



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



## Açılı konumlandırılmış iki bina arasındaki açının hız ve basınç dağılımı üzerine etkisinin sayısal incelenmesi

*Numerical investigation of the effect of angle between angularly positioned two buildings on velocity and pressure distribution*

Yazar(lar) (Author(s)): Tekmile CÜREBAL<sup>1</sup>, Yücel ÖZMEN<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-9156-5917

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-1127-1060

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Cürebal T., Özmen V., “Açılı konumlandırılmış iki bina arasındaki açının hız ve basınç dağılımı üzerine etkisinin sayısal incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(1): 361-371, (2022).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.674761

# Açılı Konumlandırılmış İki Bina Arasındaki Açının Hız ve Basınç Dağılımı Üzerine Etkisinin Sayısal İncelenmesi

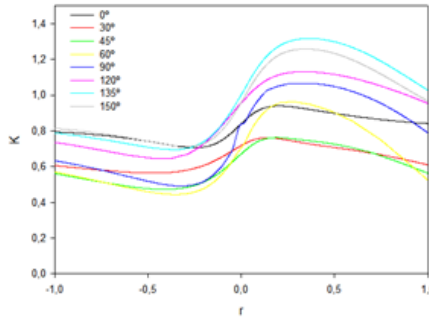
## Numerical Investigation of the Effect of Angle Between Angularly Positioned Two Buildings on Velocity and Pressure Distribution

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ İki bina arası açının hız dağılımına etkisi/The effect of angle between buildings on velocity distribution
- ❖ İki bina arası açının basınç dağılımına etkisi/The effect of angle between buildings on pressure distribution
- ❖ Standart k-ε modelin deneysel verilerle uyumu/Accordance of Standard k-ε model with experimental data

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Genişleyen geçitlerdeki K değerleri, daralan geçitlerdeki K değerlerinden çok daha büyük olarak elde edilmiştir./The K values in the diverging passages were obtained much greater than the K values in the converging passages.



**Şekil.** Tüm bina düzenleri için, binalar arasındaki geçidin merkez çizgisi boyunca elde edilen K değişimleri/**Figure.** K variations obtained along the centerline of the passage between all building configurations

### Amaç (Aim)

Farklı bina açılarının hız ve basınç dağılımları üzerindeki etkisinin ayrıntılı olarak incelenmesi amaçlanmıştır./The aim of the study is to examine the effect of different building angles on velocity and pressure distributions

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Bu çalışmada, açılı konumlandırılmış iki bina modeli etrafındaki akış alanlarının sayısal çözümü Ansys Fluent® paket programının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir./In this study, the numerical solution of the flow fields around two angularly positioned building models was carried out using Ansys Fluent® software.

### Özgünlük (Originality)

Bu çalışmada, binalar arasındaki açının 0°-180° arasında değiştiği 8 farklı bina konfigürasyonu için, açısal değişimin hız ve basınç dağılımları üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir./In this study, the effect of angular change on velocity and pressure distributions for 8 different building configurations where the angle between buildings varies between 0° -180° has been examined in detail.

### Bulgular (Findings)

Standart k-ε türbülans modelinin kullanılmasıyla elde edilen sonuçların, deneysel verilerle daha uyumlu olduğu görülmüştür./It is seen that the results obtained by using the Standard k-ε turbulence model has more compatible with the experimental data.

### Sonuç (Conclusion)

Hız ve basınç dağılımlarının binalar arasındaki açının değişiminden etkilendiği görülmüştür./It has been observed that the velocity and pressure distributions are affected by the variation of the angle between buildings.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. /The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.9

# Açılı Konumlandırılmış İki Bina Arasındaki Açının Hız ve Basınç Dağılımı Üzerine Etkisinin Sayısal İncelenmesi

(Bu çalışma ULIBTK 2019 konferansında sunulmuştur. / This study was presented at ULIBTK 2019 conference.)

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Tekmile CÜREBAL\*, Yücel ÖZMEN**

Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye  
(Geliş/Received : 15.01.2020 ; Kabul/Accepted : 04.12.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 16.12.2020)

## ÖZ

Bu çalışmada, açılı konumlandırılmış iki bina modeli etrafındaki akış alanlarının üç boyutlu sayısal çözümü gerçekleştirilmiştir. Çözümlerde Standard k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε ve Standard k-ω türbülans modelleri karşılaştırmalı olarak kullanılmış ve açılı konumlandırılmış bina modelleri etrafındaki akış için türbülans modellerinin duyarlılıkları araştırılmıştır. Türbülans modellerinin deneysel veriler karşısındaki duyarlılıkları incelendiğinde, Standard k-ε türbülans modelinin kullanılmasıyla elde edilen sonuçların, deneysel verilerle daha uyumlu olduğu görülmüştür. Farklı bina açıları için gerçekleştirilen bu çalışmada, akış alanının tamamına ait hız ve basınç dağılımları Reynolds sayısının  $7,7 \times 10^5$  değeri için ayrıntılı olarak incelenmiştir. Genişleyen geçitlerde, binalar arasındaki geçidin merkezi çizgisi boyunca elde edilen K değerleri, daralan geçitlerdeki K değerlerinden çok daha büyük olarak elde edilmiştir. Binalar arasındaki açının  $0^\circ$ - $180^\circ$  arasında değiştiği 8 farklı bina konfigürasyonu için, açısız değişimin bina modelleri yüzeyindeki basınç katsayısı dağılımlarına etkisi incelendiğinde, daralan ve genişleyen bina konfigürasyonlarında, en kritik negatif basınç katsayısı değerlerinin binalar arasındaki açının değişiminden etkilendiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Bina aerodinamiği, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, türbülanslı akış, türbülans modeli.

## Numerical Investigation of the Effect of Angle Between Angularly Positioned Two Buildings on Velocity and Pressure Distribution

### ABSTRACT

In this study, a three-dimensional numerical solution of the flow fields around two angularly positioned building models is realized. In the solutions, Standard k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε and Standard k-ω turbulence models were used comparatively and the performances of turbulence models were investigated for flow around two angularly positioned building models. The performances of turbulence models were examined and when compared with experimental data, it is seen that the results obtained by using the Standard k-ε turbulence model has more compatible with the experimental data. For different building angles, the velocity and pressure distributions in the entire flow fields were examined at the Reynolds number  $7,7 \times 10^5$  in detail. In the diverging passages, the K values obtained along the center line of the passage between the buildings were obtained much greater than the K values in the converging passages. When the effect of angular change on the pressure coefficient distributions on the surface of building models is examined for the 8 different building configurations where the angle between buildings varies between  $0^\circ$  - $180^\circ$ , it has been seen that the most critical negative pressure coefficient values are affected by the change in angle between the buildings in the diverging and converging building configurations.

**Keywords:** Building aerodynamics, computational fluid dynamics, turbulent flow, turbulence model.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan nüfusun etkisiyle bina gruplarından oluşan yaşam alanlarının sayısı da hızla artmaktadır. Bu durum, tek bir bina-rüzgar etkileşiminin yanı sıra, binaların birbiri üzerinde oluşturduğu etkilerin de araştırılmasını gerektirmektedir. Birden fazla binadan oluşan bina gruplarında, rüzgar genellikle binalar arasındaki geçitlerden akmaya zorlanmakta ve buradaki rüzgar

koşulları tek bir bina etrafındaki rüzgar koşullarına göre farklılıklar göstermektedir. Binalar arasındaki geçitlerdeki rüzgar koşulları, binaların yüksekliği ve genişliği gibi geometrik değişiklikler, binalar arasındaki mesafe ve açı gibi binaların birbirlerine göre konumları, rüzgar yönü ve şiddeti gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Literatürde, binalar arasındaki geçitteki rüzgar koşullarının incelendiği çalışmaların çoğu paralel olarak konumlandırılmış iki bina grubu arasındaki geçitlere odaklanmıştır [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Paralel olmayan binalar arasındaki geçitlerdeki rüzgar koşullarının incelendiği araştırma sayısının oldukça az olduğu ve yapılan

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : tekmilecurebal@ktu.edu.tr

çalışmaların binalar arasındaki dar geçidin merkez hattı boyunca elde edilen yaya seviyesindeki hız ve türbülans yoğunluğu dağılımlarına odaklandığı görülmektedir. Blocken vd [7], dar iki bina arasındaki açının 45° ve 135° olduğu daralan ve genişleyen durumlar için, bina yüksekliğinin, binalar arasındaki geçit genişliğinin ve farklı rüzgar geliş yönlerinin yaya seviyesindeki rüzgar koşullarına etkisini deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında, daralan bina düzenlerinde bina geçidinin merkezinde ölçülen rüzgar hızı amplifikasyon faktörlerinin, genişleyen bina düzenlerinde ölçülen değerlerden genellikle daha yüksek çıktığını ve maksimum rüzgar hızı amplifikasyon faktörlerinin geçidin genişlik-yükseklik oranının azalması ile monoton olarak arttığını belirlemişlerdir. Blocken vd [8] tarafından, iki bina arasındaki açının 45° ve 135° olduğu daralan ve genişleyen durumlar için, bina yüksekliği ile binalar arasındaki geçit genişliğinin yaya seviyesindeki rüzgar koşullarına etkisinin Realizable k-ε türbülans modelini ile sayısal olarak incelendiği diğer bir çalışmada, rüzgar hızının zemin seviyesine yakın bir artış göstermesine karşın, daralan geçitlerin üst kısmında yatay rüzgar hızının azaldığı ve blokaj etkisi nedeniyle, rüzgarın büyük bir bölümünün geçitten içeri girmek yerine binalar etrafından akmaya zorlandığı saptanmıştır. Li vd [9], bina açılarının 0° ile 180° arasında değiştiği 12 durum için, binalar arasındaki dar geçitte oluşan rüzgar koşullarını sayısal olarak incelemişlerdir. Standard k-ε türbülans modelini kullandıkları çalışmada, daralan bina düzeninde, binalar arasındaki geçitteki rüzgar hızının daha düşük, sürtünme katsayısının daha yüksek ve blokaj etkisinin daha baskın olduğunu belirtmişlerdir. Allegrini ve Lopez [10], iki bina arasındaki açısal konfigürasyonların yerel rüzgar durumu üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Binalar arasındaki geçitte, yerden çatı seviyesine kadar, PIV ölçümleriyle elde ettikleri rüzgar hızının, daralan bina konfigürasyonları için açının artmasıyla arttığını, genişleyen bina konfigürasyonları için ise açının artmasıyla azaldığını belirlemişlerdir.

Literatürde, farklı bina konfigürasyonları etrafındaki rüzgar etkilerinin incelendiği çok sayıda sayısal çalışma bulunmaktadır. Binaların geometrik özellikleri, binalar etrafında oluşan hava akışını etkilediğinden, yaya seviyesinde ortaya çıkan istenmeyen rüzgar etkilerini azaltmak için özel bina tasarımları kullanılmaktadır. Binalarda yükseltme yapılarak gerçekleştirilen geometrik değişiklikler, yaya seviyesindeki rüzgar konforunu arttırmaktadır [11, 12, 13, 14]. Yaya konforuna yönelik sayısal çalışmalarda Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerini çözen modeller etkin olarak kullanılmaktadır. Özellikle Standard k-ε türbülans modeli, cadde kanyonlarındaki rüzgar etkilerinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Asfour [16], binaların pasif soğutma potansiyellerini artırmak için farklı bina konfigürasyonlarını sayısal olarak incelemiştir. Standard k-ε modelinin kullanıldığı çalışmada, aşamalı bina düzenlemesinin, bölgeye daha fazla rüzgarın girmesine

yardımcı olması nedeniyle doğal havalandırma potansiyelini iyileştirdiğini gözlemlemiştir. Ramponi vd. [17], binalar arasındaki genişliğin eşit ve farklı olduğu durumlara ait cadde kanyonlarındaki rüzgar etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Standard k-ε, RNG k-ε ve Realizable k-ε şeklinde üç farklı türbülans modelinin kullanıldığı çalışmada, deneysel verilerle en uyumlu sonuçlar, Standard k-ε türbülans modeli ile elde edilmiştir. Fan vd. [18], bina modellerinin zeminlerinde bulunan farklı açıklıkların yaya seviyesindeki hava kirletici konsantrasyonları üzerindeki etkisini Standard k-ε türbülans modeli ile incelemişlerdir.

Bu çalışma konusu ile ilgili literatür incelendiğinde, açılı konumlandırılmış binalar etrafındaki akış alanlarının araştırılmasına yönelik çalışmaların az sayıda olduğu ve mevcut çalışmaların binalar arasındaki geçitle sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak, binalar arasındaki açının 0°-180° arasında değiştiği 8 farklı bina konfigürasyonu için, açısal değişimin akış alanının tamamına ait hız ve basınç dağılımları üzerindeki etkisinin ayrıntılı olarak incelenmesi ve hesaplanmış akış alanı görüntülerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır.

## 2. SAYISAL ÇALIŞMA (NUMERICAL STUDY)

Son zamanlarda bilgisayarların çözüm yeteneklerindeki iyileşme ve yeni sayısal yaklaşımlardaki gelişmelerle birlikte, yaya seviyesindeki rüzgar koşullarının incelenmesinde, rüzgar tüneli çalışmalarına alternatif olarak, sayısal çalışmalar da giderek yaygınlaşmaktadır [19, 20, 21, 22, 23, 24]. Sayısal yaklaşımlar kullanılarak, akış alanlarıyla ilgili kapsamlı analizler daha ekonomik ve hızlı olarak yapılabilmektedir. Sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların güvenilirliği, deneysel verilerle olan uyumları ölçüsünde olmaktadır.

Mevcut çalışmada, sayısal analizler, ticari bir yazılım olan Ansys Fluent® paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada incelenen türbülanslı akış alanları, farklı türbülans modelleri ile çözülmüş ve deneysel veriler karşısında türbülans modellerinin hassasiyetleri denenmiştir. Kullanılan sayısal yaklaşımlar modellenmek istenen akış alanının özelliklerine uygun olarak, Ansys Fluent® programının kuramsal bilgi dokümanında sunulan bilgilerden yararlanılarak seçilmiştir [25]. Sayısal analizler, daha düşük simülasyon karmaşıklığı içeren ve daha az hesaplama zamanı ile rüzgar konfor çalışmalarında yeterli doğrulukta sonuçlar veren RANS temelli modellerle gerçekleştirilmiştir [19, 20, 23, 24, 26].

### 2.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Bu çalışmada, binalar etrafındaki türbülanslı akış üç boyutlu olarak modellenmiştir. Türbülanslı akış şartları için, kartezyen koordinatlarda, süreklilik denklemi ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \rho g_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (2)$$

Türbülanslı akışın karmaşıklığı nedeniyle bu denklemlerde yer alan çalkantı terimlerini hesaplayan analitik bir yöntem mevcut değildir. Bu değerlerin hesaplanabilmesi için çok sayıda türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamındaki sayısal çözümler, Standard k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε ve Standard k-ω türbülans modelleri ile, Intel İ7 işlemci ve 32 GB RAM özelliklerine sahip bir iş istasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Launder ve Spalding [27] tarafından önerilen Standard k-ε türbülans modeli, iki denklemlilik diğer modeller arasındaki en sade türbülans modeli olması ve kolay uygulanabilme özelliğinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. İki denklemlilik yarı deneysel bir türbülans modeli olan Standard k-ε türbülans modelinde, k, türbülans kinetik enerjisini ve ε, türbülans yutulma oranını ifade etmektedir. Standard k-ε türbülans modeli için transport denklemleri şu şekildedir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

Burada, G<sub>k</sub> ortalama hız gradyanına bağlı oluşan türbülans kinetik enerjisinin üretimidir ve,

$$G_k = -\rho \overline{u'_i v'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (5)$$

olarak yazılır. G<sub>b</sub> kaldırma kuvveti nedeniyle oluşan türbülans kinetik enerjisi, S<sub>k</sub> ve S<sub>ε</sub>, k ve ε için kaynak terimleri, Y<sub>M</sub> sıkıştırılabilir türbülanslı bölge içindeki dalgalı genişleme, σ<sub>k</sub> ve σ<sub>ε</sub>, k ve ε için tanımlanan türbülans Prandtl sayıları, C<sub>ε1</sub>, C<sub>ε2</sub> ve C<sub>ε3</sub> k-ε türbülans modeli sabitler: C<sub>ε1</sub>=1.44, C<sub>ε2</sub>=1.92 ve k ve ε için tanımlanan türbülans Prandtl sayıları σ<sub>k</sub>=1.0, σ<sub>ε</sub>=1.3 şeklindedir. Ayrıca, türbülans viskozitesi,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

şeklindedir ve C<sub>μ</sub>=0.09 olarak alınmıştır.

Navier-Stokes denklemlerinden “renormalizasyon group method (RNG)” olarak bilinen matematiksel yöntemin kullanılmasıyla elde edilen RNG k-ε türbülans modeli, düşük Reynolds sayısı etkilerini hesaplamak için kullanılan efektif viskozite için türetilmiş analitik

diferansiyel denklemler içermektedir. RNG k-ε türbülans modeli için transport denklemleri şu şekildedir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (8)$$

RNG k-ε türbülans modelinde, ε denkleminde ilave olarak R<sub>ε</sub> terimi gelmektedir ve,

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

ifadesiyle tanımlanmaktadır. RNG k-ε türbülans modeline ait transport denklemlerindeki G<sub>k</sub>, G<sub>b</sub>, S<sub>k</sub>, S<sub>ε</sub>, Y<sub>M</sub> terimleri Standard k-ε modeli ile aynı olmakla birlikte σ<sub>k</sub> ve σ<sub>ε</sub>, k ve ε için tanımlanan ters etkili türbülans Prandtl sayısını ve μ<sub>eff</sub> efektif viskoziteyi ifade etmektedir. Bu modelde kullanılan sabitler σ<sub>k</sub>=0.7194, σ<sub>ε</sub>=0.7194, C<sub>1ε</sub>=1.42, C<sub>2ε</sub>=1.68, η<sub>0</sub>=4.38, β=0.012 ve C<sub>μ</sub>=0.0845 şeklindedir.

Shih ve diğ. [28] tarafından önerilen Realizable k-ε türbülans modelinde, Denklem (6) ile ifade edilen türbülans viskozitesinde yer alan C<sub>μ</sub> terimi sabit bir değer olmayıp, ana şekil değişimi, rotasyon oranı ve sistemin açılma hızının bir fonksiyonudur[29]. Realizable k-ε türbülans modeli için transport denklemleri,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 3} G_b - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + S_\varepsilon \quad (11)$$

şeklindedir. Bu denklemlerde, G<sub>k</sub>, G<sub>b</sub>, S<sub>k</sub>, S<sub>ε</sub>, Y<sub>M</sub>, σ<sub>k</sub>, σ<sub>ε</sub>, μ<sub>t</sub> terimleri Standard k-ε modeli ile aynı olmaktadır. Realizable k-ε türbülans modelindeki model sabitleri; C<sub>ε1</sub>=1.44, C<sub>2</sub>=1.9 ve σ<sub>k</sub>=1.0, σ<sub>ε</sub>=1.2 olarak alınmaktadır.

Kolmogorov [30] tarafından önerilen Standard k-ω türbülans modelinde RANS denklemlerine ek olarak, k türbülans kinetik enerjisi ve ω özgül yutulma (yutulmanın kinetik enerjiye oranı, ω = ε / k) için iki adet transport denklemi çözülmektedir. Bu modelde türbülans viskozitesi,

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (12)$$

olarak ifade edilir. Standard k-  $\epsilon$  türbülans modelinde, k ve  $\omega$  için transport denklemleri,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k$$

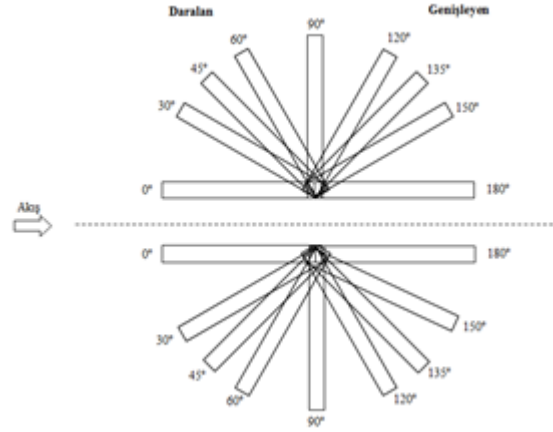
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \omega) = \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega$$

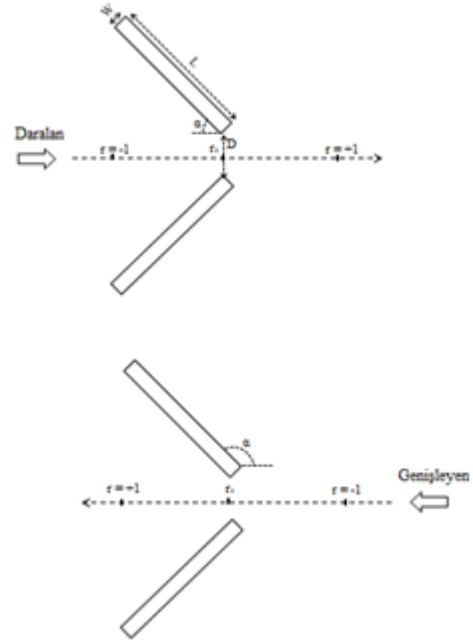
şeklinindedir. Burada;  $G_k$  ortalama hız gradyanları nedeniyle türbülans kinetik enerji üretimi,  $G_\omega$  özgül yutulma üretimi,  $\Gamma_k$  türbülans kinetik enerjisinin difüzyon etkisi,  $\Gamma_\omega$  özgül yutulmanın difüzyon etkisi,  $S_k$  ve  $S_\omega$  kaynak terimleridir.

## 2.2. Bina Modelleri (Building Models)

Şekil 1'de görüldüğü gibi, gelen akış doğrultusunda, bina modelleri ile iki bina arasındaki geçidin merkez çizgisi arasındaki açının  $0^\circ$ - $180^\circ$  arasında değiştiği 8 farklı bina konfigürasyonu kullanılmıştır.  $0^\circ$  ve  $180^\circ$  aynı bina düzenini temsil ettiği için hesaplamalar sadece  $0^\circ$  için yapılmıştır. Açının  $90^\circ$  den küçük olduğu durumlar ( $\alpha < 90^\circ$ ) daralan, büyük olduğu durumlar ( $\alpha > 90^\circ$ ) ise genişleyen bina düzeni olarak adlandırılmıştır.  $0^\circ$  ise paralel konumlandırılmış iki bina düzenini göstermektedir. Daralan ve genişleyen bina düzenine sahip açılı konumlandırılmış binaların şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir. Burada r, iki bina arasındaki geçidin merkez hattı boyunca devam eden boyutsuz bir koordinat sistemini,  $r_0$  ise geçidin en dar açıklığının olduğu merkezi noktayı temsil etmektedir. r koordinat sisteminin birim uzunluğu  $L/\sqrt{2}$  olarak alınmış ve yönü akış yönüne göre pozitif olacak şekilde seçilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sayısal sonuçların doğruluğu literatürde mevcut deneysel verilerle karşılaştırılacağından, bina boyutları Blocken vd [7]' in çalışmaları referans alınarak tam ölçekte bina kenar uzunluğu  $L=100$  m, bina yüksekliği  $H=30$  m, bina genişliği  $W=10$  m ve iki bina arasındaki mesafe  $D=30$  m şeklinde belirlenmiştir.



Şekil 1. Farklı açılara sahip bina düzenlerinin üstten görünüşü (Top view of building configurations with different angles)



Şekil 2. a)Daralan, b)genişleyen bina düzeninin şematik gösterimi (Schematic representation of a)converging, b)diverging building configurations)

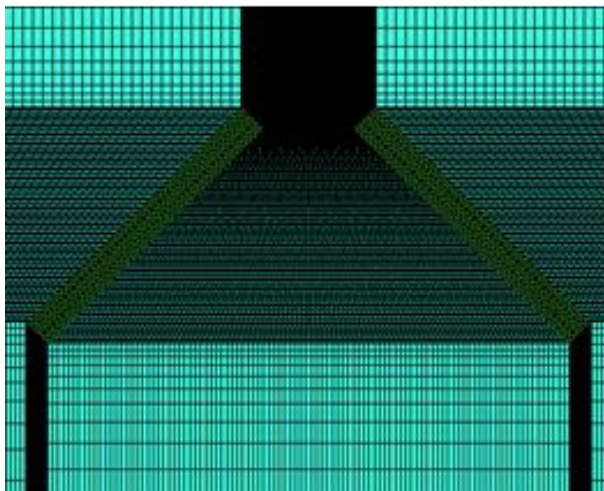
## 2.3. Akış Alanı, Sınır Şartları, Ağ Yapısı ve Ağdan Bağımsızlık (Flow Area, Boundary Conditions, Mesh Structure and Mesh Independence)

Çözüm alanındaki bina modelleri, geometrik ve dinamik benzerlik şartları dikkate alınarak tam ölçekteki bina boyutlarının  $1/40$  oranında küçültülmesiyle oluşturulmuştur. Akış alanı boyutları Franke [31]'nin model yüksekliğine göre önerdiği mesafeler referans alınarak belirlenmiş ve  $35 \times 35 \times 9$  m<sup>3</sup> şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bina aerodinamiği çalışmalarında model yüzey alanının test bölgesi kesit alanına oranı blokaj etkisi olarak ifade edilmekte ve akışta boğulma olmaması için çalışmalarda blokaj oranının % 3'den küçük olması önerilmektedir[26]. Mevcut çalışmada maksimum blokaj oranı, açının  $90^\circ$  olduğu bina düzeninde %1,2

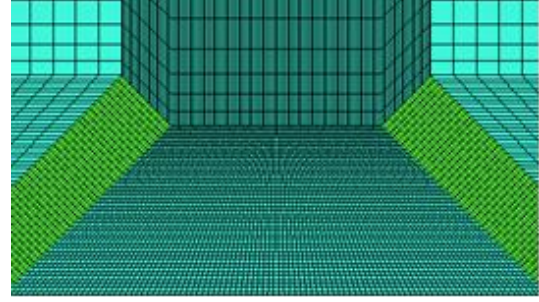
olarak gerçekleştirilmektedir. Akış alanına uygun ağ yapısı ICEM CFD 15.0 programının kullanılmasıyla oluşturulmuştur. Şekil 3'de, 45°'lik açığa sahip daralan bina düzeni için oluşturulmuş ağ yapısında görüldüğü gibi, bina modelleri etrafında ve binalar arasındaki geçitte sıklaşan bir düzende, bina modelinden uzak bölgelerde ise daha geniş olacak şekilde ağ düzeni tercih edilmiştir. Sayısal çözümlerde, sonuçların ağ yapısından etkilenmemesi için ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. 3 farklı ağ yoğunluğu ile, binalar arasındaki geçidin merkez hattı boyunca yaya seviyesinde, Standard k-ε türbülans modelinin kullanılmasıyla elde edilen örnek boyutsuz hız dağılımları Şekil 4'de görülmektedir. Yapılan ağdan bağımsızlık çalışmaları sonucunda, 4851204 ağ yoğunluğundan sonra sonuçların neredeyse değişmediği görülmüş ve çalışmanın tamamında uygulanacak ağ yoğunluğu 4851204 olarak belirlenmiştir. Diğer tüm bina modellerinde de benzer şekildeki ağ yapıları oluşturulmuştur. Akış alanları için sınır şartları, girişte, çıkışta ve duvarlarda sırasıyla hız giriş koşulu (*velocity-inlet*), basınç çıkış koşulu (*pressure-outlet*) ve duvar sınır koşulu (*wall*) şeklinde uygulanmıştır. Kentsel arazi için oluşturulmuş ortalama hız ve türbülans profilleri, Ansys Fluent® paket programı içerisinde bulunan "User Defined Function (UDF)" özelliği kullanılarak giriş sınır şartı olarak verilmiştir. Çalışmada,

$$Re = \frac{U_0 H}{\nu} \quad (15)$$

şeklinde, model yüksekliğine göre tanımlanmış Reynolds sayısı  $7,7 \times 10^5$  olarak hesaplanmıştır. Sayısal çözümlerde, Standard k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε ve Standard k-ω türbülans modelleri karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır. Yüzeylerde, sınır tabakanın çözümlenmesinde, duvar yaklaşımı olarak Scalable Wall Functions esas alınmıştır. İteratif çözücü olarak SIMPLEC algoritması ve değişkenlerin ağ noktaları arasındaki değişimine yönelik First Order Upwind yaklaşımı kullanılmıştır. Çözümlerde yakınsama kriteri  $10^{-6}$  olarak dikkate alınmıştır.

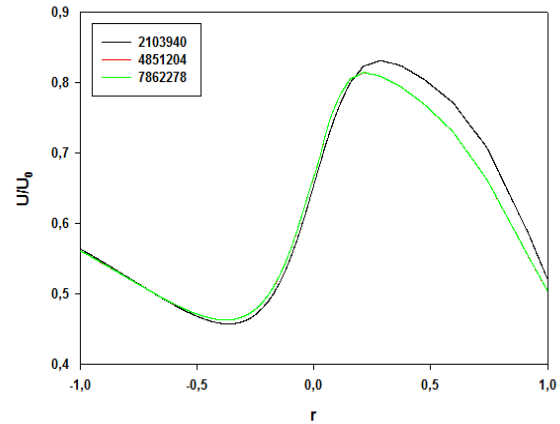


(a)



(b)

Şekil 3. a) Bina düzenleri etrafındaki, b) binalar arasındaki geçitteki üç boyutlu ağ yapısı (Three-dimensional mesh structure a) around building configurations, b) in the passage between buildings )



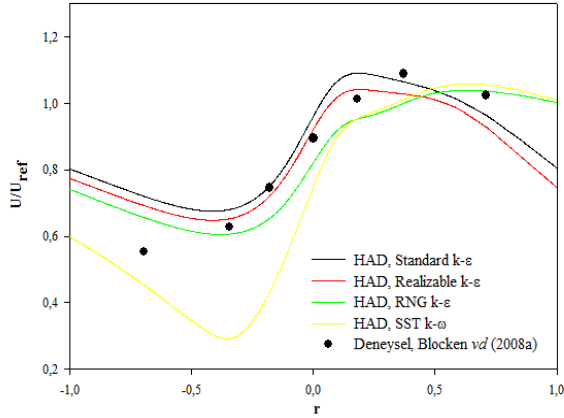
Şekil 4. Ağ yoğunluğunun çözüm üzerindeki etkisi (Effect of mesh density on solution)

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

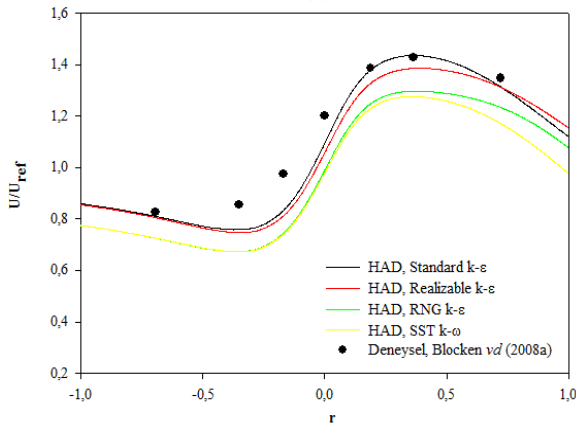
#### 3.1. Sayısal Yöntemin Doğrulanması (Verification of Numerical Method)

Sayısal yöntemin doğruluğunu test etmek için Blocken vd [7] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada kullanılan bina geometrisi 1/40 oranında küçültülerek sayısal çalışmada kullanılacak bina modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bina modelleri etrafındaki akış alanları, modeller arasındaki açının 45° ve 135° olduğu daralan ve genişleyen bina düzenleri için farklı türbülans modelleri ile çözülmüşlerdir. İki farklı bina düzeni için, binalar arasındaki geçidin yaya seviyesindeki merkez hattı boyunca hesaplanan ortalama rüzgar hızları K amplifikasyon faktörü şeklinde düzenlenerek deneysel verilerle karşılaştırılmıştır (Şekil 5). Amplifikasyon faktörü K,  $U/U_{ref}$  olarak tanımlanmıştır. Burada U yerel rüzgar hızını,  $U_{ref}$  ise  $r_0$ 'da hesaplanan yaya seviyesindeki referans rüzgar hızını ifade etmektedir. Genel olarak, SST k-ω hariç, diğer üç türbülans modelinin kullanılması ile elde edilen K değerlerinin deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu, ancak deneysel sonuçlara en yakın değerlerin Sayısal Akışkan Dinamiği'nde yaygın olarak kullanılan ve sınır tabaka akışlarında oldukça iyi performans gösteren Standard k-ε türbülans modeli ile elde edildiği görülmüştür [16, 17, 18, 27, 28]. Bu nedenle, çalışma

kapsamında gerçekleştirilen diğer tüm çözümlerde Standard  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. SST  $k-\omega$  türbülans modeli serbest akış şartlarına daha az duyarlılık göstermekte ve duvar yakınında daha yoğun ağ yapısına ihtiyaç duymaktadır. Deneysel verilerle arasındaki belirgin farkın duvar yakınında mevcut ağ yoğunluğundan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



(a)



(b)

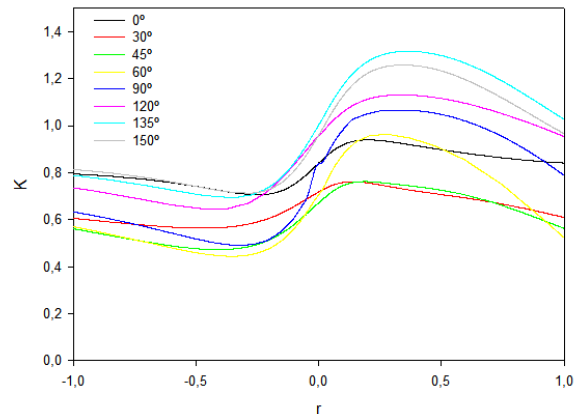
**Şekil 5.** a) 45° açılıya sahip daralan, b) 135° açılıya sahip genişleyen bina düzeni için, binalar arasındaki geçit boyunca K değişimleri (K changes along the passage between a) converging, a) diverging buildings )

### 3.2. Hız Dağılımlarının İncelenmesi (Investigation of Velocity Distributions)

İki bina grubu arasındaki geçitten akmaya zorlanan akış, yerel rüzgar hızında önemli bir artışa ve yayaların konforunu önemli ölçüde etkileyebilecek bir rüzgar rahatsızlığına neden olmaktadır [1, 2, 3, 32, 33, 34]. Gandemer [1] ve Lawson [32] yaya seviyesindeki rüzgar hızının artmasını Venturi etkisine dayandırmışlardır. Venturi etkisi, akış kesit alanındaki azalma nedeniyle, akışkan hızının artması olarak ifade edilmektedir [35]. Blocken ve vd [7,8], Venturi etkisinin iç akışlar için geçerli olduğunu, binalar arasındaki geçitlerdeki artan rüzgar hızının ise rüzgar blokaj etkisinin bir sonucu olduğunu belirtmişlerdir. Rüzgar blokaj etkisi, akışın

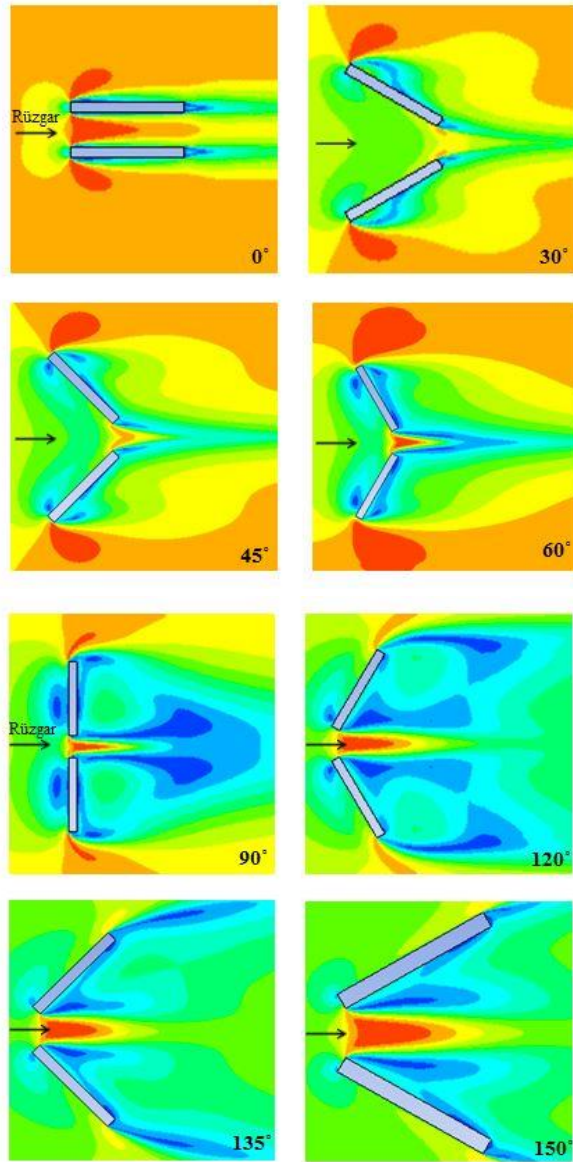
geçitten geçmeye zorlanmayıp, binaların üzerinden ve çevresinden geçeceğini ifade etmektedir.

Şekil 6'da, tüm bina düzenleri için, yaya seviyesinde, binalar arasındaki geçidin merkez çizgisi boyunca elde edilen K değerleri, r koordinat ekseninin bir fonksiyonu olarak görülmektedir. Bütün bina düzenleri için K değerleri benzer eğilim göstermekle birlikte, genişleyen geçitlerdeki K değerleri, daralan geçitlerdeki K değerlerinden çok daha büyük olarak elde edilmiştir. Tüm daralan bina düzenleri için, binalar arasındaki geçidin merkez çizgisi boyunca hesaplanan K değerleri 1'in altındadır ve daralan geçitlerden geçen akış hızları, serbest alan akış hızından daha düşüktür. Bu durum, daralan bina düzenlerinde, gelen rüzgarın, binalar arasındaki dar geçitten geçmeye zorlanmak yerine binaların etrafından akmasına sebep olan rüzgar blokaj etkisinin daha baskın olmasından kaynaklanmaktadır [7]. Bu etkiye bağlı olarak, daralan bina düzenleri için, binalar arasındaki geçit boyunca hesaplanan akış hızları, sürekli olarak serbest alan akış hızından daha düşüktür. Bu durum, Venturi etkisinin bu tür bina konfigürasyonları için daha az uygulanabilir olduğu anlamına gelmektedir [8]. Genişleyen bina düzenlerinde, rüzgar blokaj etkisi daha az belirgin olduğu için, gelen akışın büyük bir kısmı geçit boyunca geçecek ve nispeten daha az hava binalar üzerinden akacaktır. Bu nedenle, genişleyen geçitlerdeki K değerleri, daralan geçitlerdeki K değerlerinden daha yüksek olarak hesaplanmaktadır. Binalar arasındaki açının değiştirilmesi, geçidin merkezi çizgisi boyunca hesaplanan K değerlerini ciddi oranda etkilemektedir. Geçidin merkez çizgisi boyunca hesaplanan en düşük K değeri, açının 45° olduğu, en yüksek K değeri ise, açının 135° olduğu durumda meydana gelmektedir. Buna göre, daha fazla rüzgâr hızının istendiği tropikal iklimdeki kentsel alanlarda, yaya seviyelerinde daha iyi bir havalandırmanın sağlanması amacıyla açının 135° olduğu bina düzeni tercih edilmelidir.



**Şekil 6.** Tüm bina düzenleri için, binalar arasındaki geçidin merkez çizgisi boyunca elde edilen K değişimleri (K variations obtained along the centerline of the passage between all building configurations)





**Şekil 7.** Tüm bina düzenleri için K hatları (K lines for all building configurations)

Şekil 7’de, tüm daralan ve genişleyen bina düzenleri için yaya seviyesinde, binaların etrafında ve binalar arası geçitte K hatları gösterilmektedir. Genel olarak, daha yüksek K değeri alanları, binaların üst kenarında akış ayrılmasının gerçekleştiği köşe etrafında ve binalar arasındaki geçitlerde oluşurken, daha düşük K değerlerine sahip sakin rüzgar alanları ise rüzgar önü bölgesi (leeward side) yakınlarında oluşmaktadır. Daralan bina düzeni için, yüksek K değerlerine sahip bölgeler köşe etrafında oluşmakta ve bina ve merkez çizgisi arasındaki açının artmasıyla, yüksek K değerine sahip bu bölgelerin ve binalar arasındaki geçitteki düşük K değerine sahip düşük rüzgar hızı bölgelerinin genişlediği görülmektedir. Genişleyen bina düzeni için, yüksek K değerlerine sahip bölgeler binalar arasındaki geçitte oluşmakta ve bina ve merkez çizgisi arasındaki açının artmasıyla, yüksek K

değerine sahip bu bölgelerin genişlediği görülmektedir. Daralan bina düzeninde binalar arasındaki geçidin çıkışına doğru daha yüksek K değerine sahip bölgeler oluşmaya başlamasına rağmen, bu bölgelerdeki K değerleri genişleyen bina düzenindeki K değerlerinden daha düşük değerlere sahiptir.

### 3.3. Basınç Dağılımlarının İncelenmesi (Investigation of Pressure Distributions)

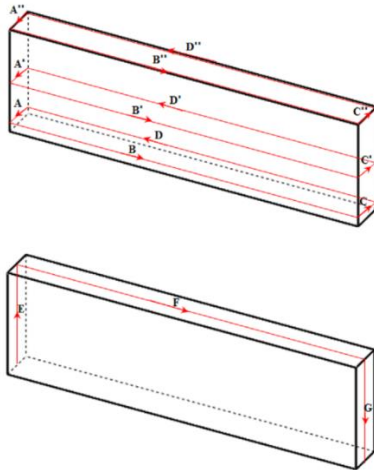
Çalışma kapsamında incelenen bina modellerinin yüzeylerindeki basınç dağılımları,

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{0.5\rho U^2} \quad (16)$$

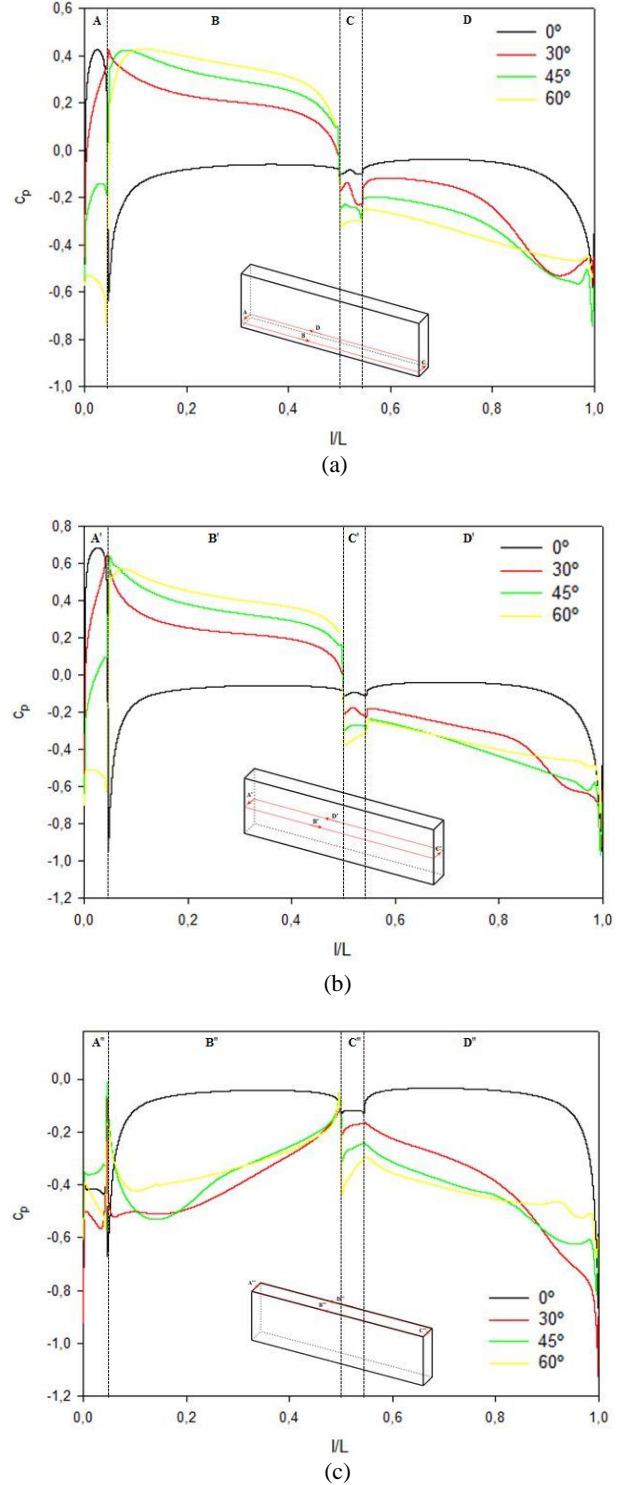
şeklinde tanımlanan yüzey basınç katsayısı cinsinden verilmiştir. Standard k-ε türbülans modelinin kullanılmasıyla hesaplanan basınç katsayıları, Şekil 8’de gösterildiği gibi, yatay düzlemde yaya seviyesi yüksekliğinde (y=0.005 m) oluşturulmuş A-B-C-D hattı, yatay eksenin merkezinde (y=0.375 m) oluşturulmuş A'-B'-C'-D' hattı, bina çatı seviyesi yüksekliğinde (y=0.75 m) oluşturulmuş A''-B''-C''-D'' hattı ve düşey düzlemde bina yüzeylerinin orta eksenlerinde oluşturulmuş E-F-G hattı boyunca elde edilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla, açının 0° olduğu durum daralan bina düzene, açının 90° olduğu durum da genişleyen bina düzeni olmak üzere iki ayrı grafikte sunulmuştur. Yatay düzlemde, model tabanından itibaren y=0.005 m, y=0.375 m ve y=0.75 m yükseklikteki kesitlerde yani yaya seviyesinde, bina ortasında ve çatı seviyesinde oluşturulmuş hatlar boyunca hesaplanmış basınç katsayıları daralan bina düzeni için Şekil 9’da, genişleyen bina düzeni için Şekil 10’da verilmiştir. Şekil 9’da görüldüğü gibi daralan bina düzenlerinde, yaya seviyesinde ve bina ortasında oluşturulmuş hatlardaki basınç katsayısı dağılımları benzer eğilim gösterirken, bina çatısında oluşturulmuş hattaki basınç dağılımları, çatı ön kenarından ayrılan akış nedeniyle farklılık göstermektedir. Daralan bina düzenlerinde, rüzgara doğrudan maruz kalan (A) ve (A') yüzeylerinde, itme etkisi nedeniyle oluşan pozitif basınç katsayısı değerleri, binalar arasındaki açının artmasıyla azalmakta ve açının 45° ve 60° olduğu bina düzeninde negatif değerler almaktadır. Açının 0° olduğu bina düzeninde (B) ve (B') yüzeylerinde negatif olan basınç katsayısı değerleri, açının artmasıyla artmakta ve pozitif değerler almaktadır. (C), (C'), (D) ve (D') yüzeylerinde oluşan negatif basınç katsayıları ise binalar arasındaki açının artması ile azalmaktadır. Şekil 9c’de görüldüğü gibi daralan bina düzenlerinde, çatı seviyesinde hesaplanan en kritik negatif basınç katsayısı değerleri açının 30° olduğu durumda ve (D'') yüzeyinde oluşmaktadır. Açının 90° olduğu bina düzeninde (A) ve (A') yüzeylerinde oluşan negatif basınç katsayısı değerleri, açının artmasıyla artmakta ve pozitif değerler almaktadır (Şekil 10). (B) ve (B') yüzeylerinde oluşan negatif basınç katsayıları binalar arasındaki açının artması ile azalırken; (C) ve (C') yüzeylerinde oluşan negatif basınç katsayıları ise açının artması ile artmakta, ancak bu etki yüzeyin sonlarına doğru değişmektedir. (D) ve (D') yüzeylerinde oluşan

pozitif basınç katsayıları, binalar arasındaki açının artması ile azalmakta ancak bu etki yüzeyin sonlarına doğru değişmektedir.

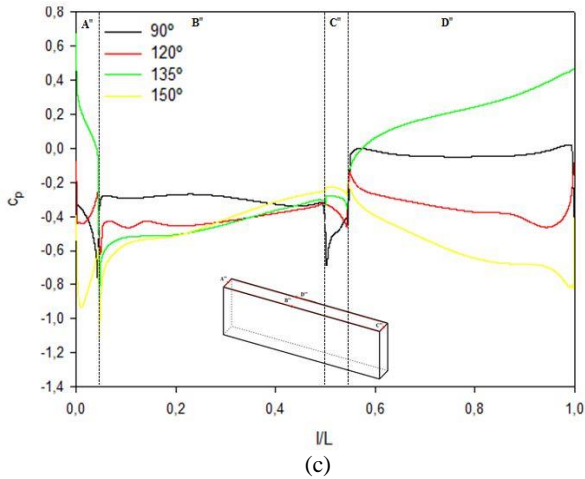
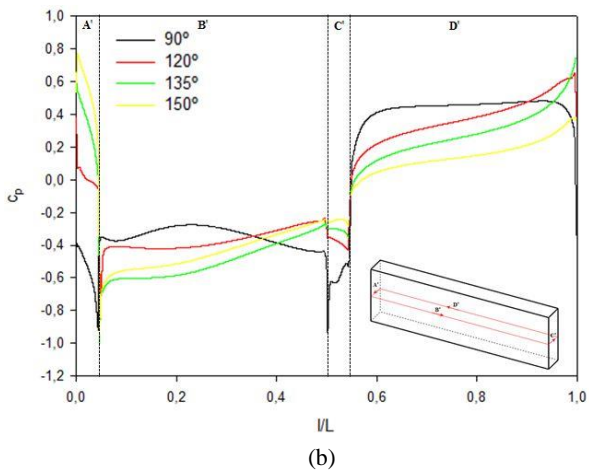
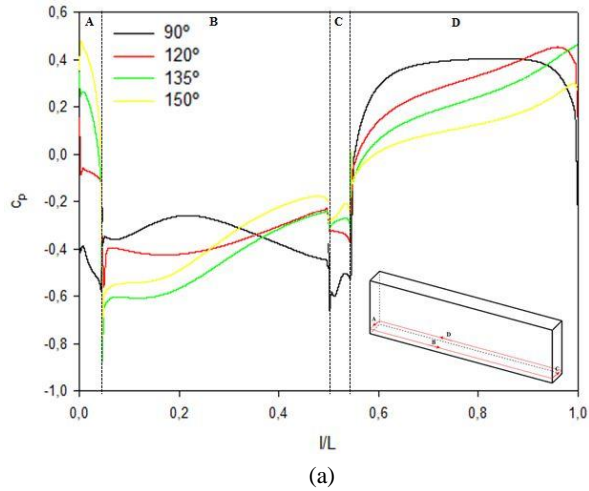
Daralan ve genişleyen bina düzeni için dikey düzlemde model kesit kenarları boyunca elde edilmiş basınç katsayısı dağılımları Şekil 11’de görülmektedir. Şekil 11a’da görüldüğü gibi daralan bina düzenlerinde, rüzgara doğrudan maruz kalan (E) yüzeyinde, itme etkisi nedeniyle oluşan pozitif basınç katsayısı değerleri, binalar arasındaki açının artmasıyla azalmakta ve açının 60° derece olduğu bina düzeninde negatif değerler almaktadır. (E) yüzeyinin üst kenarından ayrılan akış nedeniyle bina çatısı olan (F) yüzeyinde ve bina modellerinin arka duvarı (G) yüzeyinde oluşan negatif basınç katsayısı değerleri, açının artmasıyla azalmaktadır. Şekil 11b’de görüldüğü gibi, açının 90° derece olduğu bina düzeni için, (E) yüzeyinde negatif değerler alan basınç katsayısı, binalar arasındaki açının artmasıyla artmakta ve pozitif değerler almaktadır. (F) yüzeyinde oluşan negatif basınç katsayısı değerleri, açının artmasıyla azalırken, (G) yüzeyinde ise açının artmasıyla artmaktadır. Daralan ve genişleyen bütün bina düzenleri için, en kritik negatif basınç katsayısı değerleri bina çatısı olan (F) yüzeyinde meydana gelen ayrılmış akış bölgelerinde oluşmakta ve akışın çatı yüzeyi boyunca ilerlemesiyle kademeli olarak azalmaktadır. Bina modellerinin yüzeylerinde modeller arasındaki açına bağlı olarak farklılaşan basınç dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, negatif basınç katsayısına sahip bölgelerde artan açıyla birlikte kritik değerlerin oluştuğu görülmektedir. Bina modellerinin belirli yüzeylerinde oluşabilecek kritik emme etkilerinin yaya konforu üzerindeki olumsuzluk oluşturmaması için bu durumun tasarım aşamasında dikkate alınması gerekmektedir.



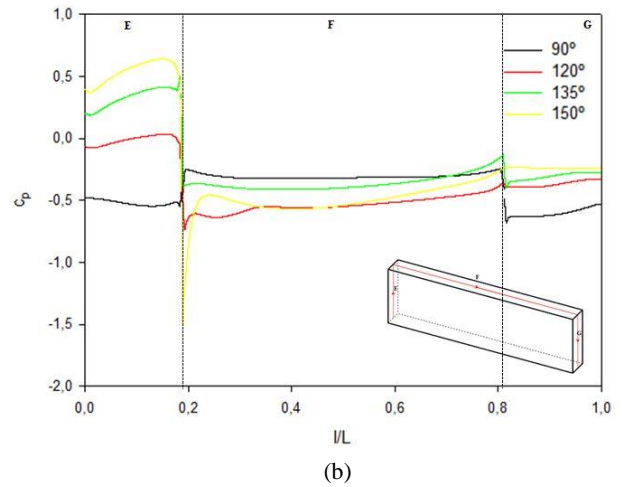
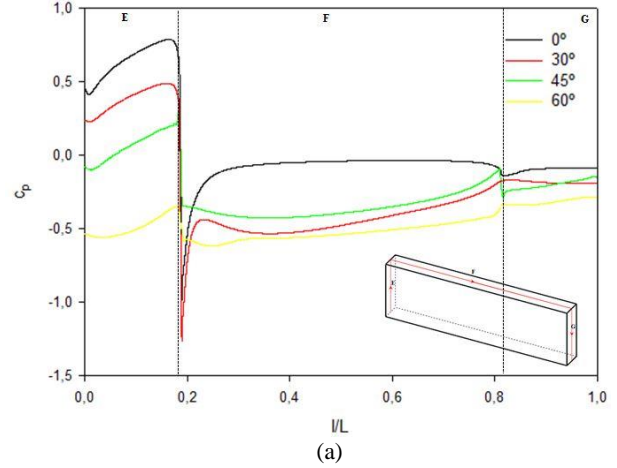
**Şekil 8.** Bina modeli yüzeylerinde basınç katsayılarının hesaplandığı hatlar (Lines where pressure coefficients are calculated on building model surfaces)



**Şekil 9.** Daralan bina düzeni için, yatay düzlemde model kesit kenarları boyunca a) yaya seviyesinde, b) orta ekseninde, c) çatı seviyesinde elde edilmiş basınç katsayısı dağılımları (Pressure coefficient distributions obtained at a) the pedestrian level, b) mid-axis, c) roof level along the model edges at the horizontal plane in converging building configurations)



**Şekil 10.** Genişleyen bina düzeni için, yatay düzlemde model kesit kenarları boyunca a) yaya seviyesinde, b) orta ekseninde, c) çatı seviyesinde elde edilmiş basınç katsayısı dağılımları (Pressure coefficient distributions obtained at a) the pedestrian level, b) mid-axis, c) roof level along the section edges of the model at the horizontal plane in diverging building configurations)



**Şekil 11.** a) Daralan, b) genişleyen bina düzeni için dikey düzlemde model kesit kenarları boyunca elde edilmiş basınç katsayısı dağılımları (Pressure coefficient distributions obtained along the section edges of the model at vertical plane for a) converging, b)diverging building configurations)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, açılı konumlandırılmış iki bina modeli etrafındaki akış alanlarının üç boyutlu ve zaman bağımsız olarak sayısal çözümü gerçekleştirilmiştir. Farklı bina açılarının, akış alanının tamamına ait hız ve basınç dağılımları üzerindeki etkisinin ayrıntılı olarak incelendiği bu çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Açılı konumlandırılmış iki bina modeli etrafındaki akışın üç boyutlu olarak çözümlenmesinde, Standard k-ε türbülans modeli diğer türbülans modellerine göre, deneysel sonuçlarla daha iyi uyum göstermektedir.

Genişleyen geçitlerde, binalar arasındaki geçidin merkez çizgisi boyunca elde edilen K değerleri, daralan geçitlerdeki K değerlerinden çok daha büyük olmaktadır. Geçidin merkez çizgisi boyunca hesaplanan en düşük K değeri, açının 45° olduğu, en yüksek K değeri ise, açının 135° olduğu durumunda meydana gelmektedir.

Daralan bina düzeni için, yüksek K değerlerine sahip bölgeler köşe etrafında oluşmakta ve bina ve merkez

çizgisi arasındaki açının artmasıyla, yüksek K değerine sahip bu bölgeler genişlemektedir.

Genişleyen bina düzeni için, yüksek K değerlerine sahip bölgeler binalar arasındaki geçitte oluşmakta ve bina ve merkez çizgisi arasındaki açının artmasıyla, yüksek K değerine sahip bu bölgeler genişlemektedir.

Daralan ve genişleyen bina düzenlerinde, yaya seviyesinde ve bina ortasında oluşturulmuş hatlardaki basınç katsayısı dağılımları benzer eğilim gösterirken, bina çatısında oluşturulmuş hattaki basınç dağılımları, çatı ön kenarından ayrılan akış nedeniyle farklılık göstermektedir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Tekmile CÜREBAL:** Sayısal çalışmaları gerçekleştirip, sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemine katkı sağlamıştır.

**Yücel ÖZMEN:** Çalışma sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemine katkı sağlamıştır.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gandemer J., "Wind environment around buildings: Aerodynamics concepts", *Proc. of 4th Int. Conf. On Wind Effects on Buildings and Structures*, Cambridge, 423-432, (1975).
- [2] Wiren B.G., "A wind tunnel study of wind velocities in passages between and through buildings", *Proc. of 4th Int. Conf. On Wind Effects on Buildings and Structures*, Cambridge, 465-475, (1975).
- [3] Stathopoulos T. and Storms R., "Wind environmental conditions in passages between buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 24(1):19-31, (1986).
- [4] Blocken B., Carmeliet J.E., and Stathopoulos T., "CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings-Effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95: 941-962, (2007).
- [5] Tsang C.W., Kwok K.C.S., and Hitchcock P.A., "Wind tunnel study of pedestrian level wind environmental around tall buildings: effects of building dimensions, separation and podium", *Building and Environment*, 49: 167-181, (2012).
- [6] Hong B. and Lin B., "Numerical studies of the outdoor wind environment and thermal comfort at pedestrian level in housing blocks with different building layout patterns and trees arrangement", *Renewable Energy*, 73:18-27, (2015).
- [7] Blocken B., Stathopoulos T., and Carmeliet J.E., "Wind environmental conditions in passages between two long narrow perpendicular buildings", *Journal of Aerospace Engineering*, 21(4):280-287, (2008(a)).
- [8] Blocken B., Moones P., Stathopoulos T. and Carmeliet J.E., "A numerical study on the existence of the venturi-effect in passages between perpendicular buildings", *Journal of Engineering Mechanics*, 134(12):1021-1028, (2008(b)).
- [9] Li B., Luo Z., Sandberg M. and Liu J., "Revisiting the 'venturi effect' in passage ventilation between two non-parallel buildings", *Building and Environment*, 94:714-722, (2015).
- [10] Allegrini J. and Lopez B., "The influence of angular configuration of two buildings on the local wind climate", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 156:50-61, (2016).
- [11] Du Y., Mak C.M., Liu J., Xia Q., Niu J., and Kwok K.C.S., "Effects of lift-up design on pedestrian level wind comfort in different building configuration under three wind direction", *Building and Environment*, 117:84-99, (2017).
- [12] Liu J., Niu J., Mak C.M., and Xia Q., "Detached eddy simulation of pedestrian-level wind and gust around an elevated building", *Building and Environment*, 125:168-179, (2017).
- [13] Du Y., Mak C.M. and, Ai Z., "Detached eddy simulation of pedestrian-level wind and gust around an elevated building", *Environment Modelling & Software*, 103:105-119, (2018).
- [14] Chew L.W. and Norford L.K., "Pedestrian-level wind speed enhancement in urban street canyons with void decks", *Building and Environment*, 146:64-76, (2018).
- [15] Tominaga Y. and Stathopoulos T. "CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS.", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99:340-348, (2011).
- [16] Asfour O.S., "Prediction of wind environment in different grouping patterns of housing blocks", *Energy and Building*, 42:2061-2069, (2010).
- [17] Ramponi R., Blocken B., de Coa L.B. and Janssen, W.D., "CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths", *Building and Environment*, 92:152-166, (2015).
- [18] Fan M., Chau C.K., Chan E.H.W. and Jia J., "A decision support tool for evaluating the air quality and wind comfort induced by different opening configurations for buildings in canyons", *Science of the Total Environment*, 574:569-582, (2017).

- [19] Blocken B., Stathopoulos T. and van Beeck J.P.A.J., “Pedestrian-level wind conditions around buildings: review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment”, *Building and Environment*, 100:50-81, (2016).
- [20] Blocken B. and Stathopoulos T., “CFD simulation of pedestrian-level wind conditions around buildings: past achievements and prospects”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 121:138-145, (2013).
- [21] Stathopoulos T., “Computational wind engineering: past achievements and future challenges”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67–68:509-532, (1997).
- [22] Murakami S., Ooka R., Mochida A., Yoshida S. and Kim S. “CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 8:57-81, (1999).
- [23] Blocken B., “50 years of computational wind engineering: past, present and future”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129:69-102, (2014).
- [24] Druenen T.van, Hoff T.van, Montazeri H. and Blocken B., “CFD evaluation of building geometry modifications to reduce pedestrian-level wind speed”, *Building and Environment*, 163: 106293, (2019).
- [25] ANSYS Fluent 14 User Guide, ANSYS, Inc, (2013).
- [26] Blocken B., “Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations”, *Building and Environment*, 91: 219-245. (2015).
- [27] Launder B.E. and Spalding D.B. “The numerical computation of turbulent flows”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3:269-289, (1974).
- [28] Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, and Zhu, J. “A New  $k-\epsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows—model development and validation”, *Computers Fluids*, 24:227-238, (1995).
- [29] Özmen, Y., Kaydok, T., “Kare kesitli bir yüksek bina üzerindeki türbülanslı akışın sayısal olarak incelenmesi”, *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(2):15-25, (2014).
- [30] Kolmogorov A.N., “Equations of turbulent motion of an incompressible fluid”, *Izv Acad. Sci. USSR Phys.*, 6:56–58, (1942).
- [31] Franke J., “Recommendations of the COST Action C14 on The Use of CFD in Predicting Pedestrian Wind Environment”, *The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering*, Yokohama, (2006).
- [32] Lawson T.V., “Wind effects on buildings, Vol. 1”, *Applied Science Publishers Ltd.*, London, England, (1980).
- [33] Dutt A.J., “Wind flow in an urban environment” *Environmental Monitoring and Assessment*, 19(1-3), 495-506, (1991).
- [34] Blocken B. and Carmeliet J., “Pedestrian Wind Environment around Buildings: Literature Review and Practical”, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28(2):107-159, (2004).
- [35] Venturi G.B., “Experimental enquiries concerning the principle of the lateral communication of motion in fluids: applied to the explanation of various hydraulic phenomena”, Translated from the French by Nicholson W, 1st English ed., J. Taylor, Architectural Library, High-Holborn, London, (1799).