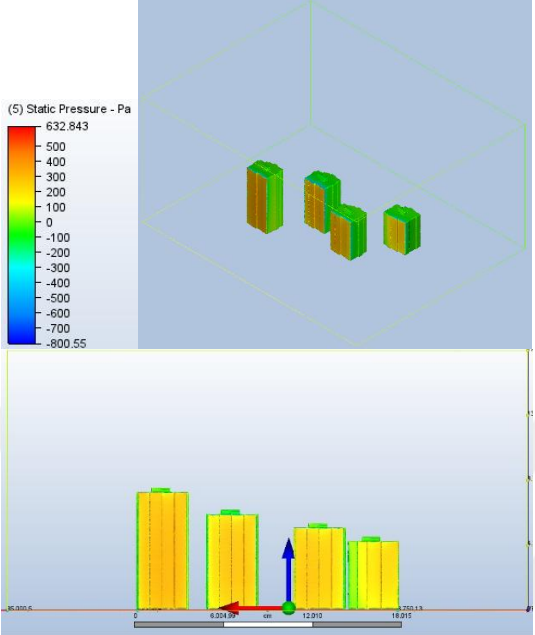
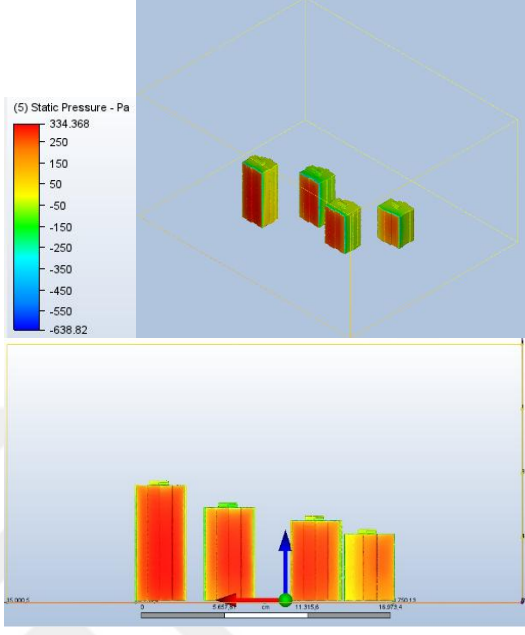
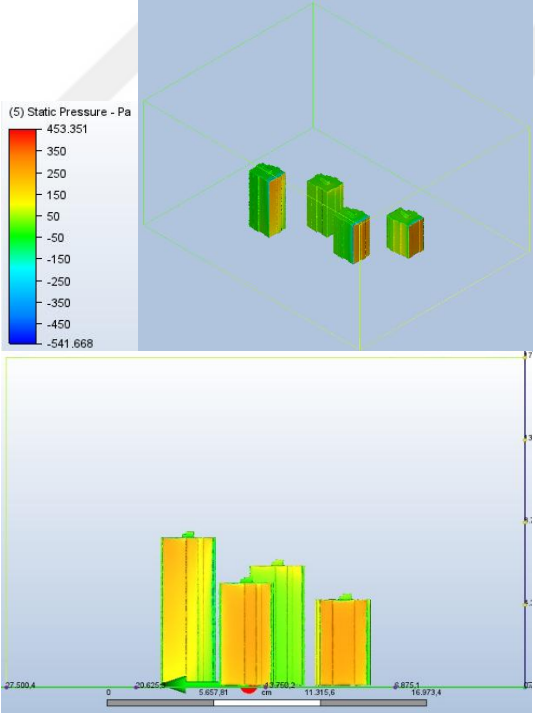
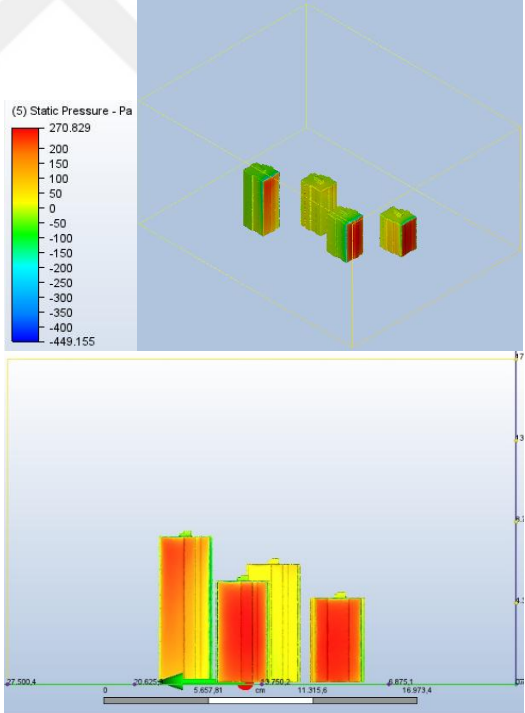


3.1.3. Mevcut Yapılara Etki Eden Statik Basınç Kuvvetleri

Statik rüzgâr basıncı, bir yapının yüzeyine uygulanan rüzgârın oluşturduğu basıncı ifade eder. Bu basınç, rüzgârın yapı yüzeyine çarpması sonucu meydana gelir ve genellikle binanın dış cephesinde, çatısında ve diğer yatay veya dikey yüzeylerinde etkili olabilir. Sonuç olarak, statik rüzgâr basıncı, rüzgârın hızı ve hava yoğunluğu gibi faktörlere bağlı olarak hesaplanan bir kuvvettir ve yapıların tasarımında güvenliği sağlamak için kritik bir parametredir. Bir yapının yüzeyine etki eden rüzgâr basıncı, yapı şekline, yüzey eğimine ve çevresel faktörlere göre değişkenlik gösterir. Bu yüzden, çeşitli rüzgâr etki katsayıları kullanılarak düzeltilmiş basınç hesaplanır.

Tablo 13'te yapıların kuzey ve batı yönlü yüksek hızlı rüzgarlarda cephelerinde oluşan statik basınç değerleri görülmektedir. Buna göre yapıların yüzeylerinde oluşan statik basınç değerleri kullanılan türbülans modeline göre farklılık gösterirken sonuçlarda temel olarak yapı yüksekliği arttıkça statik basıncın arttığı ve ayrılma bölgelerinde rüzgâr hızı maksimum değerleri gördüğü için basıncın minimum değerlerde olduğu görülmektedir.

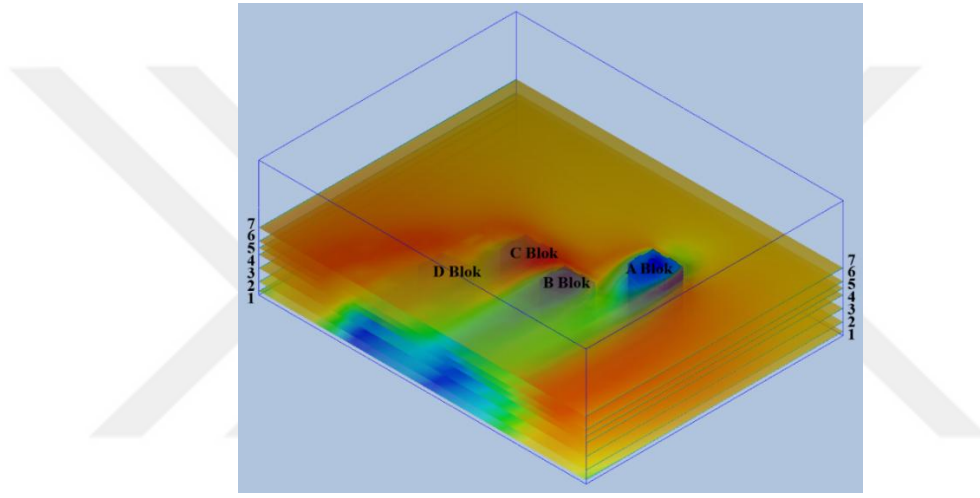
Tablo 13. Kuzey (N) ve batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyonunda yapılara etki eden statik basınç (Pa) değerleri

Yön	Standart k-ε Türbülans Modeli	RNG k-ε Türbülans Modeli
N		
W		

3.2. Birinci Alternatif Modelin Analizi

Bu modelde çevredeki yapılardan kat sayıları ve yükseklikleri fazla olan bu alandaki yapılar çevre ile uyumlu kat sayısı ve yükseklik düzenlenmesi ile iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu modelde var olan yapıların formu ve planı korunurken her yapının kat sayısı 6 kat (18 m) düşürülmüştür. Burada amaç hem çevre ile uyumlu bir imar durumu oluşturmak hem de kat sayısı ve yüksekliğin aerodinamiğe etkisini irdelemektir.

3.2.1. Birinci Alternatif Modelin Kuzey (N) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi

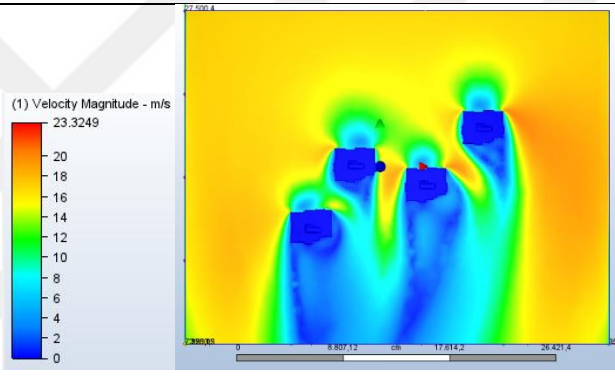
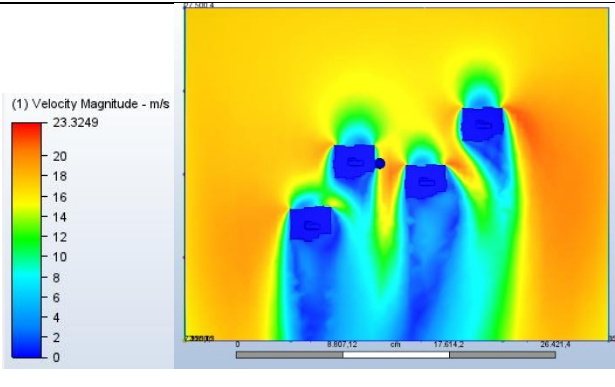
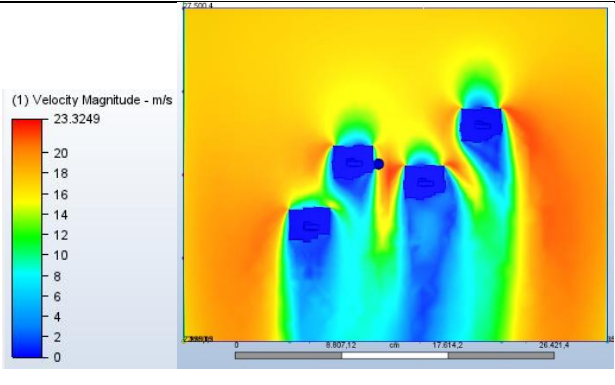


Şekil 54. Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları

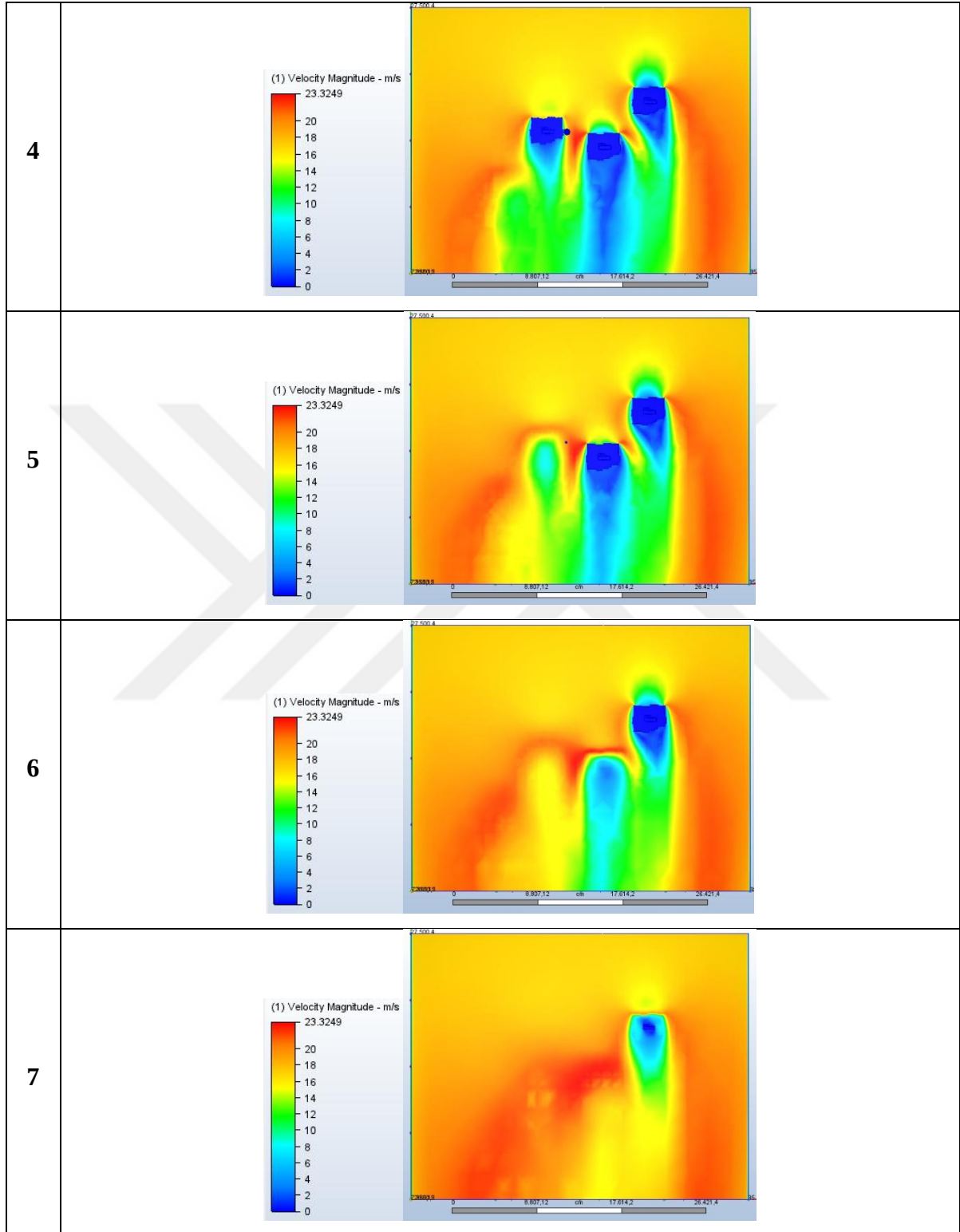
Şekil 54'te verilen şemada birinci alternatif modeldeki yapıların kuzey yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren yatay (x-y) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 10 m aralıklarla oluşturulmuştur (yaya seviyesindeki katmanın zeminden yüksekliği 1,5 m, 5. katmanın 4. ve 6. katmana mesafesi 5 m). Kesitler sırasıyla Tablo 14'te verilmiştir. Tablo 14'te 1. katman yaya seviyesi rüzgâr akışını temsil etmektedir. Burada görüldüğü üzere D Blok, C Blok'un iz bölgesinde kalmaktadır ve 3. katmana kadar bu etki kendini göstermektedir. Mevcut bina yapılandırmasındaki etki yapıların konumları değiştirilmediği için devam etmektedir. D Blok ve B Blok'un arkasındaki geniş iz bölgesi varlığını mevcut durumdaki gibi sürdürürken bu bölgede akışkan davranışı kararsızdır. Çatıda ve cephedeki köşeli yapıya sahip ayrılma bölgelerindeki yüzeyler varlıklarını sürdürdüğü için alternatif modelde de yüzeye çarpan rüzgâr hızı artmaktadır. Ancak mevcut durumla alternatif model arasındaki fark bu noktada ortaya çıkmaktadır. Bina yüksekliği azaldığı için yapıya çarpan

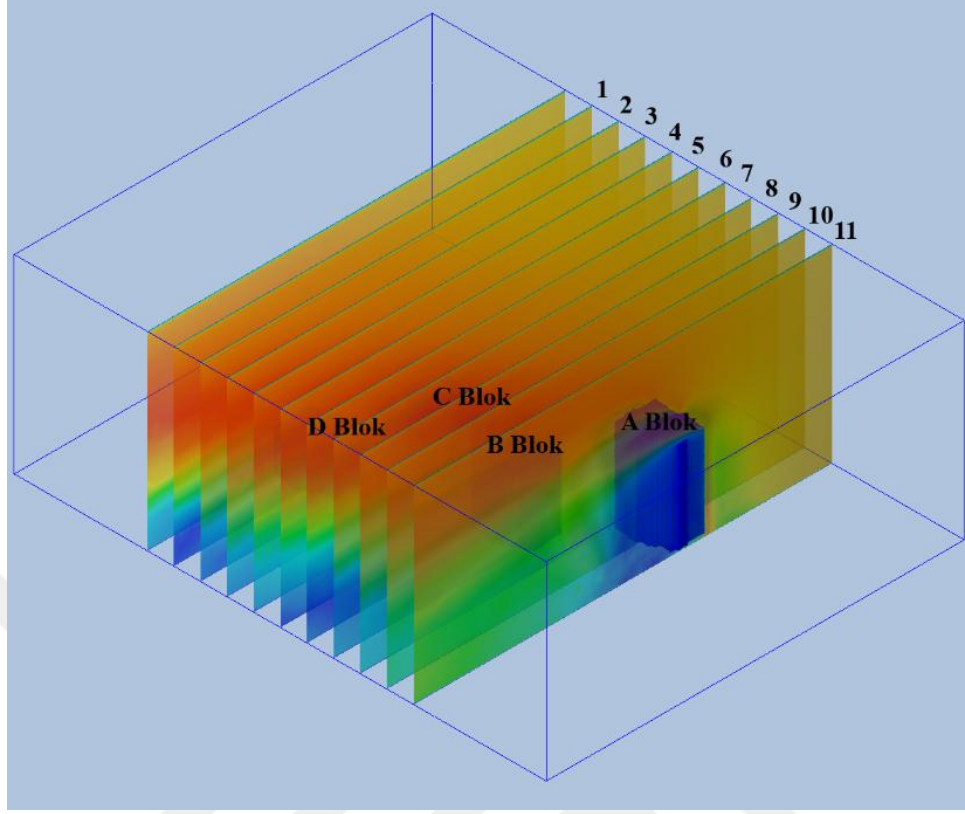
rüzgârın oluşturduğu rüzgâr hızı değişkenlik gösteren bölgeler (gradyan bölgeleri) ilk duruma göre daha fazla alana yayılmaktadır. Bu durum akışkan hızları arasındaki geçişi daha yumuşak ve konforlu hale getirmektedir. Aerodinamik açıdan iyileşme düşey kesitlerde daha iyi anlaşılabilir. Üretilen bu alternatif model kat sayısı ve yapı yüksekliğinin aerodinamiğe etkisini irdelemektedir. Her ne kadar aerodinamik açıdan iyileştirmeler barındırsa da mevcuttaki yapılandırmadaki gibi bazı problemleri barındırmaktadır.

Tablo 14. Birinci alternatif model için kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y)

No	Analiz Sonucu (Standart k-ε Türbülans Modeli)
1	 Figure 1: Velocity magnitude plot for model 1. The plot shows the flow field around a building with a central tower and two side wings. The color scale ranges from 0 m/s (blue) to 23.3249 m/s (red). The flow is predominantly horizontal, with higher velocities (yellow/red) concentrated in the wake of the building and around the central tower. The side wings show lower velocity regions (blue/green).
2	 Figure 2: Velocity magnitude plot for model 2. The plot shows the flow field around a building with a central tower and two side wings. The color scale ranges from 0 m/s (blue) to 23.3249 m/s (red). The flow is predominantly horizontal, with higher velocities (yellow/red) concentrated in the wake of the building and around the central tower. The side wings show lower velocity regions (blue/green).
3	 Figure 3: Velocity magnitude plot for model 3. The plot shows the flow field around a building with a central tower and two side wings. The color scale ranges from 0 m/s (blue) to 23.3249 m/s (red). The flow is predominantly horizontal, with higher velocities (yellow/red) concentrated in the wake of the building and around the central tower. The side wings show lower velocity regions (blue/green).

Tablo 14'ün devamı

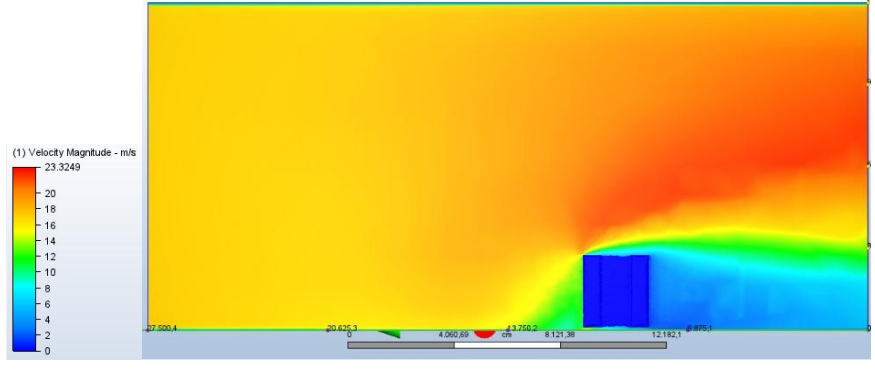
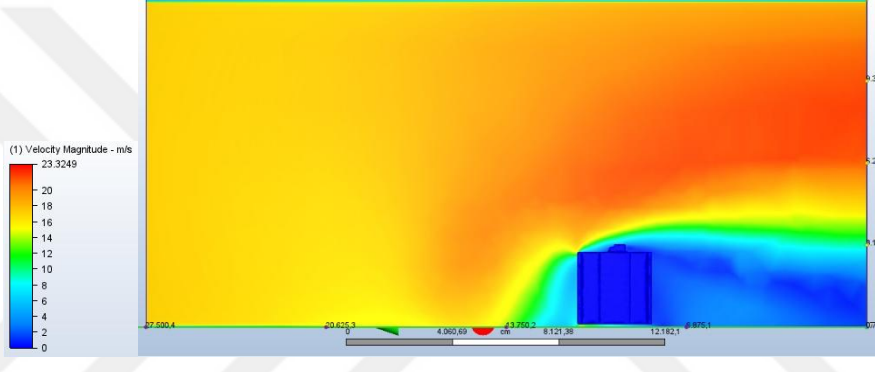
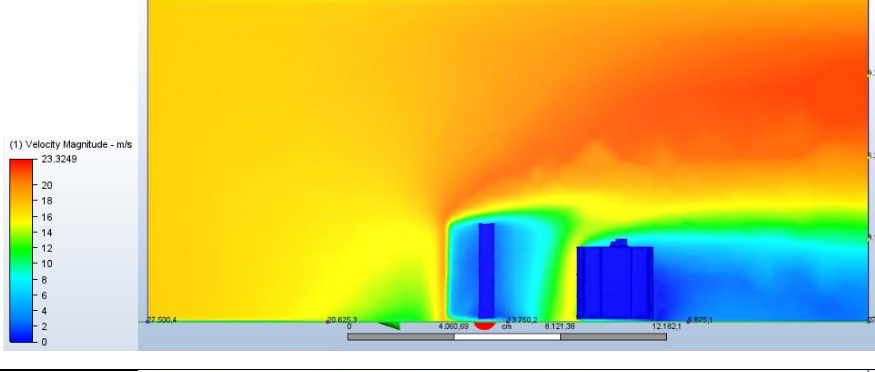
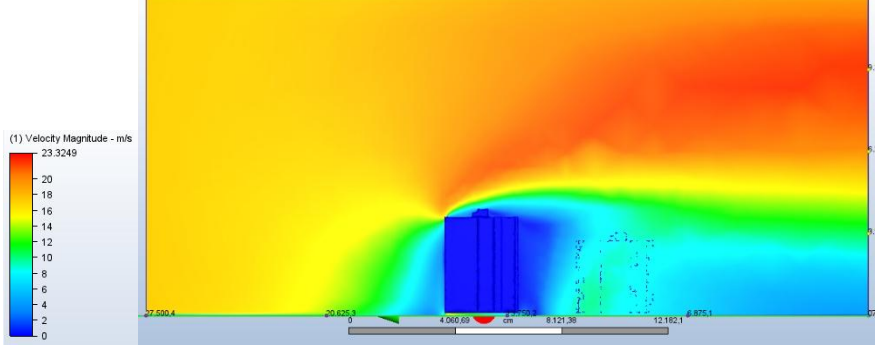




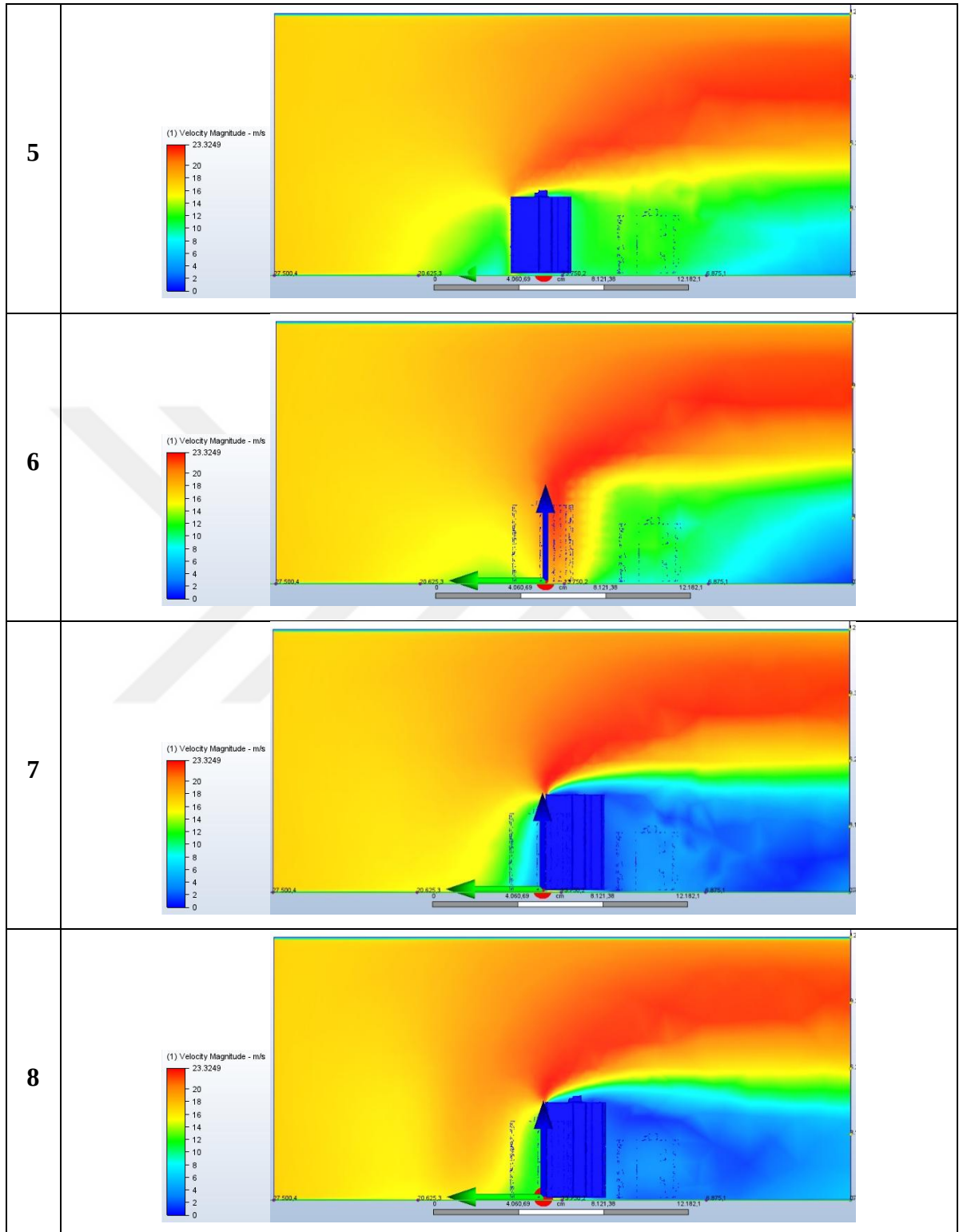
Şekil 55. Analiz sonuçlarından y-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları

Şekil 55'te verilen şemada birinci alternatif modeldeki yapıların kuzey yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren düşey (y-z) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 15 m aralıklarla oluşturulmuştur. Kesitler sırasıyla Tablo 15'te verilmiştir. Tablo 15'te 1. katmandan başlayarak sırasıyla D, C, B, A Blok yapılarının rüzgâr ile etkileşimi düşey kesitler ile aktarılmıştır. 1. ve 2. katman D Blok'un rüzgâr ile etkileşimini göstermektedir. Alternatif modelin bir avantajı olarak yapının kuzey cephesinde oluşan geçiş bölgeleri mevcut yapıdakinden farklı olarak daha fazla alana yayılır ve daha yumuşak bir etkiye sahiptir. Bunun ana sebebi yapının yüksekliğinin azalmasına bağlı olarak düşeyde daha aerodinamik bir hale gelmesidir. Bu durum diğer bloklarda da geçerlidir ancak kat sayısı ve yükseklik arttıkça etkisi azalmaktadır. Yapıların yüksekliklerine bağlı olarak arkalarında oluşturdukları iz bölgesinin (wake) büyüklüğünün ve düşeyde kapladığı alanın yapının yüksekliğine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Yani yapının üzerinden aşırılan rüzgâr akışının çevreye etkisi ve etki alanı yapının yüksekliği ile doğru orantılıdır. Bu durum mevcut bina yapılandırması ile bu alternatif model arasındaki önemli faklardan biridir.

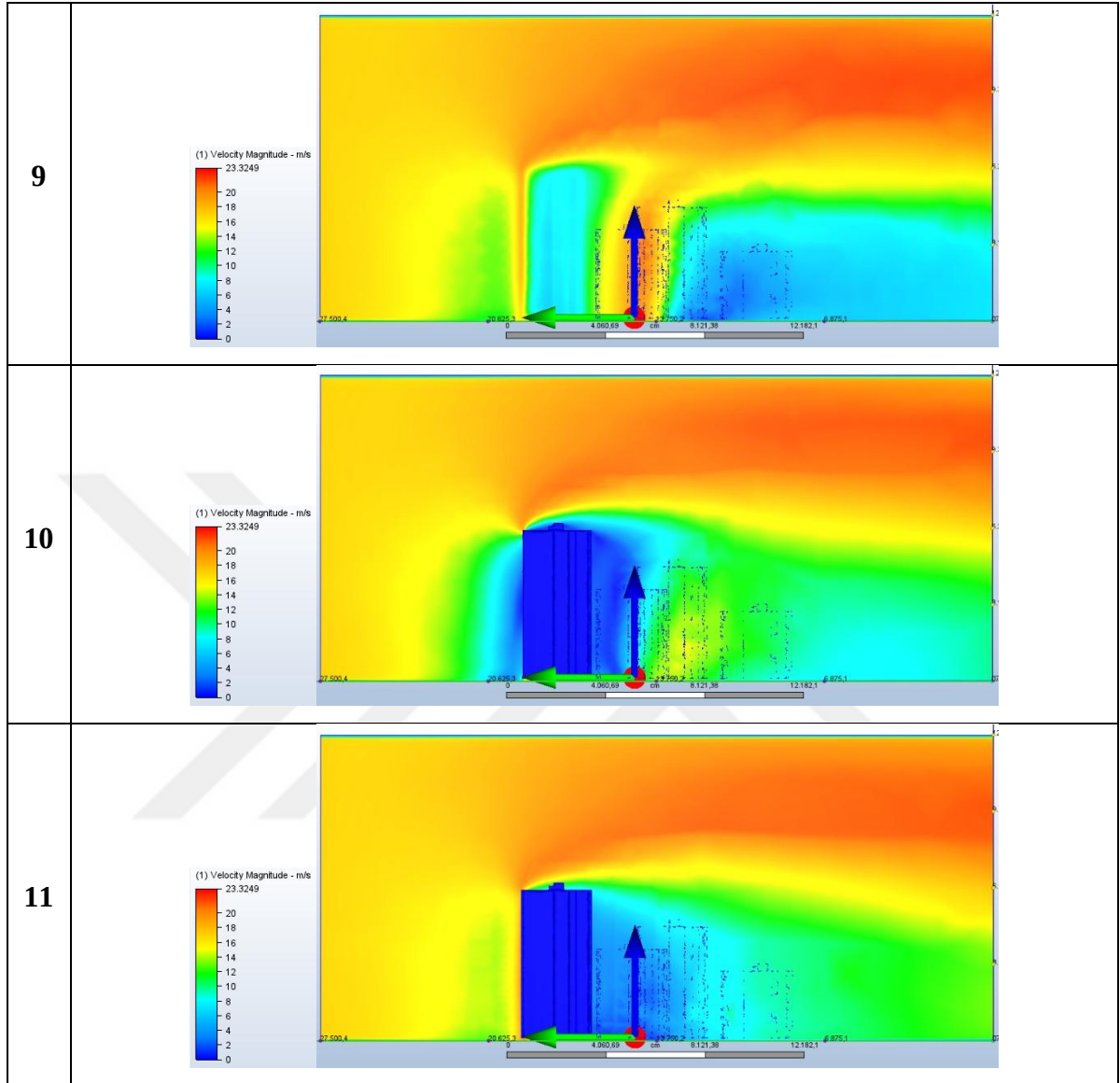
Tablo 15. Birinci alternatif model için kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (y-z)

No	Analiz Sonucu (Standart k-ε Türbülans Modeli)
1	
2	
3	
4	

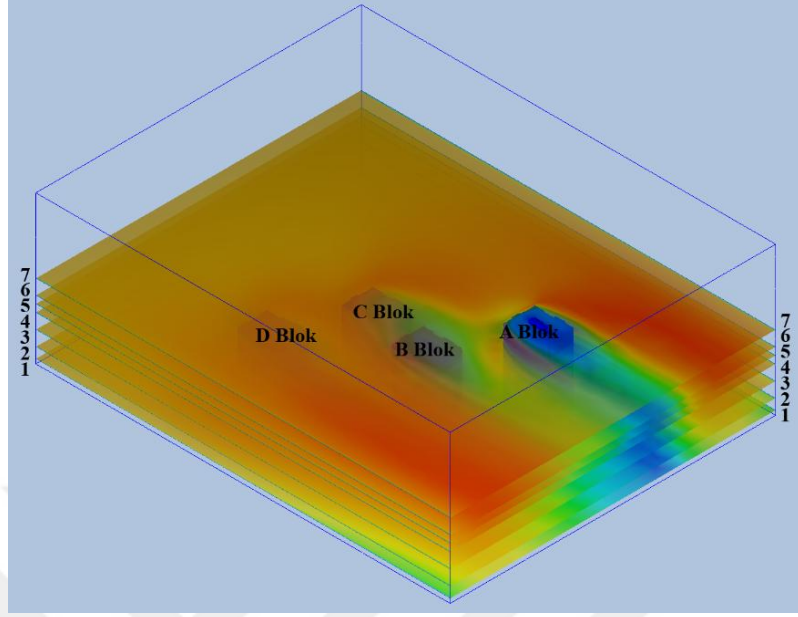
Tablo 15'in devamı



Tablo 15'in devamı



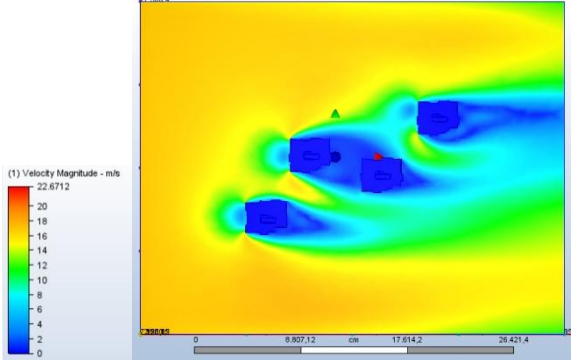
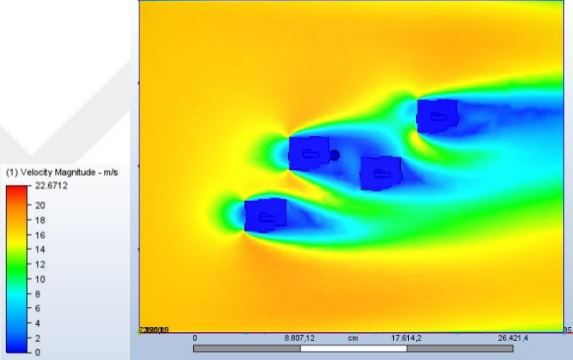
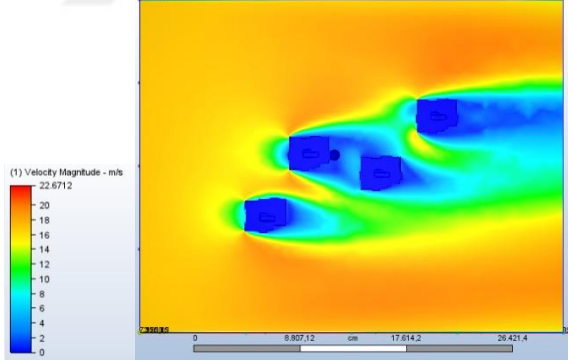
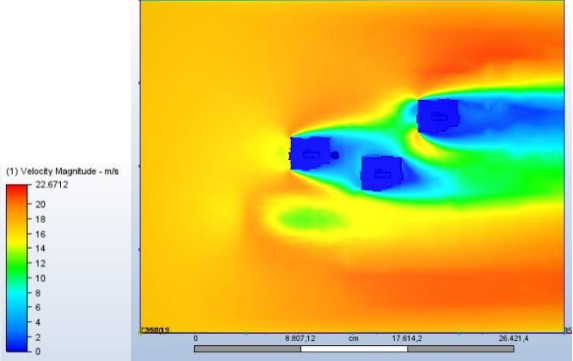
3.2.2. Birinci Alternatif Modelin Batı (W) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi



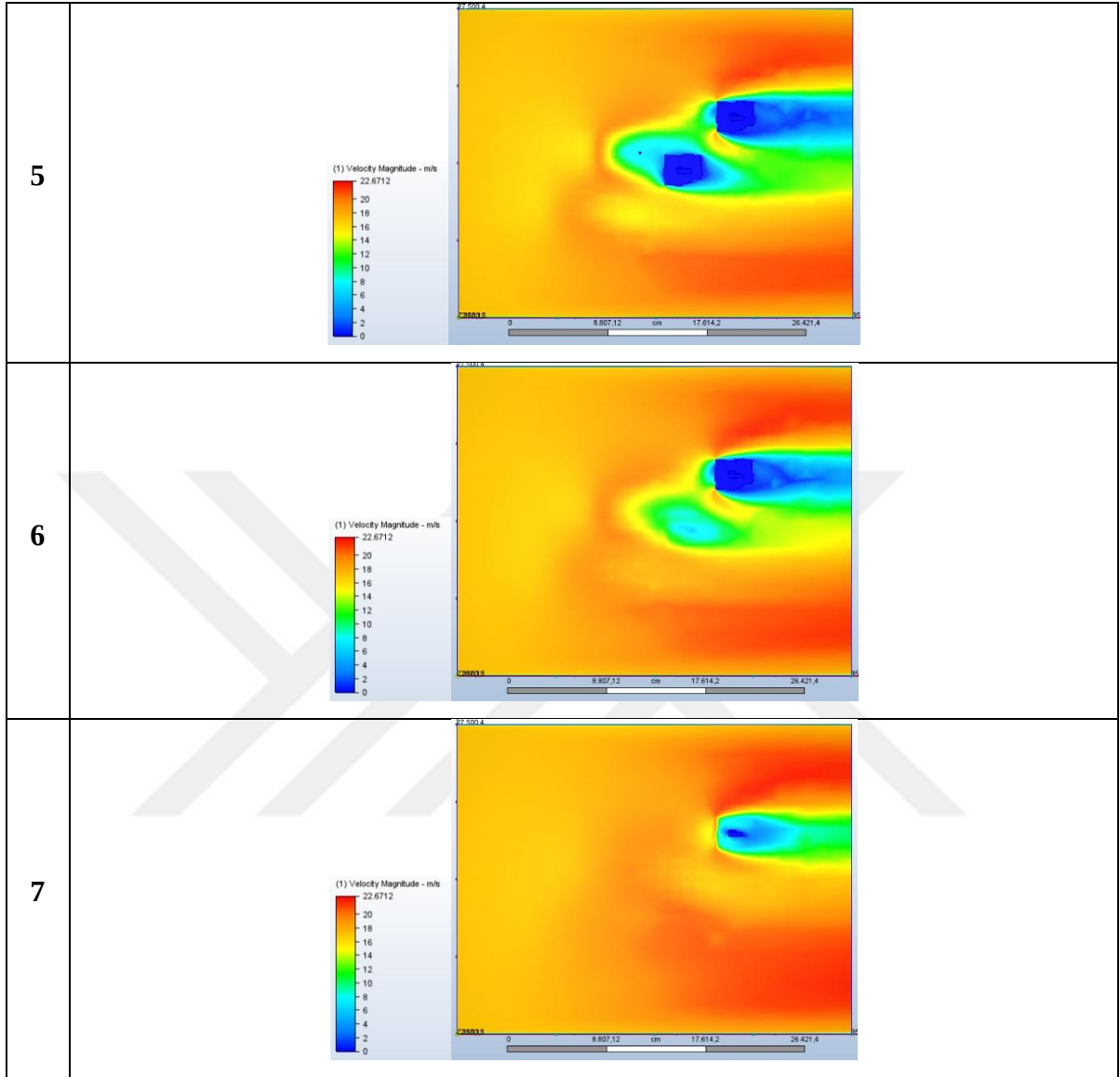
Şekil 56. Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları

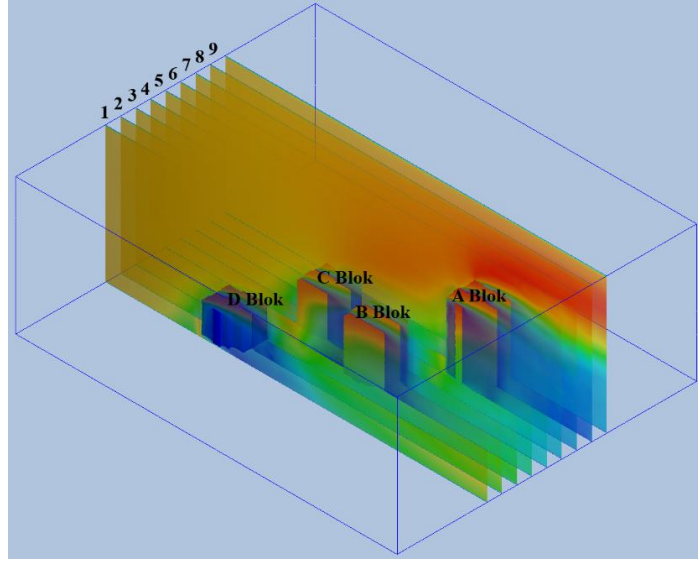
Şekil 56’da verilen şemada birinci alternatif modeldeki yapıların batı yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren yatay (x-y) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 10 m aralıklarla oluşturulmuştur (yaya seviyesindeki katmanın zeminden 1,5 m yüksek, 5. katmanın 4. ve 6. katmana mesafesi 5 m). Kesitler sırasıyla Tablo 16’da verilmiştir. Tablo 16’da 1. katman yaya seviyesi rüzgâr akışını temsil etmektedir. Burada görüldüğü üzere çalışma alanındaki B Blok, C Blok’un iz bölgesinde (wake) kalmakta ve bu durum 4. katmana kadar devam etmektedir. Mevcut bina yapılandırmasındaki etki yapıların konumları değiştirilmediği için bu modelde de devam etmektedir. C ve D blok arasındaki bölgedeki gradyan oluşumu burada da görülür. Alternatif modelde de A, C, D Blok yapılarının batıya bakan cephelerinde gradyan düzeyi yüksektir fakat gradyanlar daha geniş bir alana yayılmıştır. Bu durum rüzgâr konforu açısından avantaj oluştururken mevcut durumla aradaki fark minimal kabul edilecek bir düzeydedir. Çatıda ve cephedeki köşeli yapıya sahip ayrılma bölgelerindeki yüzeyler varlıklarını sürdürdüğü için alternatif modelde de yüzeye çarpan rüzgâr hızı artmaktadır. Ancak daha önce belirtildiği üzere bina yüksekliği azaldığı için hızı değişkenlik gösteren bölgeler (gradyan bölgeleri) ilk duruma göre daha kabul edilebilir düzeydedir.

Tablo 16. Birinci alternatif model için batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y)

No	Analiz Sonucu (Standart k-ε Türbülans Modeli)
1	
2	
3	
4	

Tablo 16'nın devamı

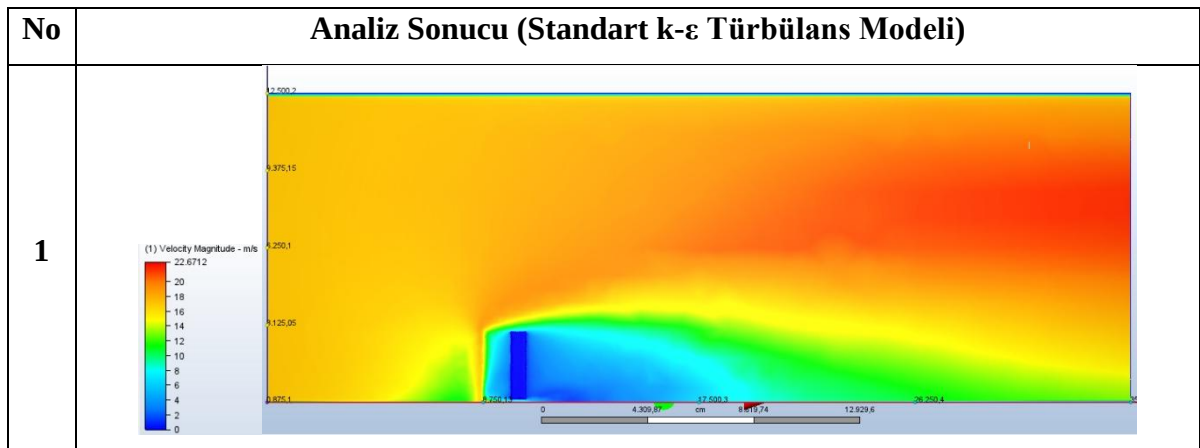




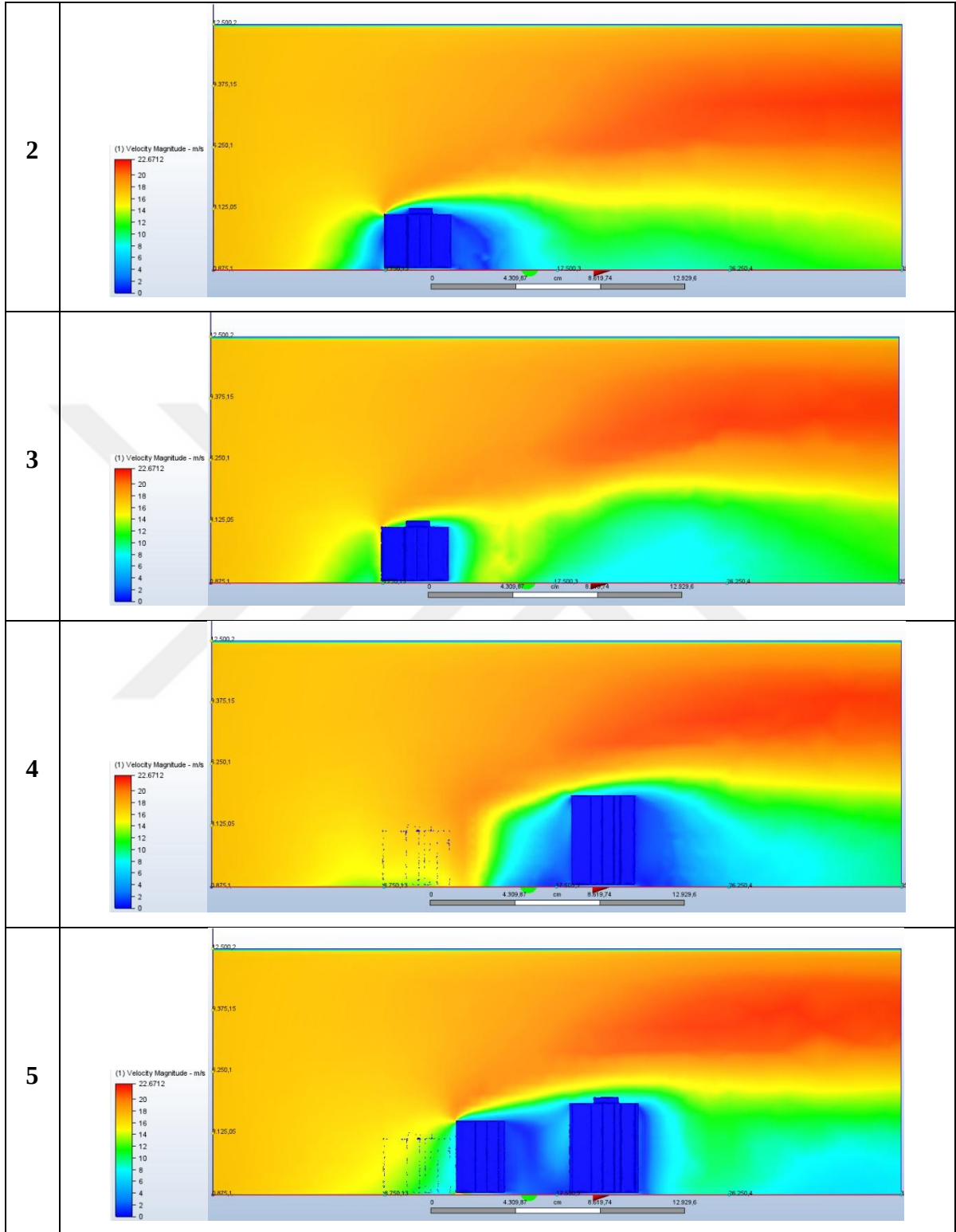
Şekil 57. Analiz sonuçlarından x-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları

Şekil 57’da verilen şemada birinci alternatif modeldeki yapıların batı yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren düşey (x-z) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 15 m aralıklarla oluşturulmuştur. Bu kesitler sırasıyla Tablo 17’de verilmiştir. Tablo 17’de 1. katmandan başlayarak sırasıyla D, B, C, A bloktaki yapıların rüzgâr ile etkileşimi düşey kesitler ile aktarılmıştır. 1. ve 2. katman D Blok’un rüzgâr ile etkileşimini göstermektedir. Alternatif modelin avantajı olarak yapının batı cephesinde oluşan geçiş bölgeleri mevcut yapıdakine oranla daha fazla alana yayılmıştır ve daha yumuşak bir geçiş olduğu gözlemlenmiştir. Bunun ana sebebinin yapının yüksekliğinin azalması ve aerodinamik açıdan daha iyi olduğunu daha önce de belirtilmiştir.

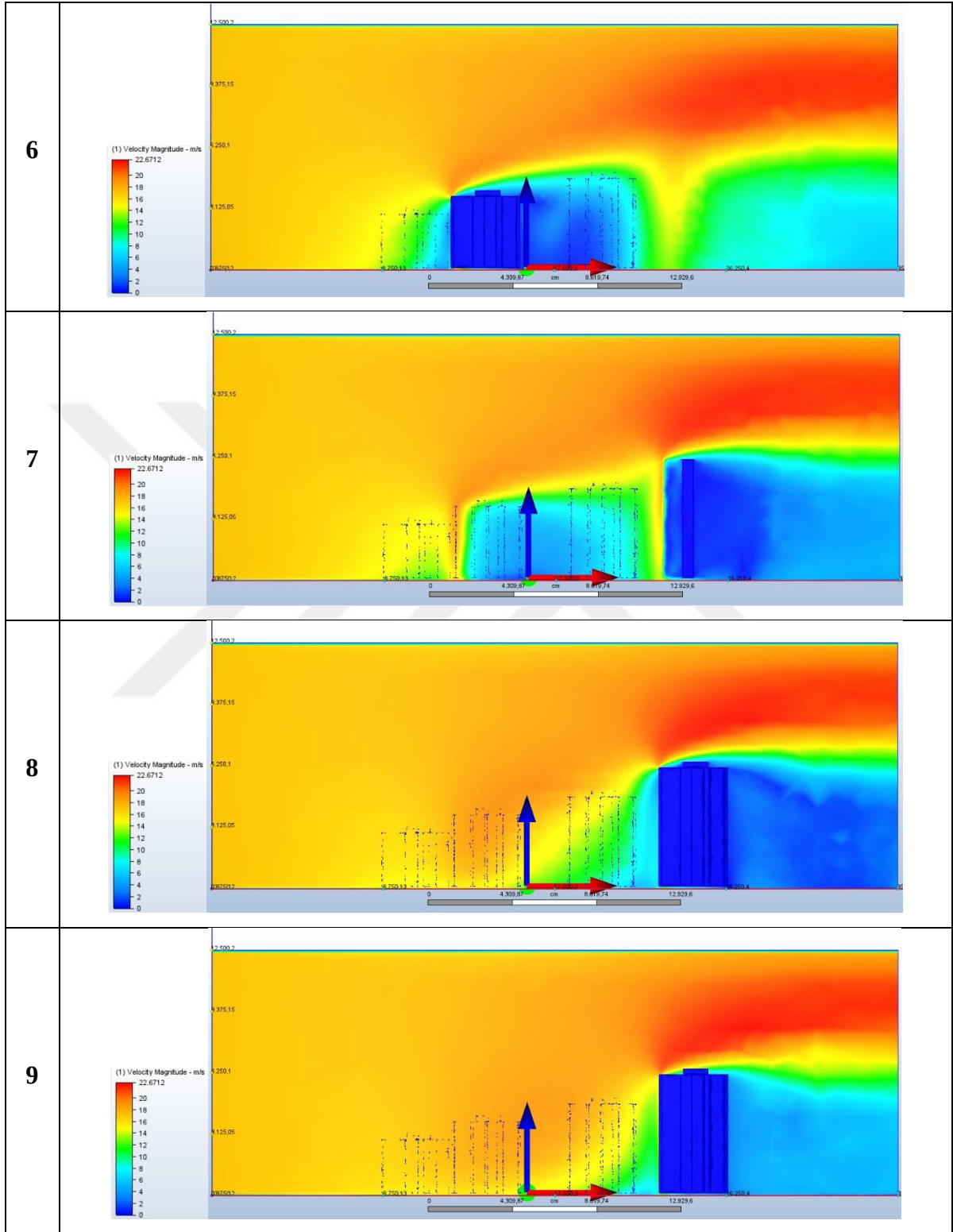
Tablo 17. Birinci alternatif model için batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-z)



Tablo 17'nin devamı



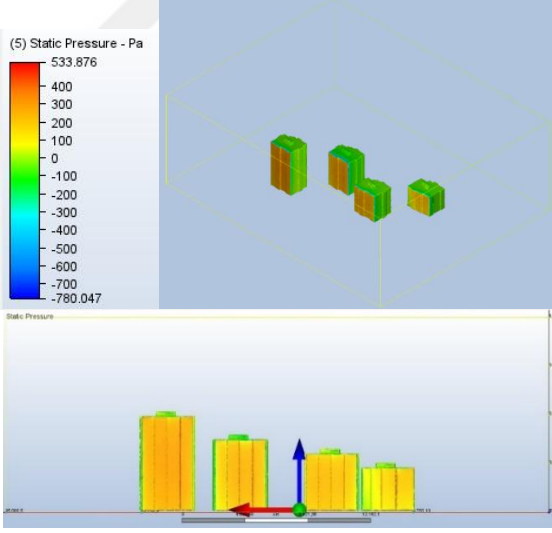
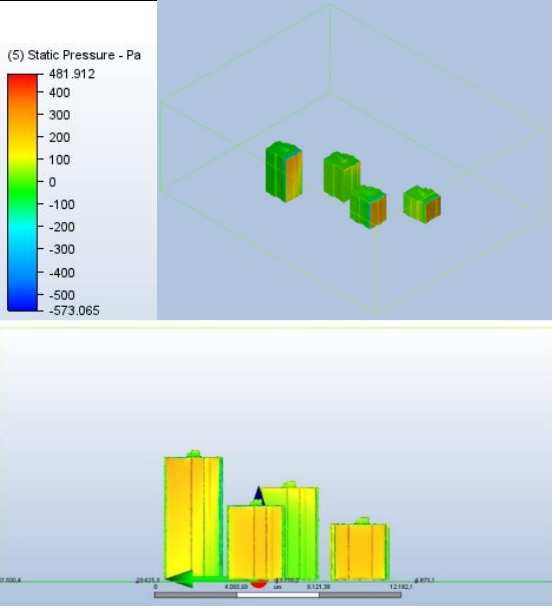
Tablo 17'nin devamı



3.2.3. Birinci Alternatif Modele Etki Eden Statik Basınç Kuvvetleri

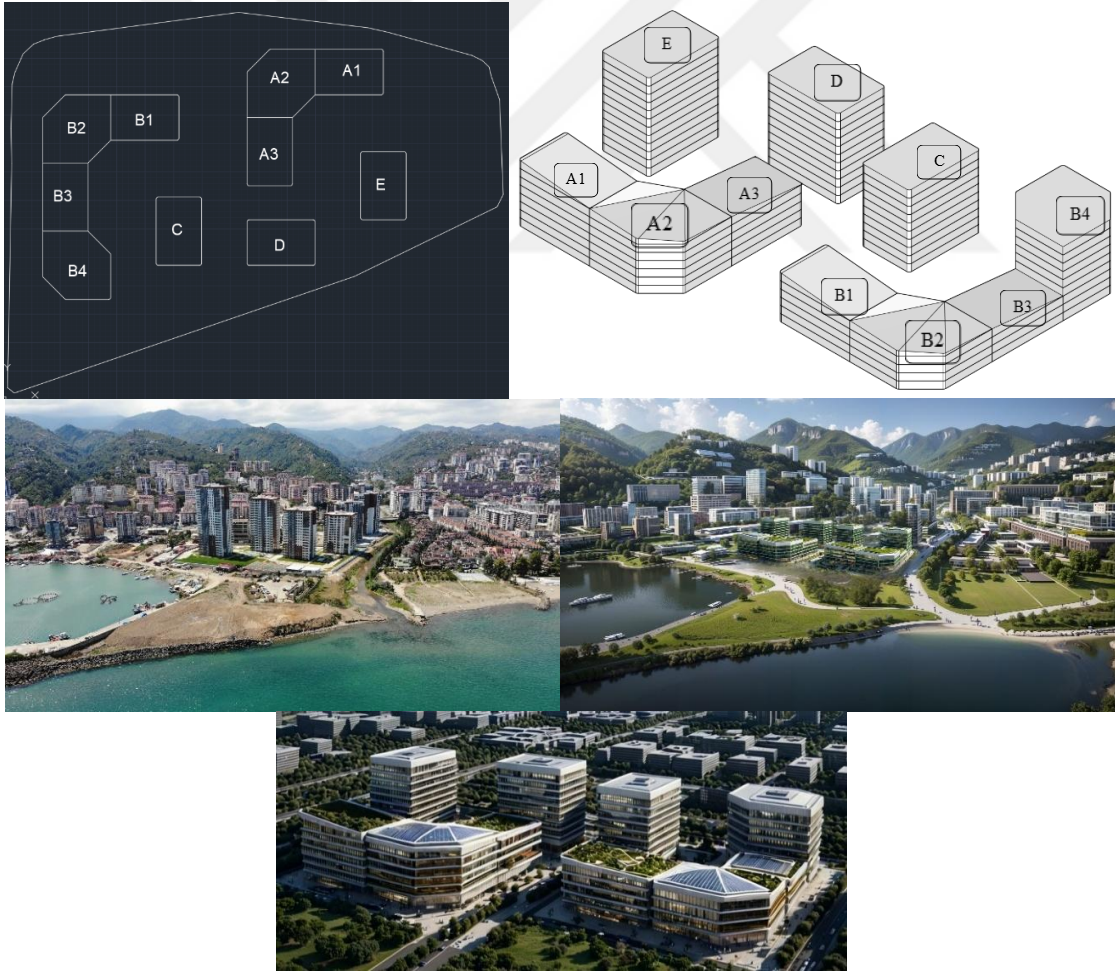
Birinci alternatif modelde yapıların cephelerine etki eden statik basınç kuvvetlerini tespit etmek amacıyla HAD simülasyonu kullanılmıştır. Tablo 18’de yapıların kuzey ve batı cephelerine etki eden statik basınç değerleri Pa cinsinden verilmiştir. Tabloya göre yapının yüksekliğinin azalması yüzeye etki eden statik basıncı kısmen azaltmış olsa da mevcut yapılanmadaki değerlere yakındır.

Tablo 18. Birinci alternatif model için kuzey (N) ve batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyonunda yapılara etki eden statik basınç (Pa) değerleri

Yön	Yapılara Etki Eden Statik Basınç (Standart k-ε Türbülans Modeli)
N	
W	

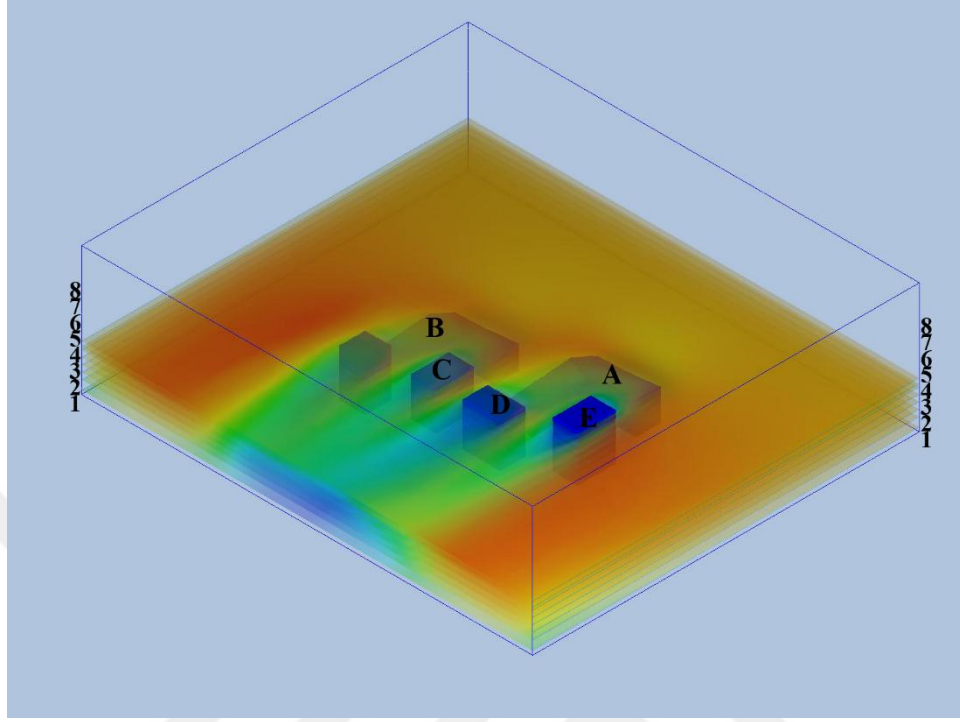
3.3. İkinci Alternatif Modelin Analizi

Bu bölümde yapıların bulunduğu bölge için yeni bir tasarım alternatifi sunulmuştur. Bu alternatif modelde bölgede oluşan kuzey (N) ve batı (W) yönlü yüksek hızlı rüzgâr akışı tasarımı etkileyen ana parametredir. Model oluşturulurken mevcut yapılanmadaki arazi kullanımı, inşaat alanı, hacim gibi parametreler dikkate alınarak alternatif modelin ve yapısal formun tasarımında etkili olmuştur. Buna göre yapının kuzey ve batı cephelerindeki rüzgâr akışını yönlendirmek ve yapılar üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla bu iki cepheye nispeten daha az katlı iki yapı (A ve B blok) tasarlanmıştır. Bu yapıların kat sayıları ve çatı örtüsü batı (W) yönlü rüzgârı yönlendirecek biçimde düzenlenmiştir. Daha sonra bu yapıların arkasında tasarlanan üç yapı (C, D, E blok) akışı hem yön hem de yükseklik faktörüyle yönlendirir.



Şekil 58. İkinci alternatif modelin CAD geometrisinin oluşturulması ve alanın 3 boyutlu görselleştirilmesi

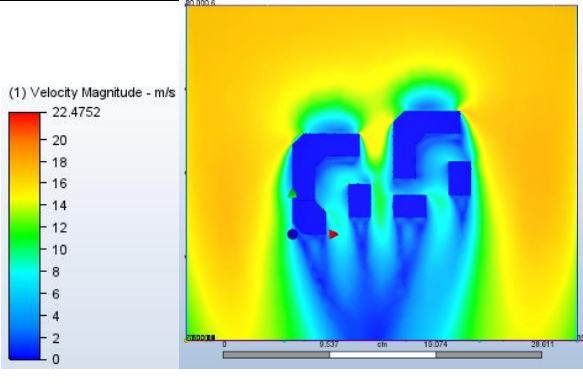
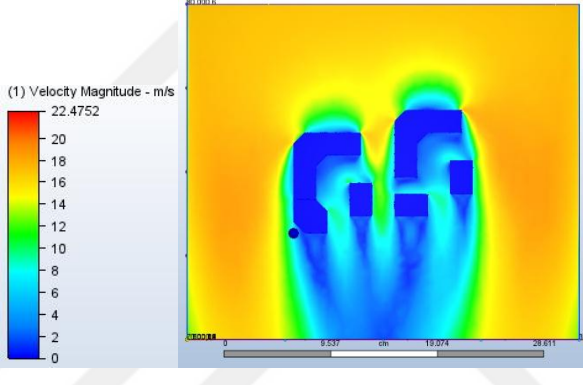
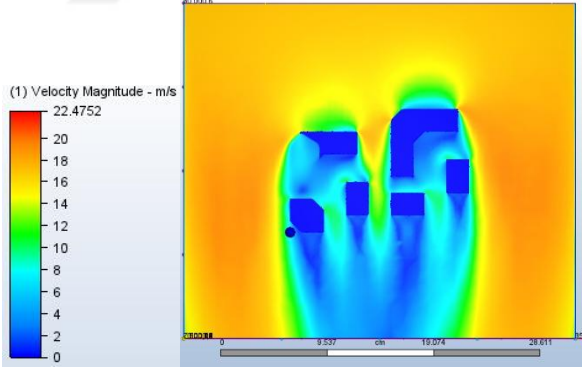
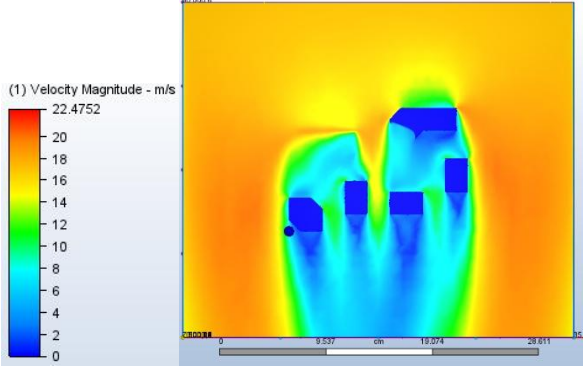
3.3.1. İkinci Alternatif Modelin Kuzey (N) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi



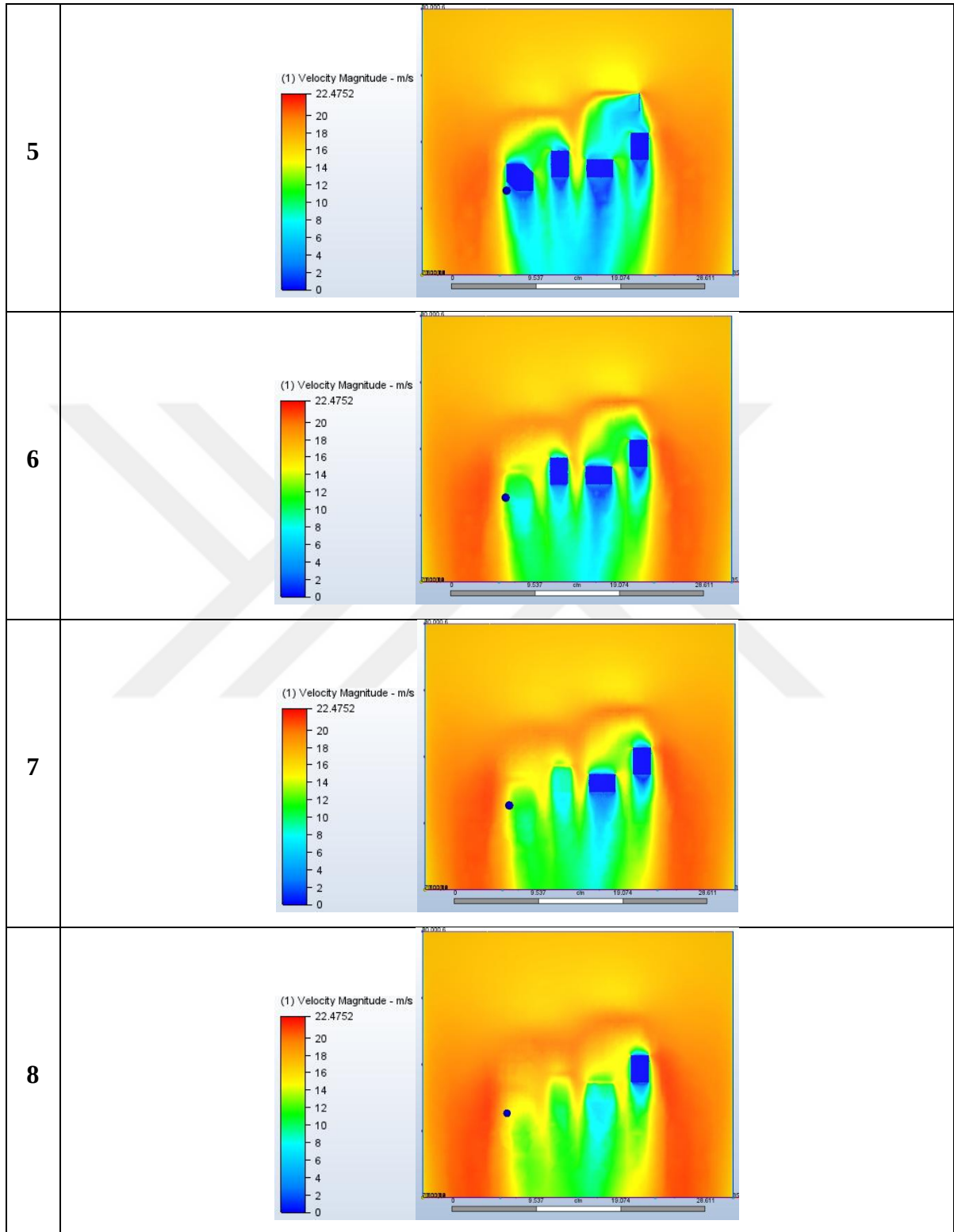
Şekil 59. Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları

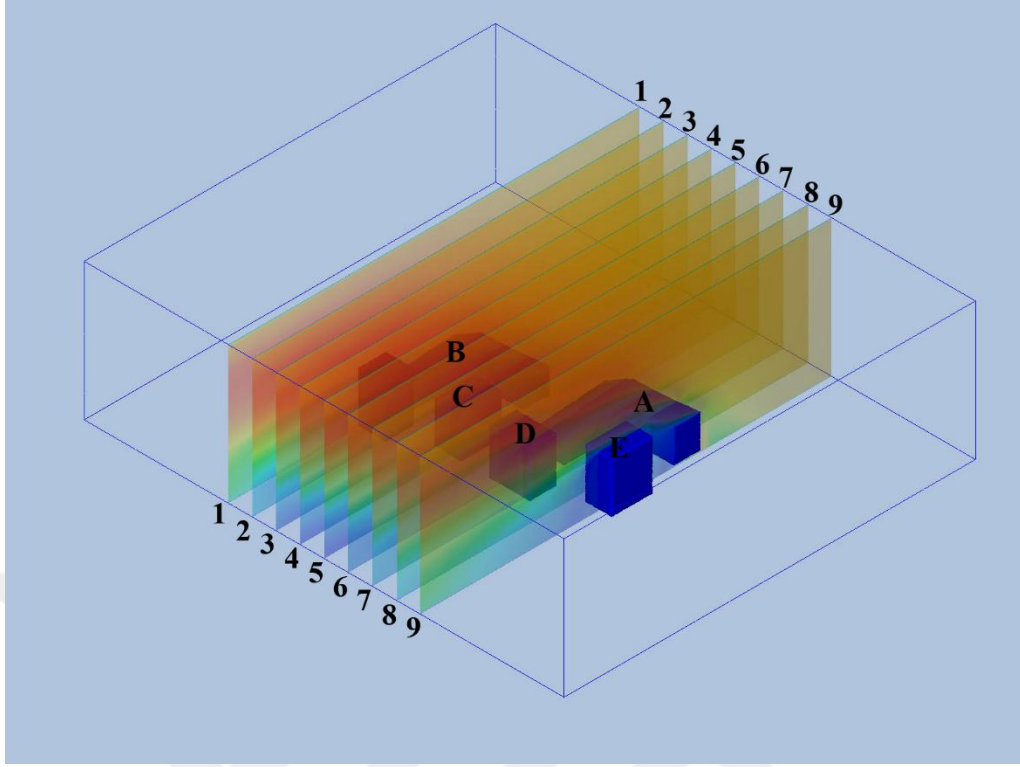
Şekil 59’da verilen şemada ikinci alternatif modeldeki yapıların kuzey yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren yatay (x-y) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 5 m aralıklarla oluşturulmuştur (yaya seviyesi kesiti zeminden 1,5 m yükseklikte, 6. katmanın 7. ve 5. katmana mesafesi 2,5 m). Kesitler sırasıyla Tablo 19’da verilmiştir. Tablo 19’da 1 numaralı katman yaya seviyesi rüzgâr akışını temsil etmektedir. Burada görüldüğü üzere öndeki iki yapının (A ve B blok) arasında bir rüzgâr akışı görülmektedir. Burada oluşan akış alanın iç kısımlarına ve diğer bloklara nüfuz etmektedir. Ancak akışın hızı önceki yapılanma örneklerinden daha düşük hızlarda ve kontrollü biçimdedir. 2, 3 ve 4 ve 5 numaralı katmanlarda bu bölgedeki akış hızının arttığı ve gradyan oluşumu gözlemlenir. Bunun temel sebebi öndeki iki yapının kuzey cephesinden ve çatısından aşırılan rüzgâr akışıdır. 6, 7 ve 8 numaralı katmanlar C, D, E blok yapılarına etki eden akışı temsil eder. Bu katmanlarda önemli nokta yapıların arasında oluşan akıştır. C ve D blok yapılarında oluşan akış A ve B bloklar arasında oluşan akışla benzerlik göstermekte ve yapı yüksekliği arttıkça oluşan gradyanın birim alanda değişimi artmaktadır.

Tablo 19. İkinci alternatif model için kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y)

No	Analiz Sonucu (Standart k-ε Türbülans Modeli)
1	 Velocity magnitude plot for model 1. The color scale ranges from 0 to 22.4752 m/s. The plot shows a complex flow pattern around a central structure, with high velocity regions (yellow/orange) and low velocity regions (blue).
2	 Velocity magnitude plot for model 2. The color scale ranges from 0 to 22.4752 m/s. The plot shows a complex flow pattern around a central structure, with high velocity regions (yellow/orange) and low velocity regions (blue).
3	 Velocity magnitude plot for model 3. The color scale ranges from 0 to 22.4752 m/s. The plot shows a complex flow pattern around a central structure, with high velocity regions (yellow/orange) and low velocity regions (blue).
4	 Velocity magnitude plot for model 4. The color scale ranges from 0 to 22.4752 m/s. The plot shows a complex flow pattern around a central structure, with high velocity regions (yellow/orange) and low velocity regions (blue).

Tablo 19'un devamı

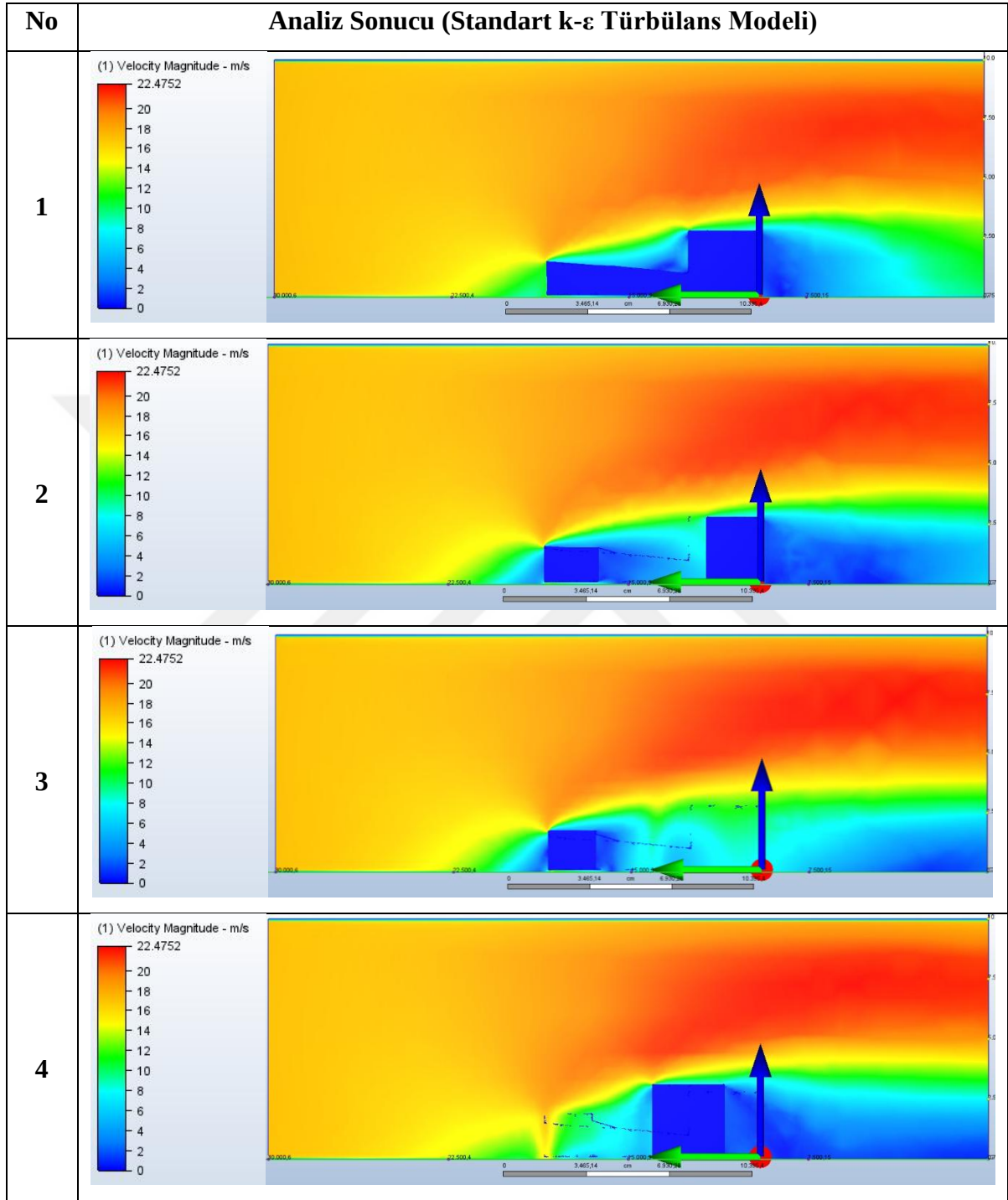




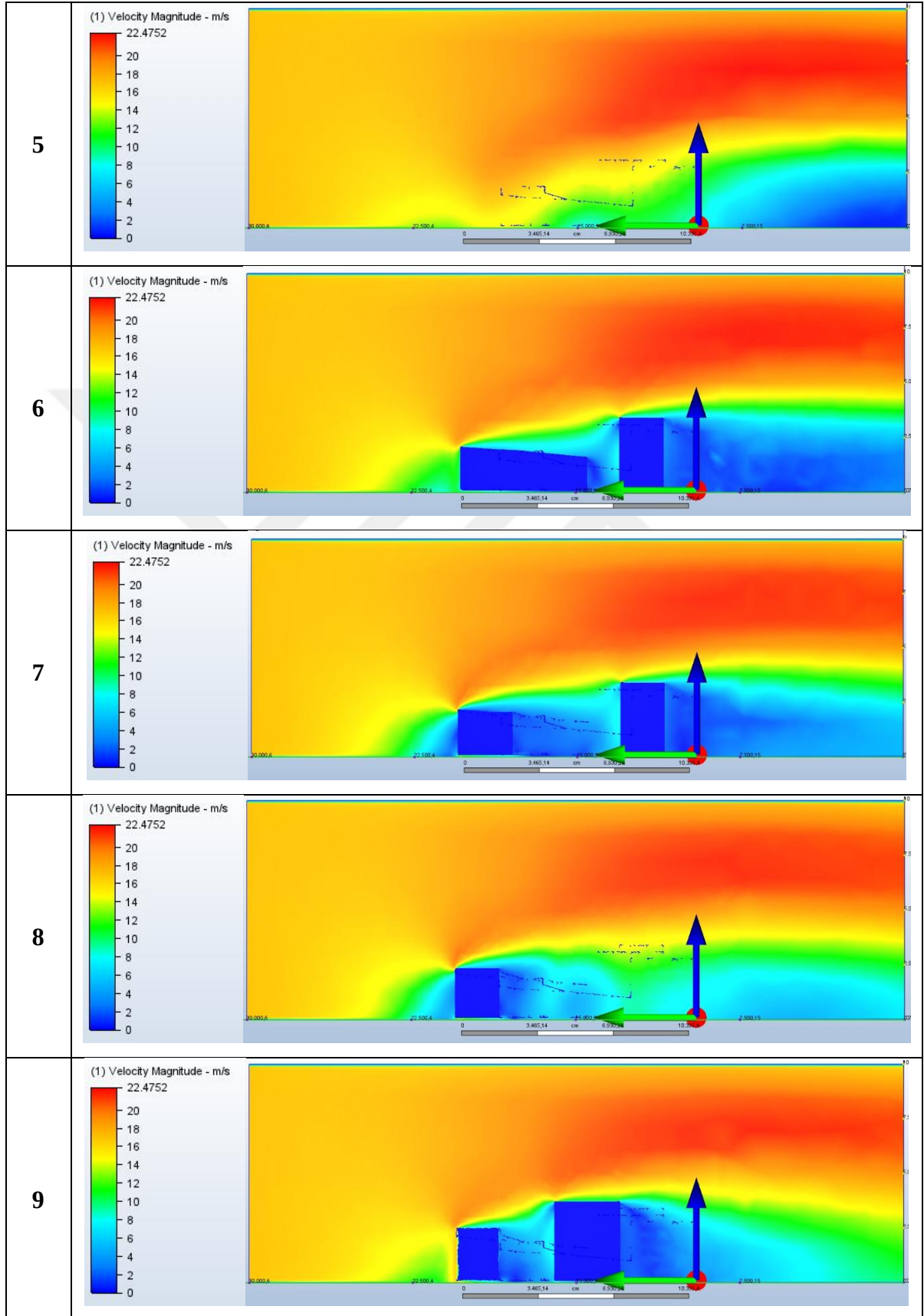
Şekil 60. Analiz sonuçlarından y-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları

Şekil 60'da verilen şemada ikinci alternatif modeldeki yapıların kuzey yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren düşey (y-z) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 15 m aralıklarla oluşturulmuştur. Kesitler sırasıyla Tablo 20'de verilmiştir. Tablo 20'de 1, 2, 3 numaralı katmanlar B blok yapısına etki eden rüzgâr akışını göstermektedir. Bu blok farklı yüksekliklerdeki bölümlerden oluşmaktadır ve kuzey cephesindeki bölümden aşırılan rüzgârı arkadaki bölüme yönlendirmektedir. 4 numaralı katman C blok yapısındaki akışı göstermektedir. Burada B blok yapısının etkisi görülmektedir. 5 numaralı katman A ve B blok arasındaki (aynı zamanda C ve D blok) akış bölgesini temsil eder. Bu bölgede farklı yüksekliklerde ve konumlarda farklı rüzgâr hızları dikkat çekmektedir. Bunun sebebi A ve B blok arasında oluşan akışın yönlendirildikten sonra benzer bir akışın C ve D blok arasında da oluşmasıdır. 6 ve 7 numaralı katman A ve D blok arasındaki oluşan akış, 8 ve 9 numaralı katmanlarda E bloğun etkisi ve A blokla E blok arasındaki etkileşim görülmektedir. Buna göre önde bulunan az katlı yapı üzerinden yönlendirilen akış arkada bulunan yüksek katlı yapıya gelen akışın hızını kontrollü bir biçimde artırmaktadır. Ayrıca bu kontrollü müdahale oluşan akışın çevresel bağlamda etkisini azaltır. Örneğin bu durum yapıların arkasında bulunan başka bir sitenin yapıların yönlendirdiği akıştan daha az etkilenmesini sağlar.

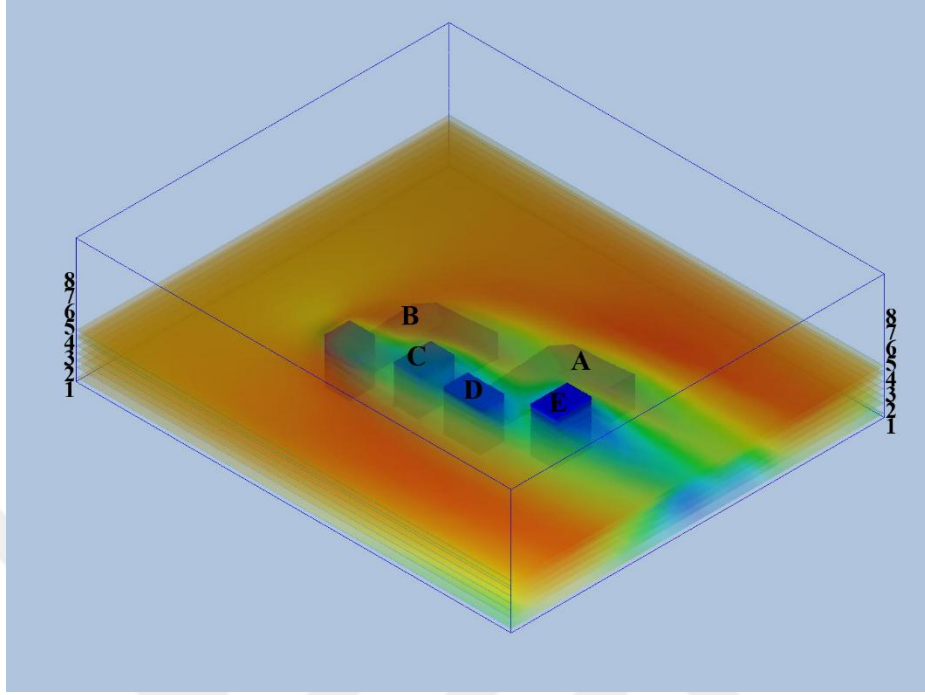
Tablo 20. İkinci alternatif model için kuzey (N) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (y-z)



Tablo 20'nin devamı



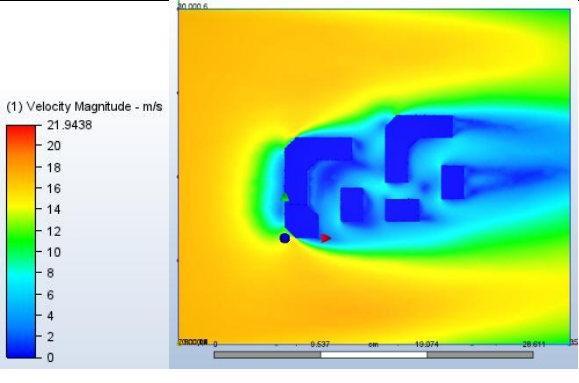
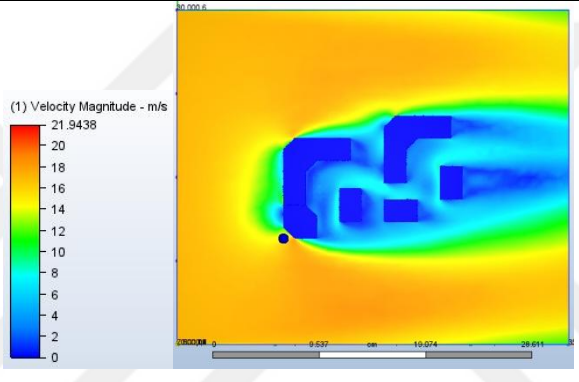
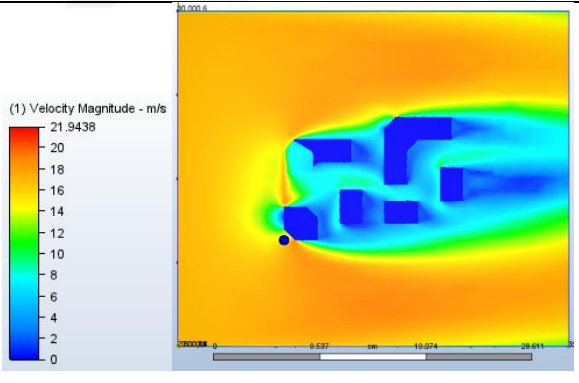
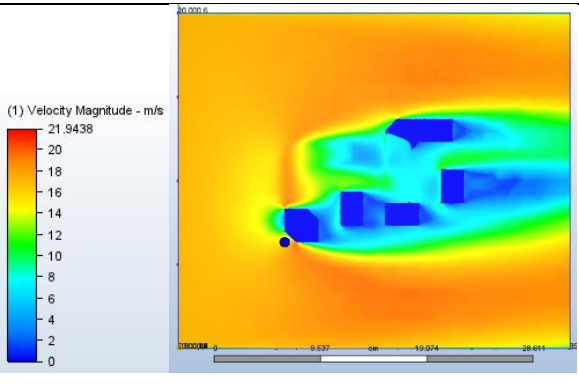
3.3.2. İkinci Alternatif Modelin Batı (W) Yönlü Rüzgâr ile Etkileşimi



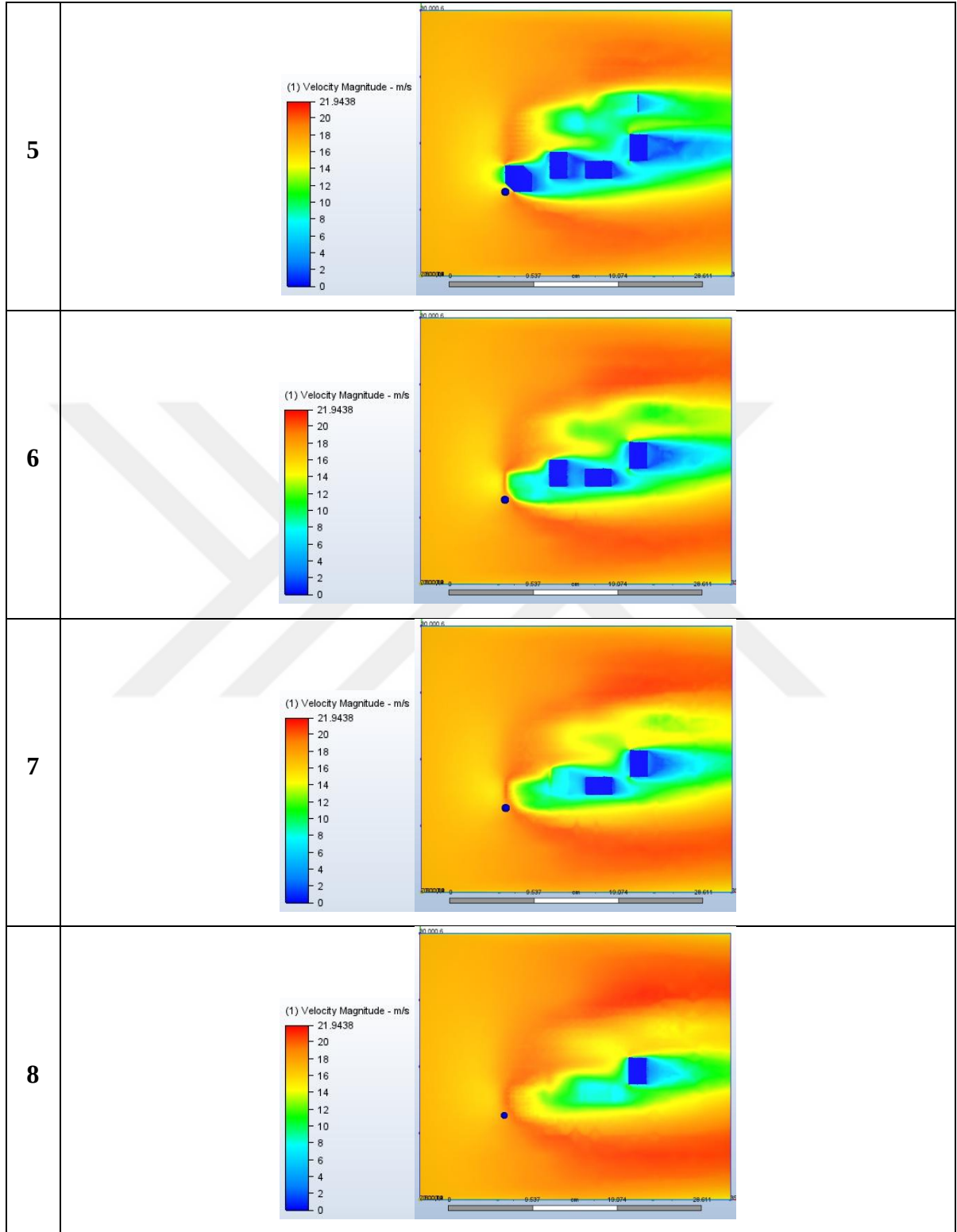
Şekil 61. Analiz sonuçlarından x-y düzleminde alınan kesitler ve numaraları

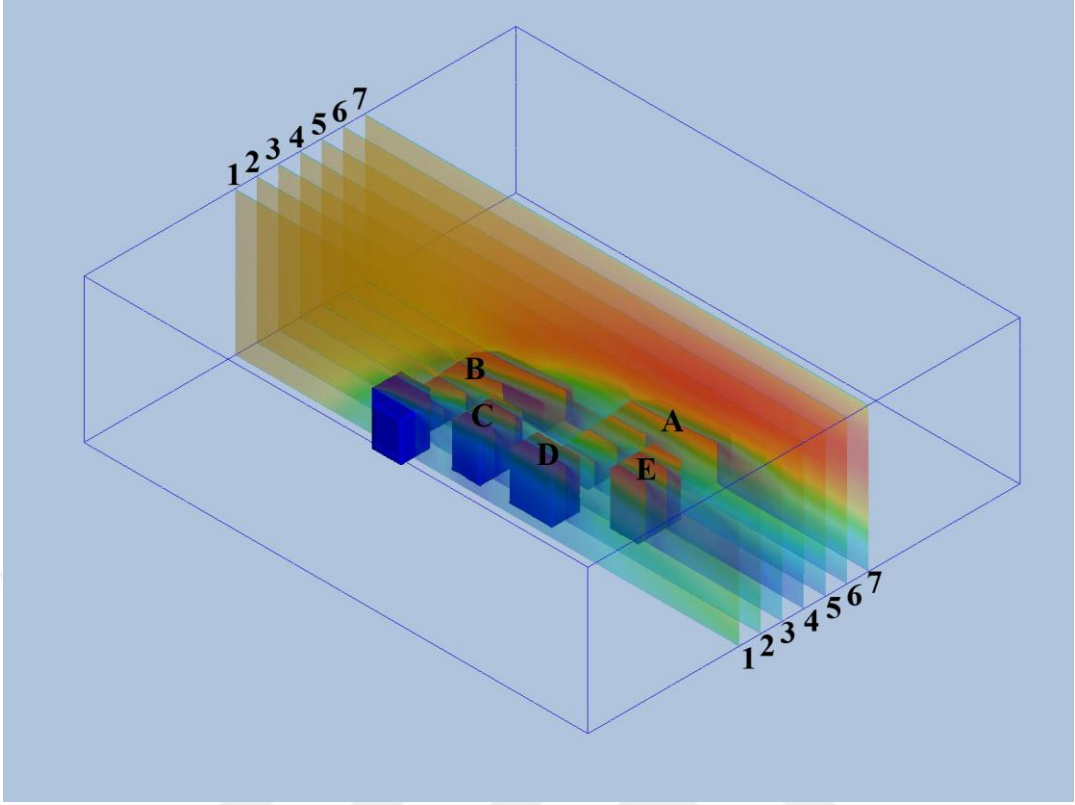
Şekil 61’de verilen şemada ikinci alternatif modeldeki yapıların batı yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren yatay (x-y) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 5 m aralıklarla oluşturulmuştur (yaya seviyesi kesiti zeminden 1,5 m yükseklikte, 6. katmanın 7. ve 5. katmana mesafesi 2,5 m). Kesitler sırasıyla Tablo 21’de verilmiştir. Tablo 21’de 1 numaralı katman yaya seviyesi rüzgâr akışını temsil etmektedir. 1 ve 2 numaralı katmanlardan görüldüğü üzere batı cephesinde kalan B blok yapısı rüzgâr akışının yönlendirilmesinde etkili olmuştur. Yapının bu formu sitenin rüzgâr akışının yüksek hızlı biçimde sitenin içine nüfuz etmesine engel olmuştur. 3 numaralı katmanda B blok yapısının farklı yükseklikteki bölümler rüzgârı yönlendirmiştir. 4 numaralı katmandan itibaren B blok yapısının üzerinden ve çevresinden aşırılan rüzgârın yüksek hızlara ulaştığı, diğer katmanlarda ise C, D, E bloktaki yapıların çevresinde rüzgâr akışının düşük ve orta hızlarda kaldığı görülmektedir. Gradyan oluşumları incelendiğinde site içerisinde yalnızca yapı yüksekliği arttıkça B bloğun B4 olarak isimlendirilen bölgesinin çevresinde rüzgâr akışının yüksek hızlara çıktığı ve birim alandaki hız değişiminin bu bölgede yüksek olduğu söylenebilir. Genel olarak yapıların bu formuyla batı (W) yönlü rüzgâra karşı aerodinamik performansının yüksek olduğu ve akışı yönlendirme yetisine sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 21. İkinci alternatif model için batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-y)

No	Analiz Sonucu (Standart k-ε Türbülans Modeli)
1	
2	
3	
4	

Tablo 21'in devamı

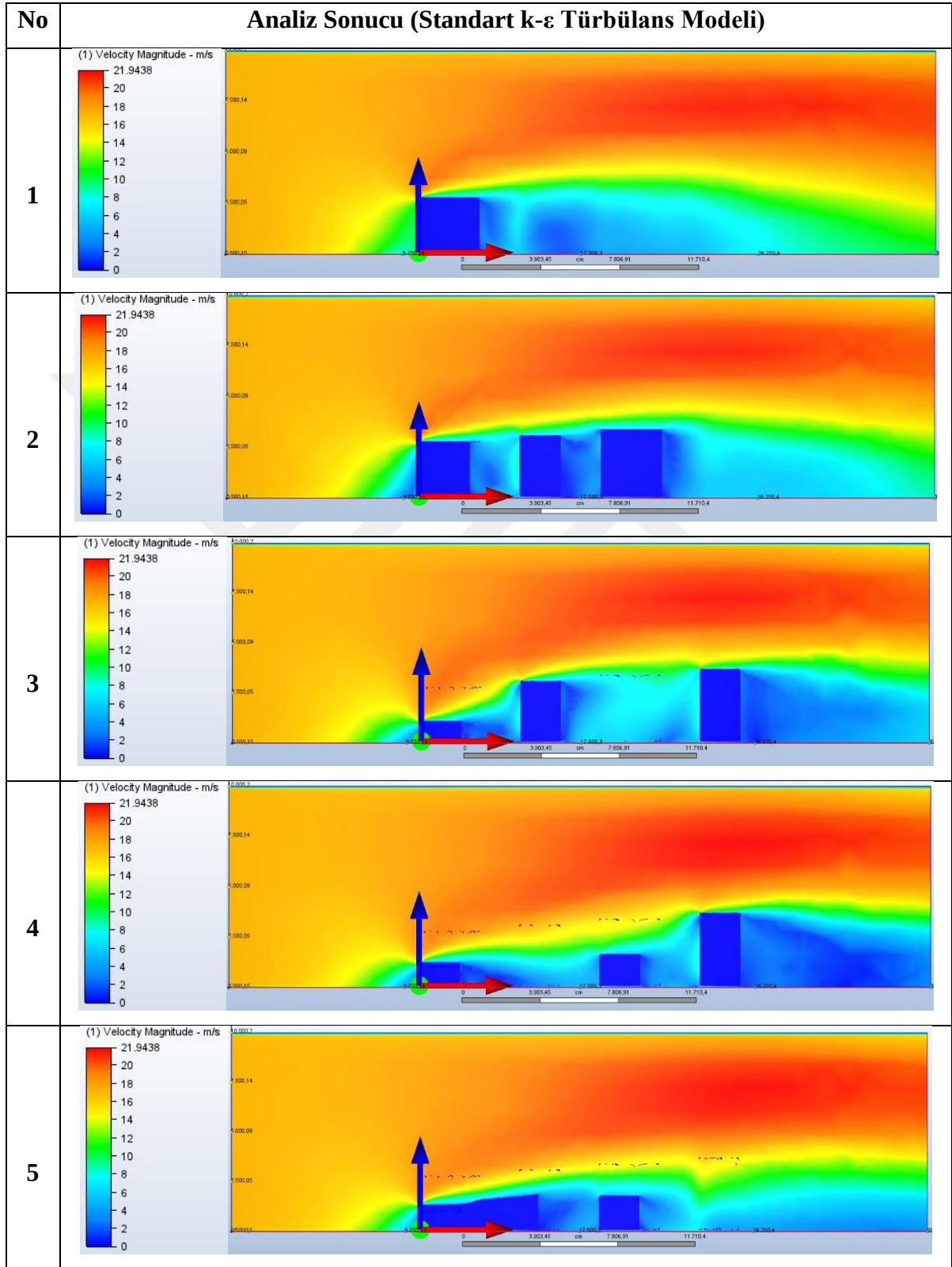




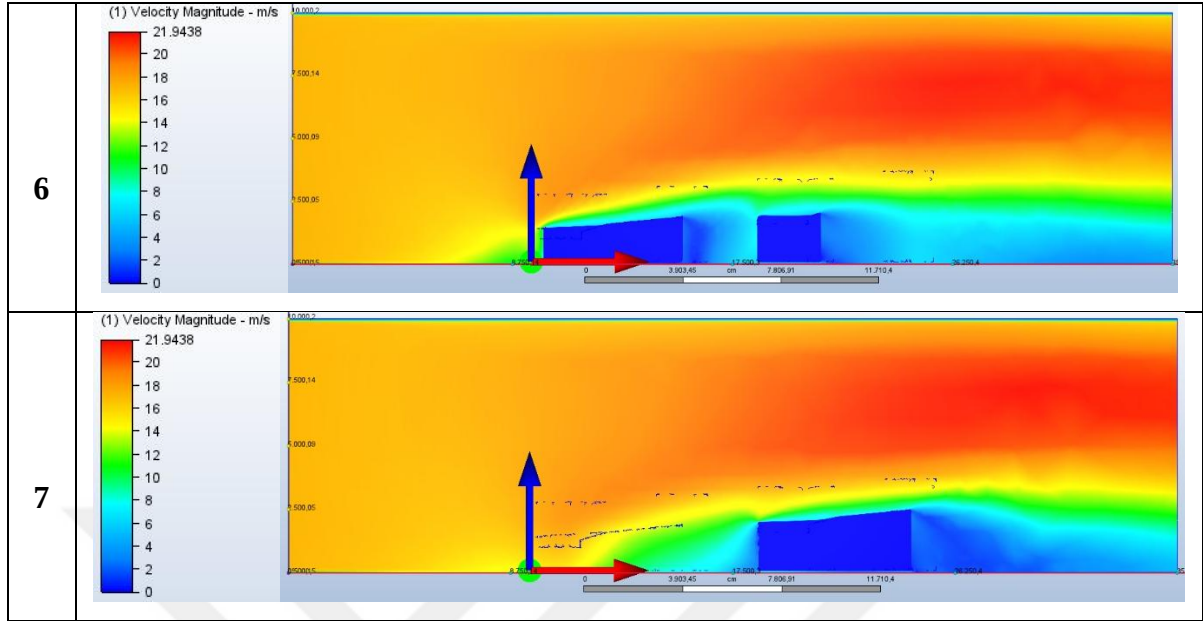
Şekil 62. Analiz sonuçlarından x-z düzleminde alınan kesitler ve numaraları

Şekil 62’de verilen şemada ikinci alternatif modeldeki yapıların batı yönlü rüzgâr etkileşimini gösteren düşey (x-z) eksenli kesitler yer almaktadır. Kesitler 12,5 m aralıklarla oluşturulmuştur. Kesitler sırasıyla Tablo 22’de verilmiştir. 1, 2 ve 3 numaralı katmanlar B, C, D bloklara etki eden rüzgâr akışını temsil etmektedir. Burada önemli olan nokta batıdan gelen rüzgârı yönlendirmek amacıyla yapıların kat sayısının ve yüksekliğinin buna göre düzenlenmiş olması ve bu durumun avantaj oluşturmıştır. 4, 5, 6 numaralı katmanlarda A, B, E bloklar arasında da benzer bir yapılanma görülmektedir. Ayrıca A ve B blok yapılarının kuzey cephesinde kalan bölgelerinde çatı örtüsü ve kat yükseklikleri rüzgârı yönlendirecek nitelikte tasarlanmıştır. Yapıların yüzeyine çarpan batı (W) yönlü yüksek hızlı rüzgâr doğuya doğru yönlendirilirken doğuda kalan yapılar bu akıştan daha az etkilenmektedir. Ayrıca yüksek hızlı rüzgâr bölgeleri bu sayede yapıdan daha uzakta oluşur. Örneğin; 7 numaralı katmanda yüksek hızlı rüzgâr bölgesi (kırmızı rengin yoğunlaştığı) yapıdan çok daha yüksekte oluşurken yapının üst örtüsünde orta hızlı rüzgâr görülmektedir.

Tablo 22. İkinci alternatif model için batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyon sonuçları (x-z)



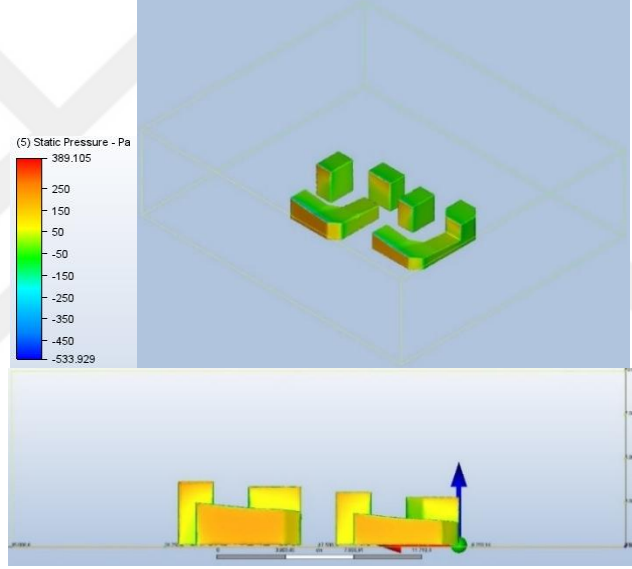
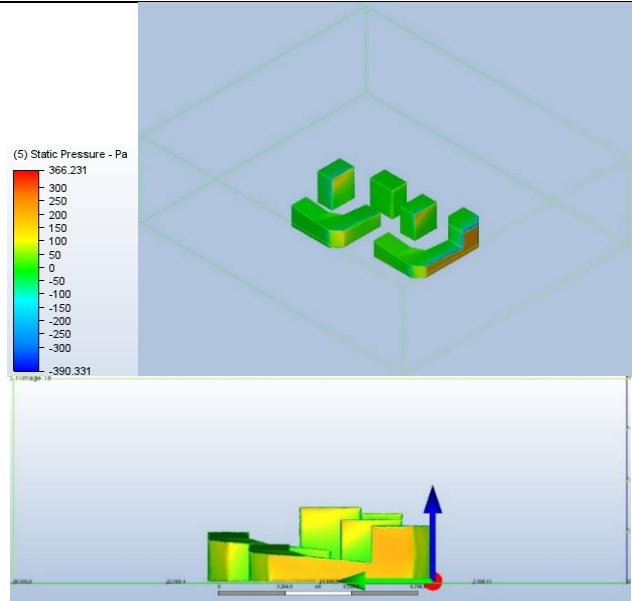
Tablo 22'nin devamı



3.3.3. İkinci Alternatif Modele Etki Eden Statik Basınç Kuvvetleri

Tablo 23'te tasarlanan alternatif modelin kuzey ve batı cephelerinde oluşan statik basınç kuvvetleri görülmektedir. Buna göre yeni yapılanmada yapıların kuzey cephelerine etki eden statik basınç kısmen düşmüş ve bloklara daha optimum seviyede dağılmıştır. Batı cephesindeki B blok batı yönlü (W) rüzgârda basınca maruz kalır, diğer bloklar bu durumdan daha az etkilenir; fakat orijinal yapı konfigürasyonundan daha iyi durumdadır.

Tablo 23. İkinci alternatif model için kuzey (N) ve batı (W) yönlü 17 m/s hızlı rüzgâr akışının HAD simülasyonunda yapılara etki eden statik basınç (Pa) değerleri

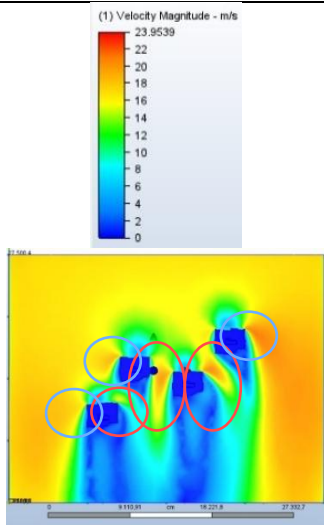
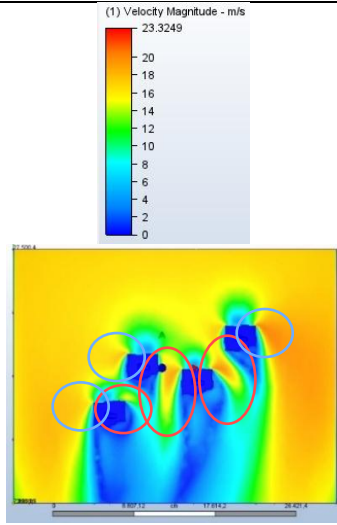
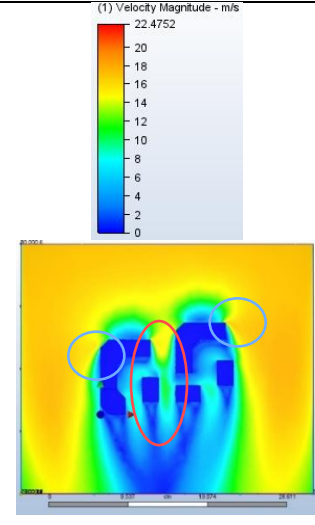
Yön	Yapılara Etki Eden Statik Basınç (Standart k-ε Türbülans Modeli)
N	
W	

3.4. Mevcut Yapı ve Alternatif Modellerin Karşılaştırılması

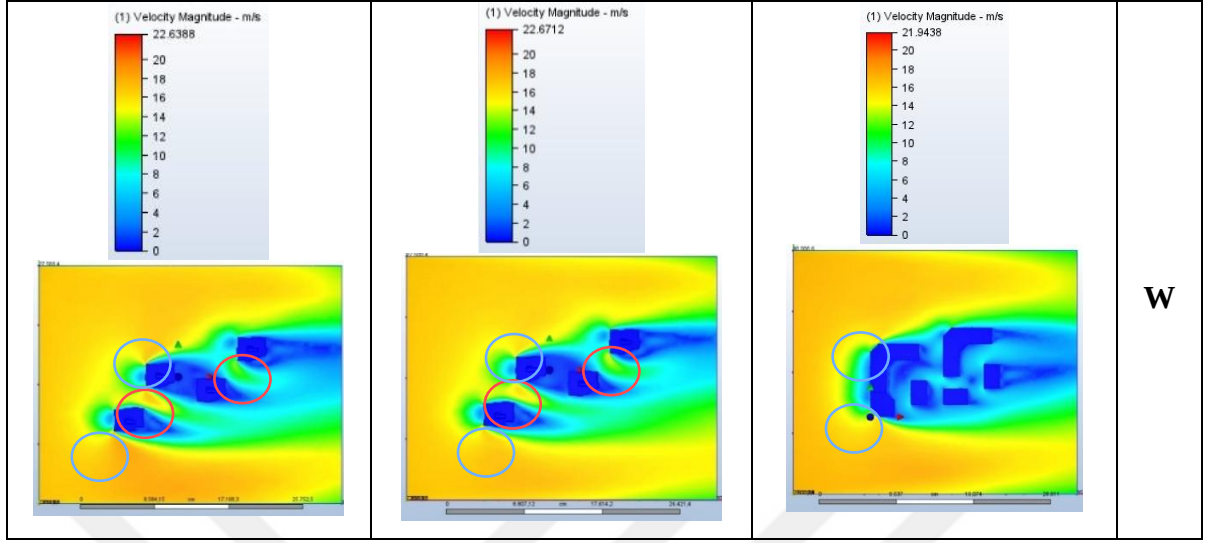
Bu bölümde çalışma alanındaki mevcut yapı konfigürasyonu ile bu alan için alternatif olarak sunulan iki modelin birbirleri arasındaki farklar, avantajlar ve dezavantajlar irdelenmiştir. Buna göre ilk olarak yapıların yaya seviyesindeki rüzgâr akış şemaları ele alınacaktır.

Tablo 24’te yapıların arasında birim alandaki hız değişimin yüksek olduğu ve rüzgâr konforu açısından problemlili gradyan bölgeler (kırmızı ile işaretlenmiş), mevcut yapılanmada daha sık görülürken birinci alternatif modelde yapı yüksekliği azaldığı için kısmen iyileşmiş olsa da ikinci alternatif modelde optimum seviyelere gelmiştir. Ayrıca yapıların dış hattında genellikle köşeli tasarımlardan kaynaklı olarak oluşan ve yapıların çevresini doğrudan etkileyen gradyan bölgelerde (mavi ile işaretlenmiş) de önemli bir değişim görülmüştür. Bu bölgeler yalnızca yapının bulunduğu alanı değil yapıların çevresinde bulunan başka siteleri ve yapıları da etkilediği için önem arz etmektedir. Mevcut yapılanma, birinci alternatif ve ikinci alternatif model arasındaki en önemli fark aerodinamik açıdan rüzgârı yönlendirebilme yeteneğidir. Özellikle ikinci alternatif modelin batı yönlü rüzgâr ile etkileşiminde bu durum dikkat çekmektedir. Bunların yanı sıra yapılan simülasyonlarda rüzgâr akış hızının (velocity) maksimum değerinin de tasarımın aerodinamik yapısına göre farklılık gösterdiği görülmektedir.

Tablo 24. Mevcut yapılanma ve alternatif modellerin kuzey (N) ve batı (W) yönlü yaya seviyesi rüzgâr akış analizi

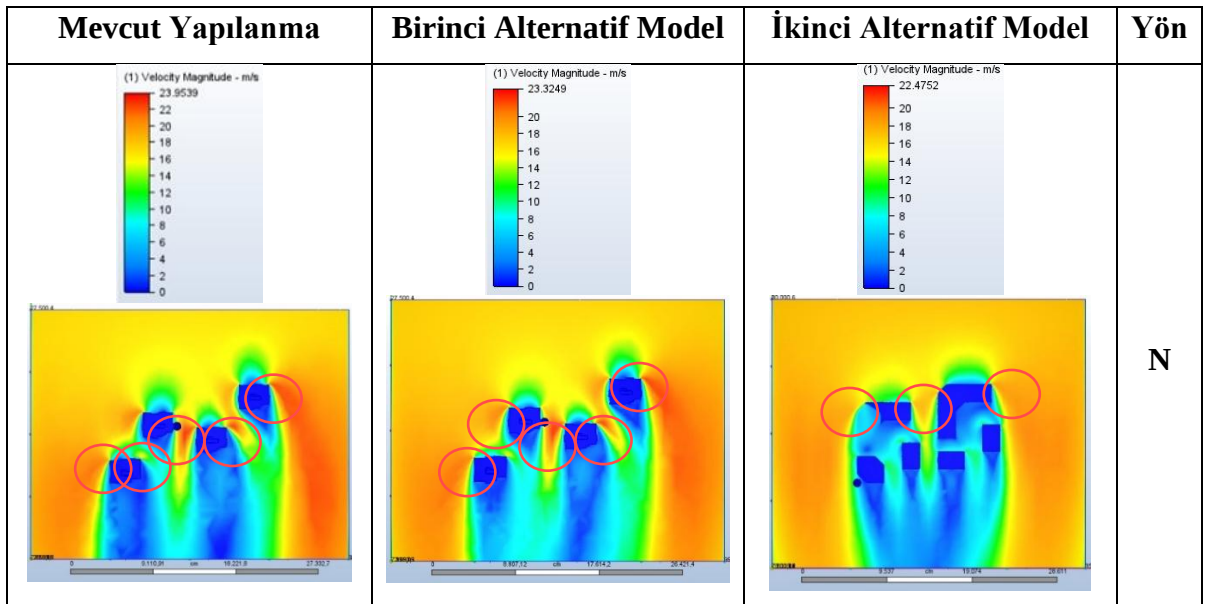
Mevcut Yapılanma	Birinci Alternatif Model	İkinci Alternatif Model	Yön
			N

Tablo 24'ün devamı

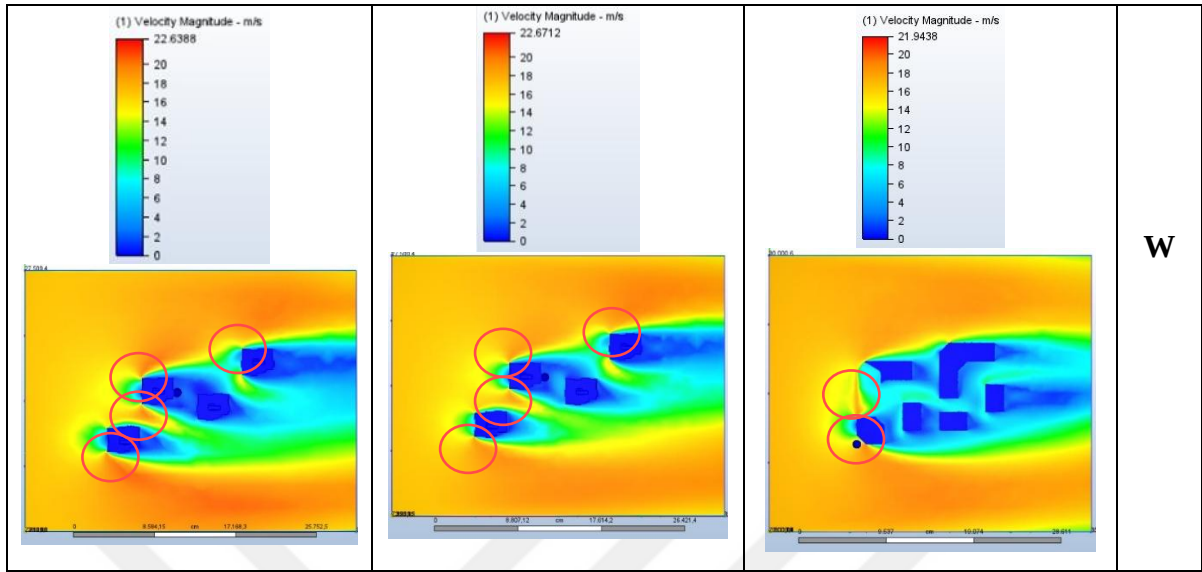


Tablo 25'te yapıların üst katlarındaki rüzgâr etkileşimleri gösterilmektedir. Yapılar arasında birim alandaki hız değişiminin yüksek olduğu gradyan bölgeler dikkati çeker. Mevcut yapılanma ve birinci alternatif modelde yapı yüksekliği arttıkça bu bölgelerdeki maksimum akış hızının (velocity) arttığı görülmektedir. Bu arzu edilmeyen bir durumdur. Mevcuttaki ve birinci alternatif modeldeki yapılarda köşeli tasarımdan kaynaklı aerodinamik dezavantajlı bölgeler görülür. Tabloda işaretlenen bölgeler yalnızca yapının rüzgarla etkileşimini değil akışın çevredeki yapılarla etkileşimini de olumsuz etkiler.

Tablo 25. Mevcut yapı ve alternatif modellerde yapıların üst katlarında oluşan kuzey (N) ve batı (W) yönlü rüzgâr etkileşimi

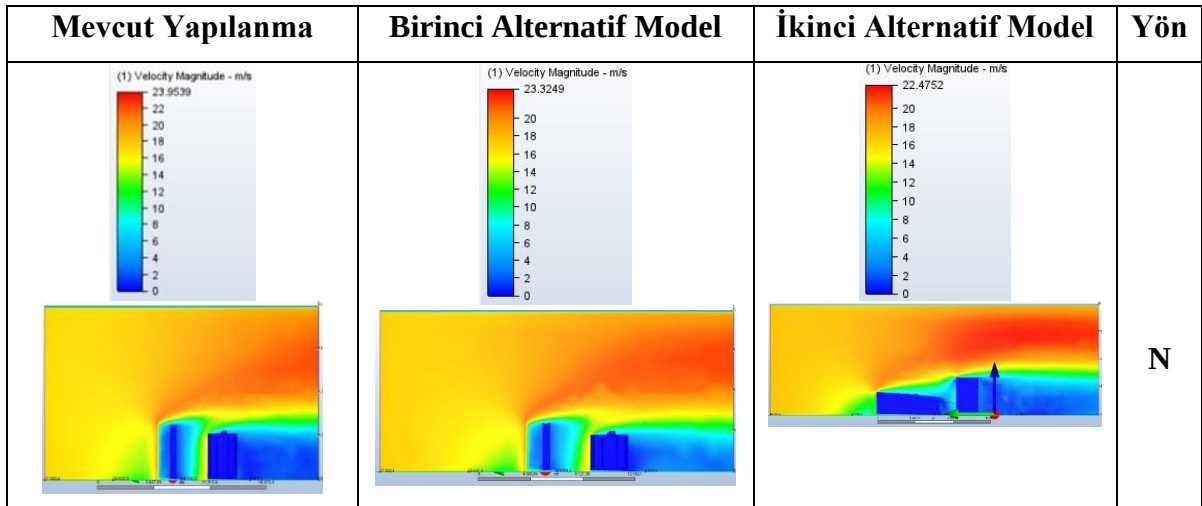


Tablo 25'in devamı

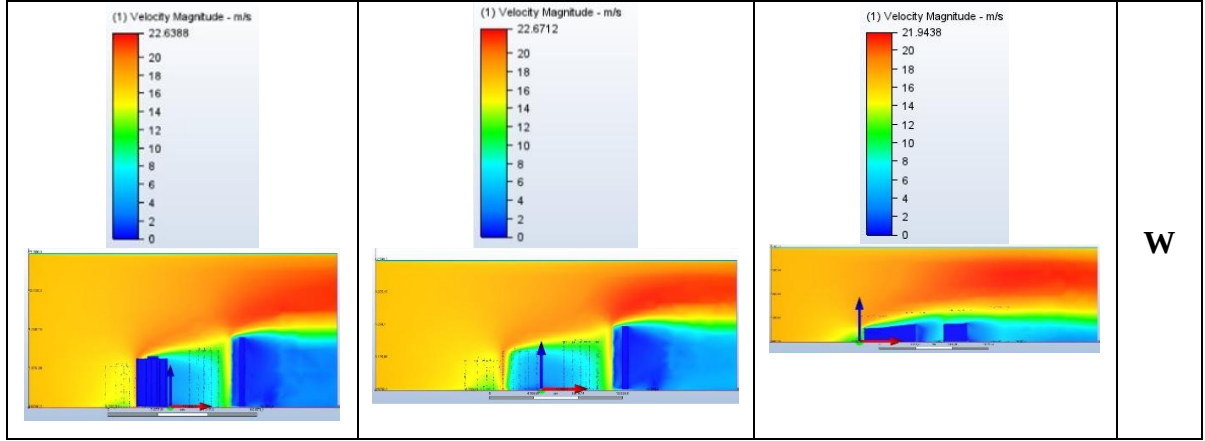


Tablo 26'da mevcut yapıların ve alternatif modellerin rüzgâr ile etkileşimi bazı düşey kesitler ile aktarılmıştır. Yapı yüksekliğinin arttıkça yapının çevresini de etkilediği ve yapılar arasında farklı hız bölgeleri oluştuğu görülmektedir. Mevcut durum ve birinci alternatif modelin rüzgarla ilk etkileşime giren yüksek katlı yapılar ile arkada bulunan yapılar arasında hız farkı yüksek bölgeler oluşmaktadır. Yapıların köşeli ve düz formları özellikle üst örtüde aerodinamik dezavantaj oluşturmaktadır. İkinci alternatif modelde sunulan yapı yükseklikleri ve rüzgârı yönlendiren üst örtü tasarımı yapıyı aerodinamik açıdan avantajlı kılmıştır. Maksimum hız değerleri bu modelde daha düşüktür.

Tablo 26. Mevcut yapılanma ve alternatif modellerde yapıların kuzey (N) ve batı (W) yönlü rüzgâr ile etkileşimini gösteren kesitler



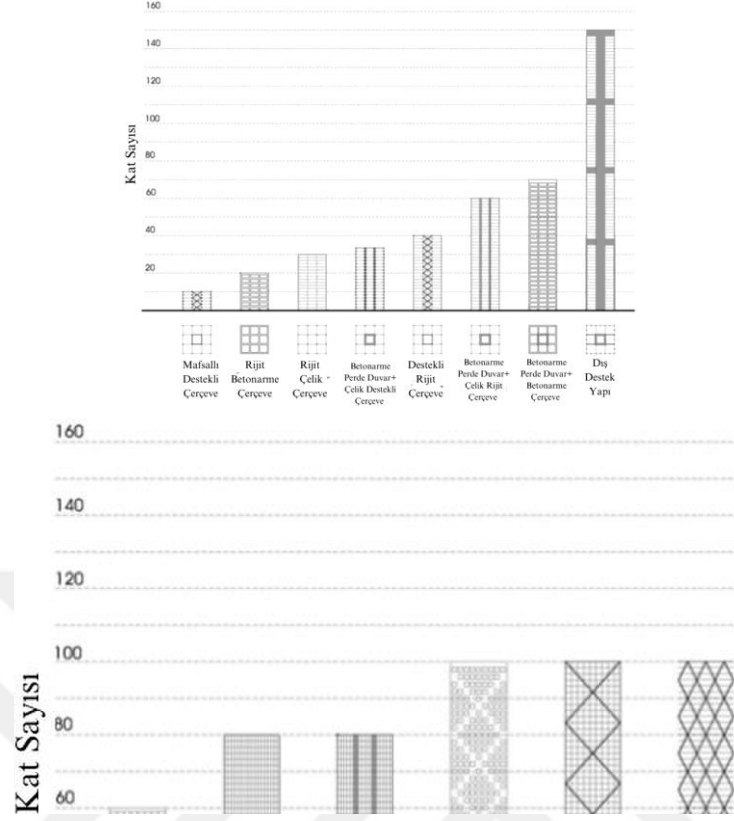
Tablo 26'nın devamı



Ayrıca çalışma kapsamında yapıların rüzgâr etkilerine karşı verdiği dinamik tepkiler ve cephelerde oluşan yoğun statik basınç strüktürel bağlamda da irdelenmiştir. Yapıların mevcut durumunda maksimum kat sayısı 27'dir. Buna göre 20 kat ve üzeri olan yapılarda dışta rijit bir betonarme çerçeve, yapının çekirdeğinde ise mafsalla destekli çerçeveler veya rijit betonarme çerçeveler kullanılabilmektedir. Mevcut durum ele alındığında yapının betonarme rijit çerçeve sistem olduğunu ve yapılardaki kat sayılarının sisteme uygun olduğu görülmüştür.

Yapılarda akışın yoğun gradyanlar ve türbülanslar oluşturduğu köşe noktaları strüktürel olarak önem arz eder. Bu noktalarda kullanılacak strüktürel sistemlerin en kesitleri, boyutları yapılan strüktürel analizlerin yanı sıra HAD simülasyonlarında bu bölgelerde oluşan akış ve dinamik tepkiler göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır. Yapıların tasarımı, yüksekliği, yapım tekniği ve kullanılan malzemeye göre mafsalla destekli çerçeveler, diagrid çerçeveler veya tüp sistemler kullanılabilir.

Yüksek yapılarda kat sayısı arttıkça yapıda akışkan ile oluşan dinamik tepkiler artacağından daha gelişmiş tipte strüktürel sistemlerin kullanılmasına ihtiyaç olur. Bu sistemler iç ve dış strüktürler olarak tanımlanabilir. İç strüktürel sistemler rijit veya destekli çerçeve sistemlerden oluşurken dış strüktürel sistemler tüp veya kafes sistemlerdir. Yüksek katlı yapı tasarımlarında bu sistemlerin betonarme, çelik veya hibrit çeşitli varyasyonları kullanılmaktadır. Şekil 63'te bu sistemlerin yapılarda yüksekliğe bağlı olarak kullanım senaryolarını göstermektedir (Ali & Moon, 2007). Performans bağlamında başarılı, yüksek katlı bir yapı inşa etmek kimi zaman farklı sistemleri bir arada kullanmayı ve özel çözümler üretmeyi gerektirmektedir.



Şekil 63. Yüksek katlı yapılarda iç ve dış strüktürel sistemler (Ali & Moon, 2007)

Bazı özel durumlarda yapılarda strüktürel elemanlar da akışkanların davranışlarına göre tasarlanabilmektedir. Örneğin; Londra’da yer alan 30 St Mary Axe yapısının tepe noktasında yer alan çelik halka strüktür, yapıda akış hızının maksimuma çıktığı bu noktada yapının diagrid dış strüktürünü birbirine bağlar ve oluşan yoğun statik basınca mukavemet gösterir (Şekil 64).



Şekil 64. 30 St Mary Axe (Foster+Partners) diagrid çerçeve strüktürel yapısı ve yapının tepesinde yer alan çelik halka strüktür (URL-4)

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, iç ve dış ortama odaklanarak bina performans simülasyonlarına HAD (CFD) uygulamalarına genel bir bakış açısı sunmuştur. Çalışmanın ilk bölümünde HAD'ın tanımı yapıldıktan sonra HAD'ın gelişimi, kullanıldığı sektörler ve deneysel uygulamalara göre avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Bu bölümde belirtildiği gibi HAD'a yönelik çalışmalar 1960'lardan itibaren hızlı bir ivme kazanmış ve 1990'larda yapılan RANS çalışmalarına ve günümüzde yapılan DES/LES/DNS gibi yöntemlere evrilmiştir. Bu süreçte pek çok sektör bu uygulamalardan faydalanırken mimarlık alanındaki gelişmeler pek çok sınırlayıcı faktörden dolayı günümüzü bulmuştur. Çalışmada HAD simülasyonlarının giderek daha geniş alanlarda kullanılabileceği ve özellikle bina ve kentsel alanlarda sürdürülebilir tasarım çözümlerine katkı sağlayacağı vurgulanmaktadır.

Mimarlıkta HAD'ın iç ve dış ortam tasarımındaki uygulamalarına yönelik çalışmalar çoğu zaman vaka tabanlı ve yapıda optimizasyona yöneliktir. İç ortam çalışmalarında HAD genellikle termal konfora yönelik; ortam sıcaklığı, radyant sıcaklık, havadaki nem ve hava akışı analizlerinde kullanılmaktadır. Dış ortam koşullarında HAD kentsel ölçekteki çalışmalar için sınırlayıcılar barındırsa da küçük ölçekli çalışmalar için uygulanabilir durumdadır. Literatürdeki birkaç kentsel ölçekteki çalışma haricinde çalışmaların çoğunluğu izole edilmiş yapıların performans tespiti üzerinedir. Dış ortama yönelik çalışmalar genellikle; yaya seviyesindeki rüzgâr, WDR (wind-driven-rain), konvektif ısı transferi, kirletici dağılımı, rüzgâr yükleri ve doğal havalandırma üzerinedir. Bu çalışmaların pek çoğunda HAD simülasyonları rüzgâr tünellerinde yapılan deneysel çalışmalarla desteklenmiş ve bir yandan HAD'ın doğruluğu test edilmiştir. Bu çalışma konularından hakkında en az çalışma yapılan konvektif ısı transferidir. Ayrıca HAD, iklim değişikliğine karşı alınacak önlemlerde ve yenilenebilir enerji sistemlerinin (rüzgâr türbinleri, güneş panelleri) bina entegrasyonunda etkili bir araç olarak kullanılabilmektedir. HAD simülasyonları, sadece tekil yapıların değil, aynı zamanda kentsel tasarım ve planlamada da kullanılabilecek güçlü bir araçtır. Kentsel hava akışları, rüzgârın yaya üzerindeki etkileri, hava kirliliği dağılımı ve doğal havalandırma sistemleri gibi faktörler HAD ile optimize edilebilmektedir. Bu, şehirlerde daha yaşanabilir, enerji verimli ve çevre dostu ortamlar yaratmak için HAD kullanımının artırılmasını teşvik etmektedir.

Yapıların ekstrem hava olaylarına (şiddetli rüzgâr, fırtına) karşı dayanıklılığının HAD ile analiz edilmesi, gelecekte bu simülasyonların daha kritik bir rol üstleneceğine işaret etmektedir. HAD yapıların tasarım sürecine dahil edilmesi durumunda yapısal kararların verilmesinde, oluşan dinamik tepkilerin strüktür üzerindeki etkilerinin izlenmesine yardımcı olabilmektedir. Ayrıca HAD simülasyonları, Bina Bilgi Modellemesi (BIM) teknolojileriyle entegre edilerek yapıların ömrü boyunca gerçek zamanlı performansının izlenmesini ve yönetimini sağlayarak maliyetlerin ve çevresel etkilerin azaltılmasını desteklemektedir.

HAD'ın yapısal uygulamalarında tartışılan konu genellikle yöntem ve modeldir. Literatürde yapılan pek çok çalışmada kararlı RANS metodu kullanılırken istisna olarak LES metodu kullanılan az sayıda çalışma da bulunur. LES'in akışı çözmedeki yetenekleri göz ardı edilemese de yapı ve kentsel alan gibi büyük ölçekli analizler için maliyet/fayda değerlendirmesi yapıldığında bu tür uygulamaların maliyetli olacağı ve doğrulamanın uzun zaman alacağı bilinmektedir. RANS metodu uygulama bağlamında verimli bir yöntemdir ve tasarımın ön aşamasında veya optimizasyonunda daha az maliyetle daha fazla fayda sağlamaktadır. Bir diğer metot olan URANS'ın ise genellikle kararsız akışları çözümleyeceği ve çözüm için yüksek çözünürlüklü çalışmalar gerektireceği için bunun yerine LES'in daha fazla tercih edildiği görülmüştür.

Tezin uygulama çalışması bölümünde Trabzon, Türkiye'de bulunan bir alan üzerinde vaka tabanlı bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygulama çalışması için Türkiye'deki literatürde mimarlıkta HAD kullanımıyla ilgili örnek sayısı oldukça az olduğu için çalışmaya genellikle Japonya ve Hollanda'da yürütülen örnek çalışmalar rehberlik etmiştir. Bu tür çalışmalar yalnızca literatürdeki değeri sebebiyle değil, sonrasında yayınlandıkları ülkelerde yasal standartların uygulanmasında öncü olmaları için önemlidir. Türkiye'de HAD'ın mimari tasarım ve inşaat projeleri için henüz geniş bir yasal çerçeveye oturtulmamış olması, çalışmanın yerel düzenlemeler açısından bir kaynak olabileceğini göstermektedir. Özellikle yüksek katlı yapıların rüzgâr performansı değerlendirmeleri için HAD simülasyonlarının zorunlu hale getirilmesi, yapı güvenliği ve kullanıcı konforu açısından önem arz etmektedir.

5. ÖNERİLER

HAD simülasyonları, yapıların aerodinamik performansını simüle etmenin ötesinde, iklim ve çevresel koşulların mimari tasarımlar üzerindeki etkisini incelemek için de önemli bir araç olarak kullanılabilir. Özellikle kentsel ısı adası etkisi, rüzgâr yönlendirmesi gibi iklimsel parametreler, yapıların enerji verimliliği ve konfor koşulları açısından kritik öneme sahiptir. Bu tür simülasyonlar sayesinde, binaların çevreleriyle olan etkileşimleri daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilir ve tasarım aşamasında enerji tüketimini azaltacak çözümler geliştirilmektedir.

Mimarlık alanında HAD'a yönelik yapılan vaka tabanlı çalışmalar irdelendiğinde çalışmaların genellikle tekil yapı veya bu yapının çevresinde yer alan az sayıdaki yapı ile rüzgâr etkileşimi sorunlarının ele alındığı görülmüştür. Bu tür çalışmalarda tartışma konusu olan faktör genellikle HAD çalışmasının metodudur. Tekil yapı çalışmalarında genellikle RANS metodu yeterli olurken, özellikle kentsel alanlarda yapılan çalışmalar için akışkan ve bölge hakkında genel bir fikir oluşturmak için kullanılabilir fakat yeterli değildir. Daha net sonuçlar elde edebilmek için bu tür çalışmalarda LES metodunun kullanılması önerilmektedir. Kentsel alanlarda yapılan LES tabanlı HAD simülasyonları, kentsel rüzgâr tüneli etkilerini ve mikroklimatik koşulları simüle etmek için kullanılabilir. Bu simülasyonlar, kent planlaması sırasında rüzgâr akışlarının optimize edilmesi, binaların doğal havalandırma performanslarının iyileştirilmesi ve kentsel alanlardaki ısı birikiminin azaltılması gibi tasarımsal kararların verilmesinde rehber olabilir. Bundan sonraki süreçte bu alanda yapılacak benzer literatür çalışmalarında ve ticari çalışmalarda; çalışmanın niteliği, ölçeği, finansal bütçesi ve zaman gibi faktörler göz önünde bulundurularak LES metodu tercih edilebilir.

Ek olarak, HAD simülasyonları sürdürülebilir mimari yaklaşımlar çerçevesinde, yeşil bina ve enerji etkin tasarım hedeflerine ulaşmak için kullanılabilir. Örneğin, doğal rüzgârın enerji üretiminde nasıl kullanılabileceği, bina çevresinde yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr türbinleri, güneş panelleri vb.) yerleşimi gibi konular HAD simülasyonlarıyla detaylı olarak incelenebilir. Bu doğrultuda, gelecekteki çalışmaların iklim değişikliği ve sürdürülebilirlik bağlamında HAD simülasyonlarına daha fazla yer vererek, mimari tasarım ve kentsel planlama süreçlerine entegre edilmesi önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abanto, J., Barrero, D., Reggio, M., & Ozell, B. (2004). Airflow modelling in a computer room. *Building and Environment*, 39(12), s. 1393-1402.
- Akkaş, M. (1990). *Trabzon İklim Etüdü*. Ankara: Başbakanlık Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü.
- Ali, M. M., & Moon, K. S. (2007). Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. *Architectural Science Review*, 50, s. 205-223.
- ASCE. (2002). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. *SEI/ASCE 7-02 Second Edition*. US: American Society of Civil Engineers.
- Awbi, H. B. (1991). *Ventilation of Buildings*. Chapman & Hall.
- Bilgen, S. (2019). *Investigation of Aerodynamic and Structural Features of Twisting Tall Buildings*. Master Thesis, Middle East Technical University, Department of Architecture, Ankara.
- Blocken, B., & Carmeliet, J. (2005). High-resolution wind-driven rain measurements on a low-rise building – experimental data for model development and model validation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(12), s. 905-928.
- Blocken, B., & Carmeliet, J. (2006). The influence of the wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(2), s. 101-127.
- Blocken, B., & Carmeliet, J. (2007). Validation of CFD simulations of wind-driven rain on a low-rise building facade. *Building and Environment*, 42(7), s. 2530-2548.
- Blocken, B., & Carmeliet, J. (2008). Pedestrian wind conditions at outdoor platforms in a high-rise apartment building: generic sub-configuration validation, wind comfort assessment and uncertainty issues. *Wind and Structures*, 11(1), s. 51-70.
- Blocken, B., & Persoon, J. (2009). Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(5-6), s. 255-270.
- Blocken, B., Defraeye, T., Derome, D., & Carmeliet, J. (2009). High-resolution CFD simulations for convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building. *Building and Environment*, 44(12), s. 2396-2412.
- Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., & Hensen, J. (2011). Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment: an overview. *Journal of Building Performance Simulation*, 4(2), s. 157-184.

- Briggen, P. M., Blocken, B., & Schellen, H. L. (2009). Wind-driven rain on the facade of a monumental tower: numerical simulation, full-scale validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 44(8), s. 1675-1690.
- Chen, Q., & Srebric, J. (2000). Application of CFD Tools for Indoor and Outdoor Environment Design. *International Journal on Architectural Science*, 1(1), s. 14-29.
- Chen, Q., Peng, X., & van Paassen, A. H. (1995). Prediction of room thermal response by CFD technique with conjugate heat transfer and radiation models. *ASHRAE Transactions*, 101(2), s. 50-60.
- Clannachan, G. H., Lim, J. B., Bicanic, N., Taylor, I. J., & Scanlon, T. J. (2009). Practical application of CFD for wind loading on tall buildings. In *7th International Conference on Tall Buildings*, (s. 767-776).
- Den Hartog, J. P., Koutamanis, A., & Luscure, P. G. (2000). Possibilities and limitations of CFD simulation for indoor climate analysis. *Fifth Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning-Part one: Architecture Proceedings*, s. 152-167.
- Engin, İ. (2004). Trabzon'da Fırtınalar. *Doğu Coğrafya Dergisi*(12), s. 119-141.
- Fadıl, A. C. (2022). *Aeroacoustic Investigation of Unsteady Transonic Cavity Flow via OpenCFD Source Codes*. İstanbul Technical University, Department of Defense Technologies, Master Thesis, İstanbul.
- Gadilhe, A., Janvier, L., & Barnaud, G. (1993). Numerical and experimental modelling of the three-dimensional turbulent wind flow through an urban square. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*(46-47), s. 755-763.
- Gousseau, P., Blocken, B., Stathopoulos, T., & van Heijst, G. J. (2011). CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: a case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal. *Atmospheric Environment*(45), s. 428-438.
- Gürses, P. (2012). *Yapılara Etki Eden Rüzgâr Yüklerinin Eurocode 1-4 ve Asce 7-05 Standartları Kullanılarak Karşılaştırılması*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Hayashi, T., Ishizu, Y., Kato, S., & Murakami, S. (2002). CFD analysis on characteristics of contaminated indoor air ventilation and its application in the evaluation of the effects of contaminant inhalation by a human occupant. *Building and Environment*, 37(3), s. 219-230.
- He, J., & Song, C. C. (1999). Evaluation of pedestrian winds in urban area by numerical approach. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*(81), s. 295-309.

- Hu, Y., Peng, Y., & Gao, Z. (2023). Application of CFD plug-ins integrated into urban and building design platforms for performance simulations: A literature review. *Frontiers of Architectural Research*, 12(1), s. 148-174.
- İBB. (2009). İstanbul Yüksek Binalar Rüzgâr Yönetmeliği. İstanbul: İstanbul Büyükşehir Belediyesi İmar Müdürlüğü.
- ISO. (2009). Hygrothermal performance of buildings – Calculation and presentation of climatic data – Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data . *ISO 15927-3:2009*. International Organization for Standardization.
- Jameson, A. (1995). Optimum Aerodynamic Design Using CFD and Control Theory. *12th Computational Fluid Dynamics Conference, Control and Optimization*, (s. 495-528).
- Jameson, A. (2012). Computational Fluid Dynamics: Past, Present and Future. *Future Directions in CFD Research National Institute for Aerospace*. Hampton, VA.
- Jo, S., Jones, J., & Grant, E. (2018). Trends in the application of CFD for architectural design. *ARCC – EAAE 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE*.
- Karadeniz, Y. (1995). *Trabzon ve Çevresinin İklimi*. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Kim, T., Kato, S., Murakami, S., & Rho, J. (2005). Study on indoor thermal environment of office space controlled by cooling panel system using field measurement and the numerical simulation. *Building and Environment*, 40(3), s. 301-310.
- Kır, G., Keskin, A. Ü., & Zeybekoğlu, U. (2023). Karadeniz Bölgesi Meteoroloji Gözlem İstasyonlarının Rüzgâr Hızı Değerleri Kullanılarak Kümelenmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 13(1), s. 44-58.
- Kirişçi, V. (2016). *Osman Gazi Köprüsüne Etkiyen Rüzgâr Yüklerinin HAD Metodu ile İncelenmesi*. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Llarena, J., Cabezuelo, L., & Bilbao, A. (2018). Application of CFD simulations of wind-driven rain (WDR) on the new roof extension for San Mames new football stadium. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*(178), s. 105-111.
- Ören, T. I. (2006). Benzetim: Temel Kavramlar ve İlerlemeler. *Türkiye Bilişim Ansiklopedisi*.
- Roudsari, M., & Pak, M. (2014). Ladybug: A Parametric Environmental Plugin for Grasshopper to Help Designers Create an Environmentally-Conscious Design. *13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association (BS2013)*. Chambery, France.

- Shireen, T. S., & James, H. H. (2017). Wind Analysis of Tall Building in Duhok City Using Computational Fluid Dynamic (CFD). *Journal of University of Duhok*, 20(1), s. 520-536.
- Tamura, T., Nozawa, K., & Kondo, K. (2008). AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10-11), s. 1974-1984.
- Tang, W., & Davidson, C. I. (2004). Erosion of limestone building surfaces caused by wind-driven rain. 2. Numerical modelling. *Atmospheric Environment*, 38(33), s. 5601-5609.
- Tominaga, Y., & Stathopoulos, T. (2007a). Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building - influence of turbulence models and turbulent Schmidt number. *Proc. 12th Int. Conf. Wind Engineering*. Cairns, Australia.
- Tominaga, Y., & Stathopoulos, T. (2007b). Turbulent Schmidt numbers for CFD analysis with various types of flowfield. *Atmospheric Environment*, 41(37), s. 8091-8099.
- Tominaga, Y., & Stathopoulos, T. (2008). Numerical simulation of plume dispersion around an isolated cubic buildings: comparisons between RANS and LES computations. *BBA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications*. Milano, Italy.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10-11), s. 1749-1761.
- TSE. (2007). Yapılar Üzerindeki Etkiler- Bölüm 1-4: Genel Etkiler- Rüzgâr Etkileri (Eurocode 1). *TS EN 1991-1-4*. Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE. (2021). Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri. *TS 498*. Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.
- URL-1. (2024, Mayıs 23). https://en.wikipedia.org/wiki/Kármán_vortex_street#cite_note-1 adresinden alındı
- URL-2. (2024, Şubat 21). <https://parselsorgu.tkgm.gov.tr/#ara/cografi/40.961136672130955/39.8524546623> adresinden alındı
- URL-3. (2024, Şubat 21). <https://marincitytrabzon.com/> adresinden alındı
- URL-4. (2024, Kasım 6). <https://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe> adresinden alındı
- van Hooff, T., & Blocken, B. (2010a). Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium. *Environmental Modelling & Software*, 25(1), s. 51-65.

- van Hooff, T., & Blocken, B. (2010b). On the effect of wind direction and urban surroundings on natural ventilation of a large semi-enclosed stadium. *Computers & Fluids*(39), s. 1146-1155.
- von Karman, T. (1963). *Aerodynamics*. McGraw-Hill Paperbacks, Cornell University Press.
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*. Seventh Edition.
- Wu, Y. C., Yang, A. S., Tseng, L. Y., & Liu, C. L. (2011). Myth of ecological architecture designs: Comparison between design concept and computational analysis results of natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia. *Energy and Buildings*, 43(10), s. 2788-2797.
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., & Speziale, C. G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A*, 4(7), s. 1510-1520.
- Yoshie, R., Mochida, A., Tominaga, Y., Kataoka, H., Harimoto, K., Nozu, T., & Shirasawa, T. (2007). Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9-11), s. 1551-1578.
- Zhai, Z. (2006). Application of computational fluid dynamics in building design: aspects and trends. *Indoor and Built Environment*, 15(4), s. 305-313.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Fatih AYHAN, ilköğrenimini Yavuz Selim İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2014 yılında Gümüşhane Türk Telekom Fen Lisesi'nde (GTTFL) tamamladı. 2015-2016 öğretim yılında Atatürk Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Mimarlık bölümünde lisans eğitimine başladı. 2019 yılında bu bölümden mezun oldu. Ertesi yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. Yüksek lisans eğitimini devam ettirirken bina performans simülasyonları ve yapı bilgisi alanında çalışmalar yürütmüştür. İyi derece İngilizce bilmektedir.

Yayınlar: Ayhan, M. F., Aydın, Ö. (2023), CFD Applications and Approaches in Indoor and Outdoor Design, Recent Advances in Natural and Engineering Sciences, Chapter VI, 87-106.