

## Kare Kesitli Bir Yüksek Bina Üzerindeki Türbülanslı Akışın Sayısal Olarak İncelenmesi

Yücel ÖZMEN<sup>1\*</sup>, Timur KAYDOK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği, Trabzon, Türkiye

**ÖZET:** Bu çalışmada, kare kesite sahip yüksek bina modeli etrafındaki akış alanı, üç boyutlu ve zaman bağımsız olarak Reynolds sayısının  $3.5 \times 10^5$  değeri için Standard k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$ , Realizable k- $\epsilon$  ve Standard k- $\omega$  türbülans modelleriyle hesaplanmıştır. Türbülans modellerinin akış alanı üzerindeki etkisi, hesaplanmış akış alanı görüntüleri, model etrafında ortalama hız ve türbülans profilleri ve model yüzeylerinde ortalama basınç katsayısı dağılımları şeklinde incelenmiştir. Türbülans modellerinin deneysel sonuçlar karşısındaki hassasiyetleri değerlendirildiğinde, RNG k- $\epsilon$  türbülans modelin deneysel verilerle daha uyumlu sonuçlar hesapladığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek bina, Kare kesit, Basınç katsayısı, Türbülans modeli

### Numerical Investigation of Turbulent Flow over a High-Rise Building with Square Cross-Section Area

**ABSTRACT:** In this study, three dimensional flow field around a high-rise building with square cross section area have been numerically investigated. Simulations have been carried out by using the Standard k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$ , Realizable k- $\epsilon$  and Standard k- $\omega$  turbulence models for Reynolds number of  $3.5 \times 10^5$ . The effect of turbulence models on the flow field has been examined with predicted flow fields, mean velocity and turbulence profiles and surface pressure distributions. When the performances of turbulence models were evaluated, it is seen that RNG k- $\epsilon$  turbulence model exhibits a better agreement with experimental data.

**Keywords:** High-rise building, Square cross section, Pressure coefficient, Turbulence model

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, metropol olarak nitelendirilen büyük şehirlerde yüksek binaların sayısı hızla artmaktadır. Bu nedenle, yüksek binaların rüzgara ve çevre koşullarına karşı direnç etkilerini inceleyen çalışmalar yaygınlaşmaktadır. Rüzgar-bina etkileşimi, binalar üzerinde farklı büyüklüklerde basınç alanlarının oluşmasına yol açmakta ve bu durum binaların hasar görmesine neden olabilmektedir. Bu etkileşim sonucu oluşan girdapların yayılması ile meydana gelen titreşimler ise çevre binalarda ve insanlar üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Ayrıca, yüksek binalarda bulunabilecek bacalardan dış ortama bırakılan, duman ve benzeri gaz halindeki atıkların atmosferde dağılımı bina etrafındaki akış karakteristiklerinden etkilenerek hava kirliliğine neden olabilmektedir. Bütün bu olumsuz etkilerin önlenmesi için rüzgar-bina etkileşiminin detaylı olarak incelenmesi ve bazı önlemlerin tasarım aşamasında alınması gerekmektedir. Bu konuda yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda akış alanına yönelik elde edilen veriler, bu konuda çalışan mühendislere ve tasarımcılara büyük katkılar sağlamaktadır.

Binalar üzerindeki rüzgar etkilerinin deneysel olarak araştırılmasında, gerçek-yapı ölçümleri ve rüzgar

tüneli benzeşim çalışmaları yapılmaktadır. Gerçek ölçekli araştırmaların zaman alıcı, zahmetli ve pahalı olması nedeniyle, rüzgar tüneli model deneyleri, rüzgar yüklerinin değerlendirilmesinde önemli rol oynamakta ve ilgili rüzgar standartları ile kodların oluşturulmasına ve geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu konuda yapılan sayısal çalışmalar ise, karmaşık bina geometrileri etrafındaki akış alanlarının hesaplanmasına ve türbülans modellerinin hassasiyetlerinin denemesine imkan sağlamaktadır. Günümüzde teknolojinin gelişmesi ve bilgisayarların hız ve kapasitelerindeki artış sayesinde rüzgar-bina etkileşimine yönelik sayısal çalışmalarda hızla artmaktadır. Özellikle karmaşık geometriler etrafındaki akış alanları daha çok sayısal çalışmalarla incelenmektedir.

Literatürde farklı bina geometrileri etrafındaki akış alanlarının incelenmesine yönelik çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma mevcuttur. Zikov ve diğ. [1], yan yana iki yüksek bina modeli etrafındaki rüzgar akışını incelemek amacıyla rüzgar tüneli deneyleri gerçekleştirmişler ve maksimum negatif basınçların bina çatılarında meydana geldiği belirtmişlerdir. Kare ve dikdörtgen prizma şeklindeki bina modelleri üzerinde girdap kaynaklı etkileri incelemek amacıyla yapılan bir diğer rüzgar tüneli çalışması Kawai [2] tarafından gerçekleştirilmiştir. Ikhwan ve Ruck [5], farklı boyutlardaki piramidal

\*Sorumlu Yazar: Yücel ÖZMEN, [yozen@ktu.edu.tr](mailto:yozen@ktu.edu.tr)

binalar etrafında akış yapılarını ve basınç alanlarını rüzgar tüneli deneyleri ile belirlemişlerdir. En yüksek pozitif basınçların piramidal bina ön yüzeyinde oluştuğunu ve rüzgar açılarının bina yüzeylerindeki basınç dağılımlarını önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Tominaga [4], yüksek bina modeli etrafındaki akışı, k-ε türbülans modeli ve LES türbülans modeli ile sayısal olarak incelemiştir. LES türbülans modelinin deneysel verilere uyum açısından daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Braun ve Awruch [5], “Standart CAARC Binası” üzerindeki aerodinamik ve aeroelastik karakteristikleri belirleyebilmek amacıyla LES türbülans modeli kullanarak sayısal çözümler gerçekleştirmişlerdir. Bina etrafındaki akış karakteristiklerini ve bina yüzeylerindeki basınç dağılımlarını inceledikleri çalışmada elde ettikleri sayısal sonuçların literatürde mevcut deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum sağladıklarını vurgulamışlardır. Yüksek bir binanın 1:200 ölçekli modeli etrafındaki üç boyutlu akış alanı, RNG k-ε türbülans modeli Revuz [6] tarafından hesaplanmıştır. Kim ve Baik [7], bir bina dizisi etrafındaki rüzgar akışını ve kirletici gazların dağılımını sayısal olarak incelemiştir. RNG k-ε türbülans modelini kullanarak farklı rüzgar açıları için gerçekleştirdikleri çalışmada, rüzgar açılarının binalar etrafında oluşan akış yapılarını önemli ölçüde etkilediğini vurgulamışlardır. Merrick ve Bitsuamlak [8], “Standart CAARC Binası”nın 1:400 ölçekli modelini kullanarak sayısal ve deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Tekli ve çiftli bina konfigürasyonları şeklinde çeşitlendirdikleri çalışmalarının sayısal kısmında, RNG k-ε ve LES türbülans modelleri kullanmışlardır. RNG k-ε türbülans modeli ile karşılaştırıldığında, LES türbülans modelinin deneysel verilerle çok daha uyumlu sonuçlar ürettiğini belirtmişlerdir. Özmen ve Aksu [9], düz çatılı silindirik bir yüksek bina modeli üzerindeki türbülanslı akışı deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Zoubi ve diğ. [10], “Chongqing Municipality” iş merkezi binasının 1:300 ölçekli modelini kullanarak rüzgar tüneli çalışmaları ve sayısal çözümler gerçekleştirmişlerdir. Rüzgar tüneli deneyleri sonucunda, 0° rüzgar açısında bina ön yüzeyinde pozitif basınç katsayılarının, bina yan ve arka yüzeylerinde negatif basınç katsayılarının meydana geldiğini, bina köşelerinde ise basınç katsayılarının pik değerler aldığını vurgulamışlardır. Sayısal çözümlerden elde edilen basınç katsayılarının, rüzgar tüneli sonuçlarıyla genel olarak uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Guirguis ve Nassief [11], farklı boyutlardaki bina modelleri etrafındaki akış yapılarını belirlemek için rüzgar tüneli deneyleri ve sayısal çözümler gerçekleştirmişlerdir. Bina boyutundaki değişimin akış alanına ve bina yüzeylerindeki basınç dağılımına etkisinin incelendiği çalışmada, bina ön yüzünün arka ve yan yüzlere göre daha yüksek basınçların etkisi altında olduğunu ve bina ön yüzeylerinde oluşan durma noktasının bina yüksekliğinin yaklaşık 2/3’ü gibi bir yükseklikte oluştuğunu belirtmişlerdir.

Çalışma konusu ile ilgili literatür değerlendirildiğinde, literatürde yüksek bina modelleri üzerindeki akış alanlarının incelendiği araştırmalar mevcut olmasına rağmen, farklı türbülans modellerinin hassasiyetlerinin incelendiği araştırmaların az sayıda olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, kare kesite sahip bir yüksek bina modeli üzerindeki akış alanının, üç boyutlu ve zaman bağımsız olarak sayısal incelenmesi amaçlanmaktadır. Farklı türbülans modellerinin deneysel sonuçlar karşısındaki hassasiyetlerinin değerlendirileceği çalışmanın bu alanda çalışacaklar için faydalı veriler sağlayacağı düşünülmektedir.

## 2. SAYISAL ÇALIŞMA

### 2.1. Matematiksel Model

Sıkıştırılamaz bir akışkanın üç boyutlu sürekli hareketi kartezyen koordinatlarda,

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

şeklinde süreklilik denklemi ve

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) &= -\frac{\partial P}{\partial x_j} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j'}) \end{aligned} \quad (2)$$

şeklinde Navier-Stokes denklemleri ile ifade edilmektedir. Bu denklemlerde yer alan çalkantı terimlerinin hesaplanmasına yönelik olarak çok sayıda türbülans modeli geliştirilmiş ve geliştirilmektedir. Bu çalışma kapsamında, Standard k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε ve Standart k-ω türbülans modelleriyle çözümler gerçekleştirilmiştir.

Launder ve Spalding [12] tarafından önerilen Standard k-ε türbülans modeli, kolay uygulanması nedeniyle, günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yarı amprik bir model olan Standard k-ε türbülans modelinde, türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yutulma oranı (ε),

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

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

şeklinde iki adet transport denkleminde oluşmaktadır. Burada;  $G_k$ , ortalama hız gradyanına bağlı oluşan türbülans kinetik enerjisini,  $G_b$ , kaldırma kuvvetine bağlı oluşan türbülans kinetik enerjisini,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$ , model sabitlerini,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$ ,  $k$  ve  $\varepsilon$  için türbülans Prandtl sayılarını,  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$ , kaynak terimlerini ve  $Y_M$ , sıkıştırılabilir türbülanslı bölge içindeki türbülans hacim değişiminin toplam yayılım oranına katkısını ifade etmektedir. Denklemlerde yer alan ' $\mu_t$ ', türbülans viskozitesi,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Model sabitleri  $C_{1\varepsilon}=1.44$ ,  $C_{2\varepsilon}=1.92$ ,  $C_\mu=0.09$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$  şeklindedir.

RNG k- $\varepsilon$  türbülans modeli, Navier-Stokes denklemlerinin "renormalisation group (RNG)" metodu olarak bilinen bir matematiksel teknikle çözülmesiyle elde edilmiştir. RNG metodu kullanılarak çözülen denklemlerin oluşturduğu model Standard k- $\varepsilon$  modeline göre farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar, oluşan yeni katsayılar, eklenen yeni terimler ve transport denklemlerindeki değişimler şeklindedir. RNG k- $\varepsilon$  türbülans modelinde transport denklemleri,

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \alpha_k \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \alpha_k \mu_{eff} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) \\ - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

şeklinde oluşmaktadır. Burada;  $G_k$ ,  $G_b$ ,  $S_k$ ,  $Y_M$  ve  $S_\varepsilon$ , Standard k- $\varepsilon$  modelindeki terimler ile aynı olmakta,  $\alpha_k$ ,  $k$  için ters etkili Prandtl sayısı,  $\alpha_\varepsilon$ ,  $\varepsilon$  için ters etkili Prandtl sayısı,  $\mu_{eff}$ , efektif viskozite,  $R_\varepsilon$ , RNG modelinde  $\varepsilon$  için kullanılan ek terim,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$ : model sabitleri olarak tanımlanmaktadır.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  model sabitleri, RNG k- $\varepsilon$  türbülans modelinde analitik olarak  $C_{1\varepsilon}=1.42$ ,  $C_{2\varepsilon}=1.68$  şeklinde belirlenmişlerdir.

Shih ve diğ. [13] tarafından önerilen Realizable k- $\varepsilon$  model, türbülanslı akışın fiziği ile ilgili normal gerilmeler üzerindeki belli matematiksel sınırlamaları aşmaya yönelik bir yaklaşım getirmektedir. Bu yaklaşımda,  $\delta_{ij}$  kroneker delta olmak üzere, sıkıştırılmaz bir akış için Reynolds gerilmeleri,

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$-\frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Türbülans viskozitesi

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

ve normal gerilmeler

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3} k - 2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \quad (10)$$

olarak tanımlanmaktadır. Türbülans viskozitesi ifadesinde yer alan  $C_\mu$  terimi değişken olup, ana şekil değişimi, rotasyon oranı ve sistemin açılma hızının bir fonksiyonudur.  $k$  ve  $\varepsilon$  için modellenmiş transport denklemleri,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \quad (12)$$

$$\rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

şeklinde dir. Bu denklemlerde,  $G_k$ , ortalama hız gradyenti nedeniyle türbülanslı kinetik enerji üretimini;  $G_b$ , kaldırma kuvveti nedeniyle türbülanslı kinetik enerji üretimini ifade etmektedir.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$  sabitler olup,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  ise türbülans Prandtl sayılarıdır.  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$  sırasıyla,  $k$  ve  $\varepsilon$  için kaynak terimleridir.

Realizable k-ε modelinde kullanılan sabitler,  $C_{1\varepsilon}=1.44$ ,  $C_2=1.9$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.2$  şeklindedir.

Standard k-ω türbülans modelinde,  $k$  türbülans kinetik enerjisi;  $\omega$  ise yutulmanın kinetik enerjiye oranını ( $\omega = \varepsilon / k$ ) ifade etmektedir. Bu modelde türbülans viskozitesi,

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (13)$$

olarak tanımlanmaktadır. Türbülans kinetik enerji ( $k$ ) ve özgül yutulma ( $\omega$ ) için transport denklemleri,

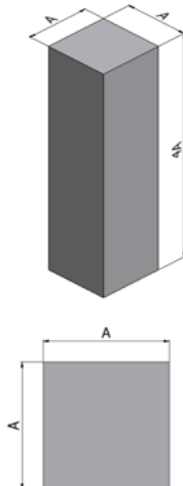
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (15)$$

şeklindedir. Bu denklemlerde,  $G_k$ , ortalama hız gradyanları nedeniyle türbülans kinetik enerjisi üretimini;  $G_\omega$ ,  $\omega$  nın üretimini ifade etmektedir.  $\Gamma_k$  ve  $\Gamma_\omega$ ,  $k$  ve  $\omega$  için efektif difüzyivite;  $S_k$  ve  $S_\omega$  ise, kaynak terimleridir.

## 2.2. Bina Modeli

Şekil 1’de kare kesitli yüksek bina modeli görülmektedir. Karşılaştırma amaçlı deneysel sonuçlarından yararlanılacak kare kesitli bina modelinin boyutları esas alınarak model kesit kenar uzunluğu  $A=120$  mm, model yüksekliği  $H=480$  mm seçilmiştir. Buna göre mevcut çalışma için bina yükseklik-genişlik oranı  $H/A=4$  olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Kare kesitli yüksek bina modeli

## 2.3. Akış Alanı ve Sınır Şartları

Kare kesitli yüksek bina modelinin üç boyutlu akış alanındaki yerleşim düzeni Şekil 2’de görülmektedir. Akış alanı boyutlarının, sayısal çözümün doğruluğu üzerindeki etkisi son derece önemlidir. Bu nedenle, model etrafında model yüksekliğine göre tanımlanmış ve akış alanının sınırlarını gösteren mesafeler, literatüre uygun olarak belirlenmiştir [14].

Üç boyutlu akış alanında geçerli sınır şartları Şekil 3’de görülmektedir. İncelenen bütün modeller etrafındaki akış alanları için aynı olan sınır şartları, girişte “VELOCITY INLET”, çıkışta “PRESSURE OUTLET” ve duvarlarda “WALL” olarak tanımlanmıştır.

FLUENT bünyesinde bulunan “User Defined Function (UDF)” özelliği kullanılarak kentsel arazi için oluşturulmuş ve Şekil 4’de görülen ortalama hız ve türbülans profilleri, akış alanlarında giriş sınır şartı olarak kullanılmıştır.  $u_* = 0.836$  m/s, model yüksekliği seviyesinde sürtünme hızı,  $y_0 = 0.0032$  m pürüz yüksekliği,  $K=0.4187$ , von Karman sabiti,  $C_\mu=0.09$ , model sabiti ve  $\delta=0.8$  m, sınır tabaka kalınlığı olmak üzere, ortalama hız ( $u$ ), türbülans kinetik enerji ( $k$ ), yutulma ( $\varepsilon$ ) ve özgül yutulma ( $\omega$ ) için giriş profilleri bağıntıları,

ortalama hız profili ( $U$ ):

$$U = \left( \frac{U_*}{K} \right) \ln \left( \frac{y}{y_0} \right) \quad (16)$$

türbülans kinetik enerji ( $k$ ):

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right) \quad (17)$$

yutulma ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{K y} \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right) \quad (18)$$

özgül yutulma ( $\omega$ ):

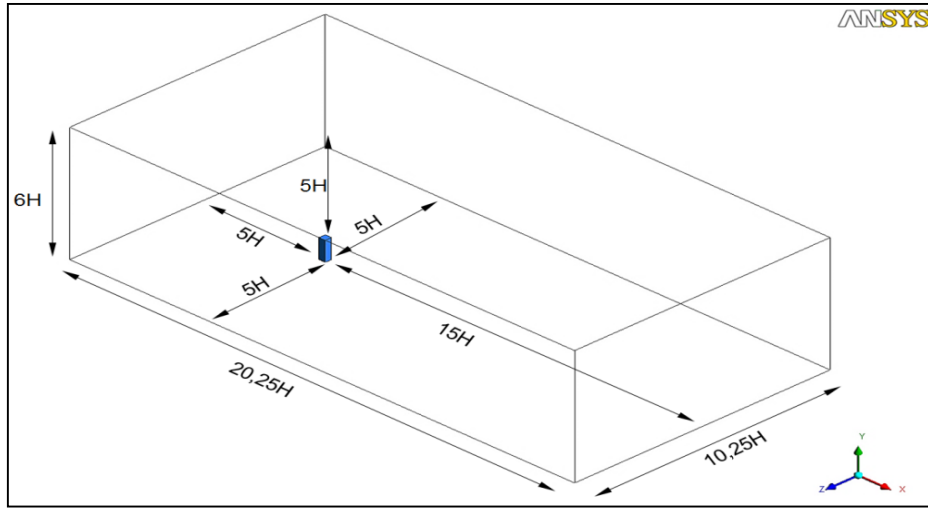
$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (19)$$

şeklindedir.

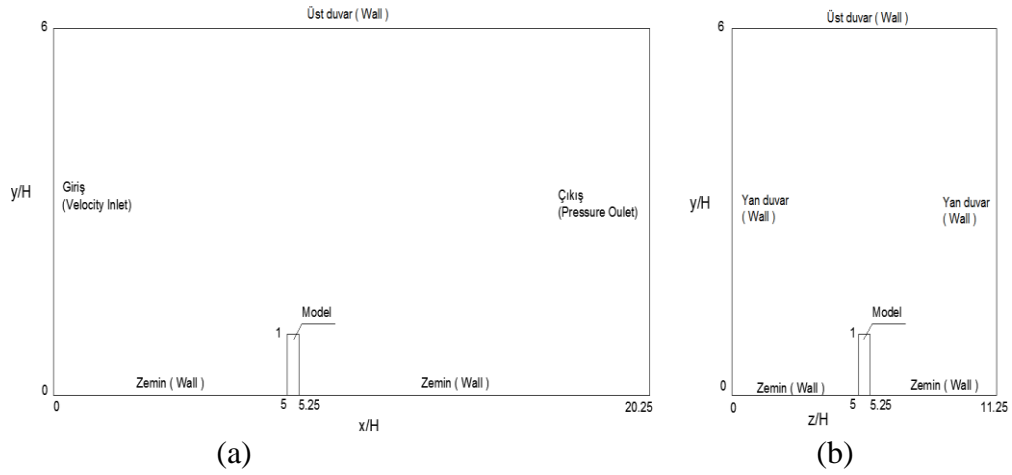
$U_0$ , serbest akış hızı,  $H$ , model yüksekliği ve  $\nu$ , kinematik viskozite olmak üzere, Reynolds sayısı,

$$Re = U_0 H / \nu \quad (20)$$

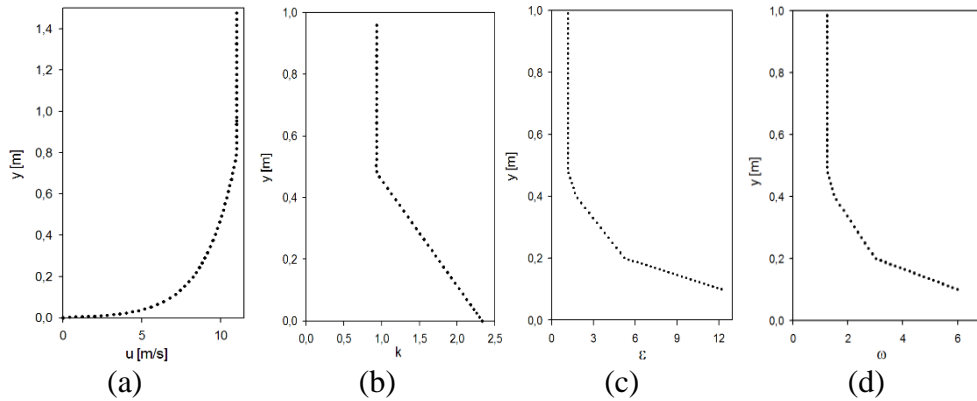
olarak tanımlanmıştır. Çalışmada, model yüksekliğine göre tanımlanmış Reynolds sayısı  $3.5 \times 10^5$  değerindedir.



Şekil 2. Akış alanı boyutları



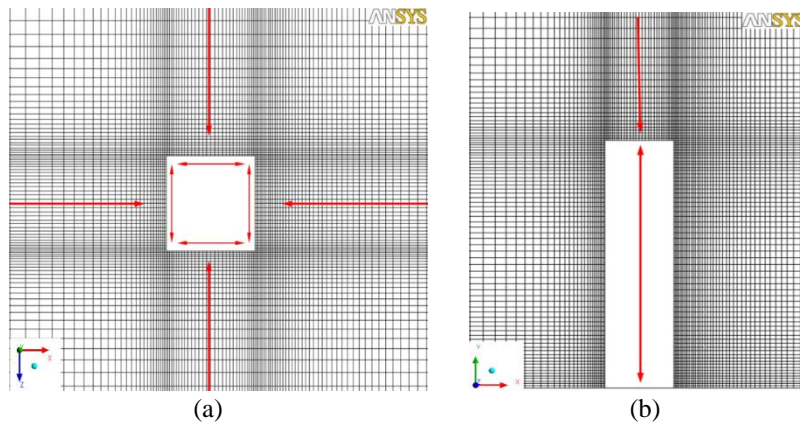
Şekil 3. Akış alanı için kullanılan sınır şartları (a) ön görünüş (b) yan görünüş

Şekil 4. Kentsel arazi şartları için oluşturulmuş giriş profilleri  
(a) ortalama hız (b) türbülans kinetik enerji (c) yutulma (d) özgül yutulma

## 2.4. Çözüm Yöntemi

Yüksek bina modeli etrafındaki üç boyutlu akış alanının sayısal çözümleri, ANSYS bünyesinde bulunan FLUENT 14.0 paket programı kullanılarak, Intel İ7 işlemci ve 16 GB RAM özelliklerine sahip bir kişisel bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Bina modeline ait geometri, "Solidworks 12.0" çizim programında oluşturulup daha sonra ANSYS bünyesine aktarılmıştır. Akış alanında ağ oluşturma işlemi için ANSYS bünyesinde bulunan ICEM CFD 12.0 programı kullanılmıştır. Sayısal çözümde Standard k-ε, Realizable k-ε, RNG k-ε ve Standard k-ω türbülans modelleri kullanılmıştır. Duvar yaklaşımı olarak Standart Duvar

Fonksiyonu (Standard Wall Function) kullanılmıştır. İteratif çözücü olarak SIMPLE algoritması esas alınmıştır. Değişkenlerin ağ noktaları arasındaki değişim için, Second Order Upwind çözüm yolu izlenmiştir. Normalize edilmemiş artıkların  $1 \cdot 10^{-6}$ 'dan küçük olma şartı, çözüm yakınsama kriteri olarak alınmıştır. Bina modeli etrafındaki ağ yapısı, Şekil 5'de görüldüğü gibi model etrafında ok yönünde sıklaşan bir düzende oluşturulmuştur. Modelden uzak bölgelerde ise ağ yapısı giderek seyrekleşmektedir. Ağdan bağımsız çözümler elde edebilmek için farklı sayıdaki ağ yapıları ile denemeler yapılmıştır. Bu şekilde oluşturulan dörtgen ağ düzeni ile hesap alanında ağdan bağımsız çözümlerin sağlandığı yaklaşık 2800000'lik ağ kullanılmıştır.



Şekil 5. Kare kesiti bina modeli etrafındaki ağ düzeni  
(a) yatay plan (b) düşey plan

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen sayısal sonuçlar, hesaplanmış akış alanı görüntüleri, model etrafında ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri ve model yüzeylerinde ortalama basınç katsayısı dağılımları şeklinde değerlendirilmiştir.

### 3.1. Hesaplanmış Akış Alanları

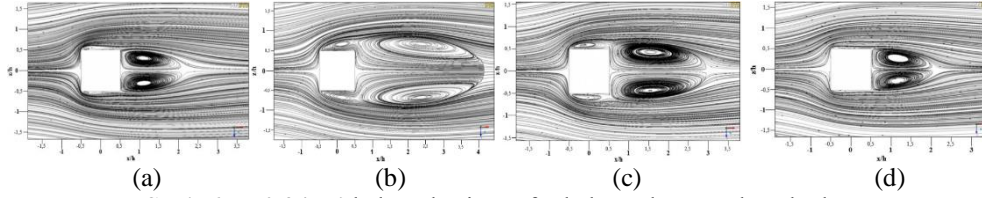
Yüksek bina modelinin  $y=0.24$  m seviyesindeki kare kesiti etrafında dört farklı türbülans modeli ile hesaplanmış iki boyutlu akış alanları Şekil 6'da verilmiştir. Farklı türbülans modelleri ile hesaplanmış akış alanlarının genel olarak benzer olduğu, ancak oluşan girdap yapılarının boyutlarında farklılık olduğu görülmektedir. Kare kesitin ön kenarına gelen akış, durma noktasından itibaren yönlenecek ön köşelerden ayrılmakta ve akışa paralel durumdaki yan kenarlar üzerinde küçük ölçekli simetrik girdap bölgeleri oluşturmaktadır. Akış yönünde yan kenarlar üzerinde tutunan akış, arka köşelerden tekrar ayrılarak kare kesit arkasında birbirine göre ters yönde dönen simetrik girdap çiftlerini oluşturmaktadır. Standard k-ε ve Standard k-ω türbülans modelleri ile hesaplanan akış alanı yapılarının

hemen hemen aynı olduğu ve bu modellerle hesaplanan girdap boyutlarının RNG k-ε ve Realizable k-ε türbülans modeli ile hesaplanana göre daha küçük olduğu görülmektedir (Şekil 6a-d). Kare kesit arkasında oluşan girdap boyutları RNG k-ε türbülans modelinde en büyük olmakta ve yan kenarlarda oluşan girdaplarla bütünleşik bir görüntü oluşturmaktadır (Şekil 6b). Kare kesitin yan kenarları üzerinde ve arkasında hesaplanmış girdap yapıları, Realizable k-ε türbülans modelinde daha düzgün bir görüntüde olmaktadır (Şekil 6c).

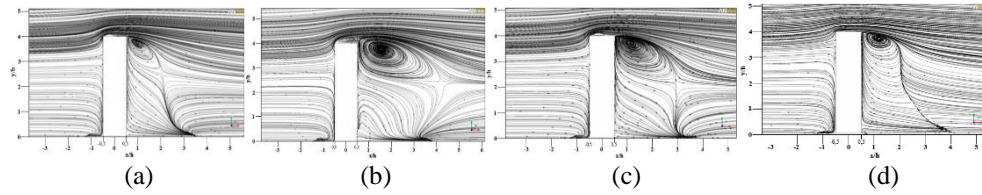
Kare kesitli yüksek bina modelinin düşey orta düzlemi üzerinde ( $z=2.46$  m'deki xy-düzleminde) dört farklı türbülans modeli ile hesaplanmış iki boyutlu akış alanları Şekil 7'de görülmektedir. Model ön yüzüne gelen akış, model tabanından itibaren model yüksekliğinin  $3/4$ 'ü seviyesinde oluşan durma noktasından itibaren aşağı ve yukarı doğru yönlenecektir. Aşağı doğru yönlenecek akış nedeniyle model tabanına yakın küçük ölçekli bir ters akış bölgesi olmaktadır. Yukarı doğru yönlenecek akış ise, model ön üst köşesinden ayrılmakta ve model üzerinde ve model arkasında ters akış bölgeleri oluşturmaktadır.

Dört farklı türbülans modeli ile hesaplanmış akış alanının da genel olarak benzer olduğu görülmektedir. Model arkasında model yüksekliği seviyesinde oluşan girdap bölgeleri karşılaştırıldığında, en büyük girdap boyutunun RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli ile hesaplandığı

görülmektedir (Şekil 7b). Standard k- $\epsilon$  ve Standard k- $\omega$  türbülans modelleri ile hesaplanan akış alanı yapılarının hemen hemen aynı olduğu ve girdap boyutlarının RNG k- $\epsilon$  ve Realizable k- $\epsilon$  türbülans modeli sonuçlarına göre daha küçük olduğu görülmektedir (Şekil 7a,d).



Şekil 6.  $y=0.24$  m'de kare kesit etrafında hesaplanmış akış alanları  
(a) Standard k- $\epsilon$  (b) RNG k- $\epsilon$  (c) Realizable k- $\epsilon$  (d) Standard k- $\omega$



Şekil 7.  $z=2.46$  m'de kare kesitli bina modeli üzerinde hesaplanmış akış alanları  
(a) Standard k- $\epsilon$  (b) RNG k- $\epsilon$  (c) Realizable k- $\epsilon$  (d) Standard k- $\omega$

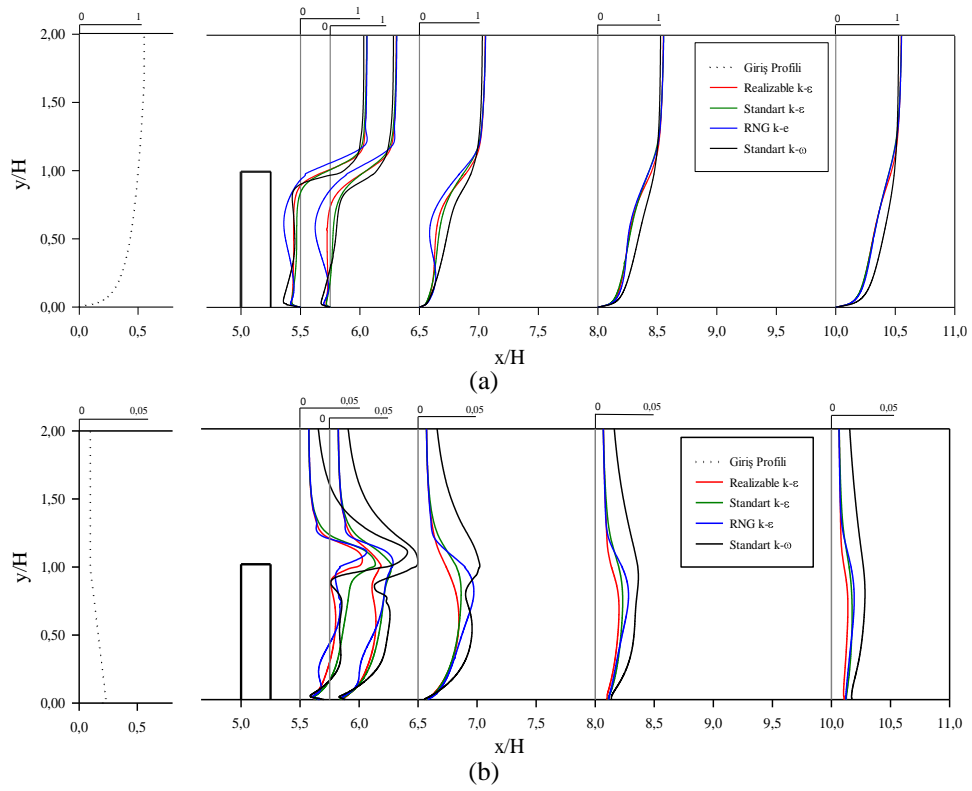
### 3.2. Ortalama Hız ve Türbülans Kinetik Enerji Profilleri

Yüksek bina modeli etrafındaki akış yapılarının incelenmesi için, yatay ve düşey düzlemlerde farklı istasyonlarda dört farklı türbülans modeli ile ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri hesaplanmıştır. Model yüksekliğine bağlı Reynolds sayısı  $3.5 \times 10^5$  ve  $\delta/H$  oranı 1.67 dir. Yatay, düşey ve enine koordinatlar, x, y ve z karakteristik model yüksekliği H ile boyutsuz yapılmıştır.

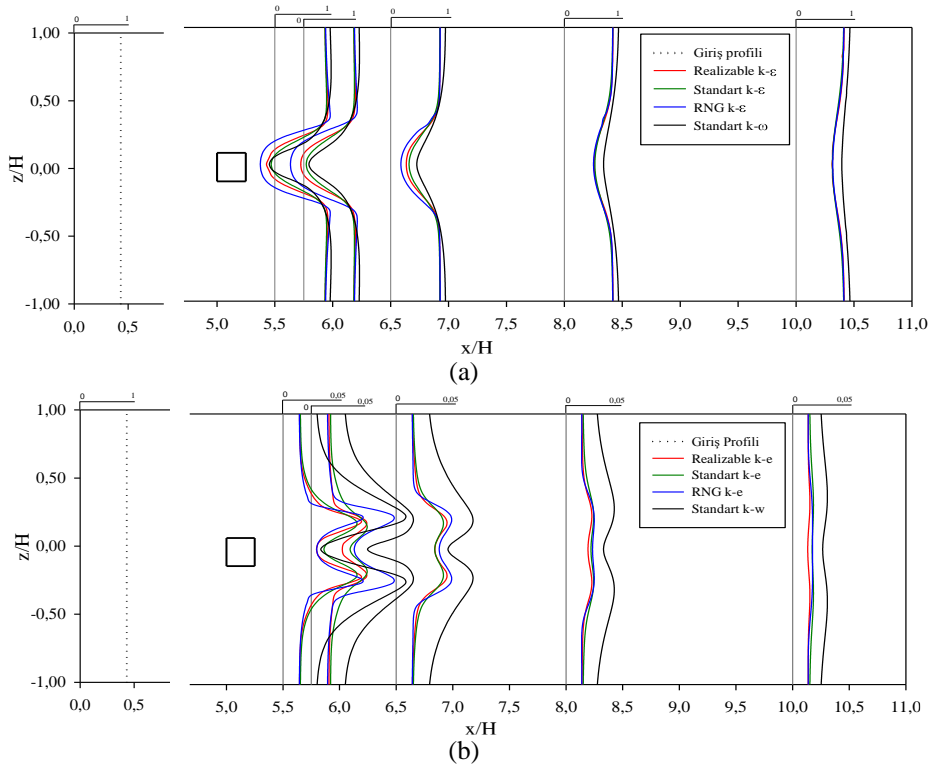
Kare kesitli yüksek bina modeli arkasında orta eksen boyunca değişik istasyonlarda düşey doğrultuda Standard k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$ , Realizable k- $\epsilon$  ve Standard k- $\omega$  türbülans modelleriyle hesaplanan ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri Şekil 8'de görülmektedir. Şekil 8a'da verilen ortalama hız profillerinden, model arkasında model yüksekliği seviyesinde bir ters akış bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Aynı istasyondaki türbülans kinetik enerji profilleri incelendiğinde, türbülans şiddetinin model yüksekliği seviyesinde aldığı en büyük değerler, serbest akış ve ters akış bölgesi arasındaki karışım tabakasının varlığını desteklemektedir (Şekil 8b). Model arkasında ilerleyen istasyonlarda ortalama hız profillerinin formu, ters akış bölgesinin sonlandığını göstermektedir. Aynı istasyonlarda model yüksekliği seviyesinde türbülans kinetik enerji değerlerinin de azaldığı görülmektedir.

Dört farklı türbülans modeli ile hesaplanan profiller değerlendirildiğinde, Standard k- $\omega$  türbülans modeliyle hesaplanan profillerin diğer türbülans modelleriyle hesaplanan profillerden farklılaştığı görülmektedir. Standard k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$  ve Realizable k- $\epsilon$  türbülans modelleri ile hesaplanan profiller arasındaki uyum, ters akış bölgelerinde azalmaktadır.

Şekil 9'da, kare kesitli yüksek bina modeli arkasında, modelin yarı yüksekliği seviyesinde ( $y=0.24$  m), yatay doğrultuda değişik istasyonlarda hesaplanan ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri görülmektedir. Model arkasındaki iz bölgesinde ortalama hız değerleri azalmaktadır (Şekil 9a). Akış yönünde ilerleyen istasyonlarda hız değerlerindeki azalma etkisini kaybetmektedir. Model arkasındaki türbülans kinetik enerji profillerinde, modelin her iki yanından kopan girdaplar nedeniyle türbülans kinetik enerji değerlerinde artışı ifade eden iki tepeli bir görüntü oluşmaktadır. Model arkasında ilerleyen istasyonlarda iki tepeli görüntü ortadan kalkmaktadır (Şekil 9b). Farklı türbülans modelleriyle elde edilmiş profiller incelendiğinde yine Standard k- $\omega$  türbülans modeliyle hesaplanan profillerin diğer türbülans modelleriyle hesaplanan profillerden farklılaştığı görülmektedir. Standard k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$  ve Realizable k- $\epsilon$  türbülans modelleri ile hesaplanan profiller arasındaki küçük farklar iz bölgesinde ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 8.** Kare kesitli model orta eksenli boyunca düşey doğrultuda hesaplanan profiller (a) ortalama hız (b) türbülans kinetik enerji



**Şekil 9.** Kare kesitli model orta yüksekliğinde ( $y=0.24$  m) yatay doğrultuda hesaplanan profiller (a) ortalama hız (b) türbülans kinetik enerji



### 3.3. Basınç Dağılımları

Çalışma kapsamında incelenen yüksek bina modelinin yüzeylerindeki basınç dağılımları,  $\Delta P$ , yüzey basıncı ve ortam basıncı arasındaki fark olmak üzere,

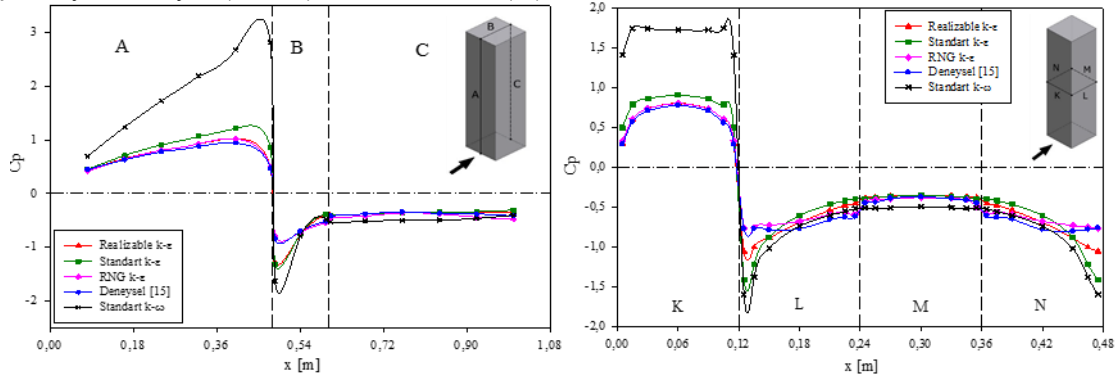
$$C_p = (P - P_s) / (0.5 \rho U_0^2) \quad (21)$$

şeklinde tanımlanan yüzey basınç katsayısı cinsinden verilmiştir. Düşey düzlemde kare kesitli bina modeli yüzeylerinin orta eksenleri boyunca devam eden hat üzerinde ve yatay düzlemde  $y=0.24$  m seviyesinde kare kesit kenarları boyunca farklı türbülans modelleri ile hesaplanmış basınç dağılımları, aynı yerlerdeki deneysel sonuçlarla birlikte sırasıyla Şekil 10a ve 10b'de verilmiştir. Şekil 10a'da görüldüğü gibi rüzgara doğrudan maruz kalan ön yüzeyde (A) itme etkisi nedeniyle basınç katsayıları pozitif değerler almaktadır. Binanın ön yüzeyinin üst kenarından ayrılan akış nedeniyle bina düz çatısı üzerinde (B) ve arka duvarda (C) negatif bir basınç alanı oluşmaktadır. Çatı ön kenarından ayrılan akış çatı yüzeyine tekrar tutunduktan sonra arka yüzeyden tekrar ayrılmaktadır. Bina arkasında meydana gelen ters akış nedeniyle arka duvar emme etkisi altında olup bu yüzeyde aynı değerlerde negatif basınç katsayıları oluşmaktadır. En kritik negatif basınçlar, çatı ön kenarından ayrılmış akış bölgesinde oluşmakta ve çatı üzerinde ilerledikçe aşamalı olarak azalmaktadır. Standard k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$  ve Realizable k- $\epsilon$  türbülans modelleri ile hesaplanan basınç katsayılarının deneysel verilerle genel olarak uyumlu olduğu, ancak Standard k- $\omega$  türbülans modelinin basınç katsayılarını daha büyük değerler olarak hesapladığı görülmektedir. k- $\epsilon$  türbülans modelinin üç farklı türü ile hesaplanmış basınç katsayıları değerlendirildiğinde, deneysel verilere en yakın sonuçların RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli ile elde edildiği görülmüştür. RNG k- $\epsilon$  türbülans modelinin başarısı özellikle çatı üzerindeki basınç dağılımında ortaya çıkmaktadır.

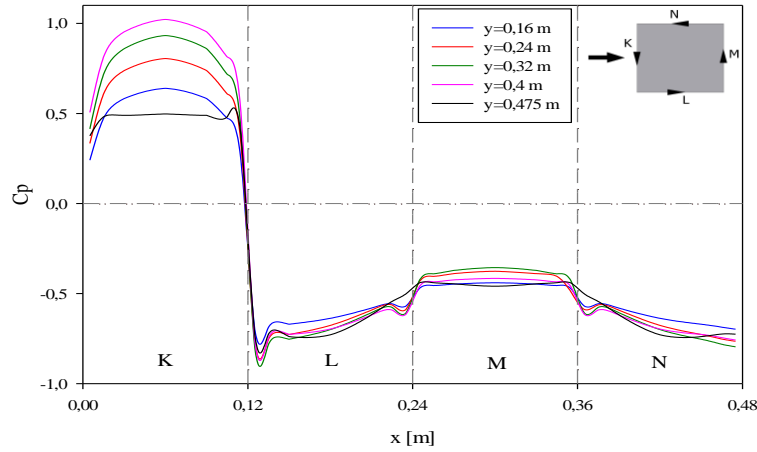
Şekil 10b'de  $y=0.24$  m'deki kesit kenarları boyunca basınç dağılımı incelendiğinde, akışa doğrudan maruz kalan ön duvarda (K) itme etkisinden dolayı pozitif basınç katsayılarının, yan (L ve N) ve arka duvarda (M)

ise emme etkisinden dolayı negatif basınç katsayılarının olduğu görülmektedir. Model yan yüzeylerinde oluşan negatif basınç katsayıları, arka yüzeyde oluşan negatif basınç katsayılarından daha kritik olmaktadır. Model ön yüzeyinin yan kenarlarından ayrılan akış nedeniyle, yan yüzeylerdeki ayrılmış akış bölgelerinde negatif pik basınç katsayısı değerleri meydana gelmektedir. k- $\epsilon$  türbülans modellerinin genel olarak basınç dağılımlarını deneysel verilere yakın hesapladığı görülmektedir. Standard k- $\omega$  türbülans modeli bina ön yüzünde oluşan pozitif basınç katsayılarını diğer türbülans modellerine ve deneysel verilere göre çok daha büyük olarak hesaplamaktadır. RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli dışındaki tüm türbülans modelleri ayrılmanın gerçekleştiği bölgelerdeki kritik emme basıncı değerlerini deneysel verilerden daha büyük hesaplamışlardır. Kare kesitli yüksek bina modelinin tabanından itibaren farklı yüksekliklerdeki kesitlerinde RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli ile hesaplanmış basınç katsayılarının bir aradaki görüntüsü Şekil 11'de verilmiştir. Kare kesitli modelde, artan yükseklikle birlikte ön yüzey boyunca basınç katsayılarının arttığı, ancak model yüksekliğine yakın kesitte ( $y=0.475$  m) birden azaldığı görülmektedir. Yan yüzeyler (L ve N) ve arka yüzeyde (M) hesaplanmış basınç katsayıları ise tüm yüksekliklerde hemen hemen birbirine yakın değerlerde oluşmaktadır.

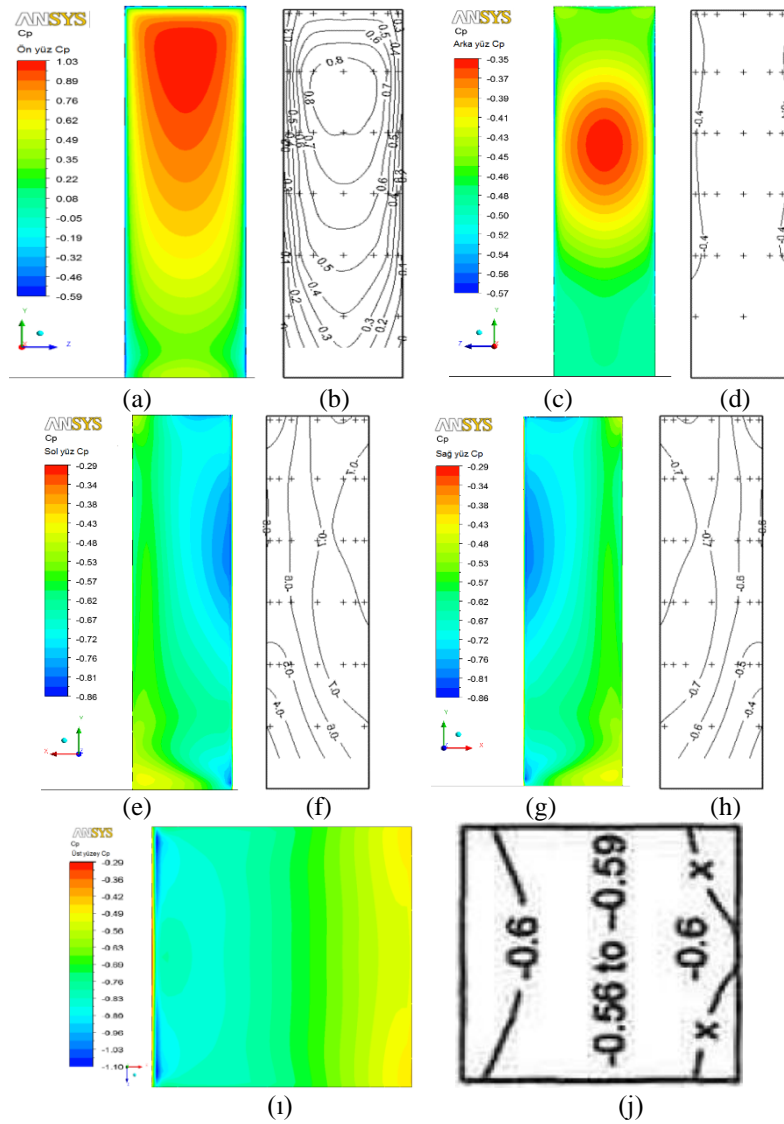
Kare kesitli bina modeli yüzeylerinde RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli ile eş basınç alanı olarak hesaplanmış basınç dağılımlarının, aynı yüzeylere ait deneysel basınç dağılımları ile birlikte görüntüleri Şekil 12'de verilmektedir. Model yüzeylerinde hesaplanmış eş basınç alanlarının, aynı yüzeylerde ölçülmüş basınç dağılımları ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Hem hesaplanmış hem de ölçülmüş basınç dağılımlarından ön yüzeydeki basınç katsayılarının pozitif, yan, arka ve üst yüzeylerdeki basınç katsayılarının ise negatif olduğu görülmektedir. Model ön yüzeyinin yan ve üst kenarlarından ayrılan akışlar nedeniyle kritik basınçlar modelin yan ve üst duvarlarının ön kısmında oluşmaktadır. Ayrılmanın başladığı bölümlerde pik değerler alan basınç katsayıları, arka tarafa doğru hafiflemektedir.



**Şekil 10.** Model kesit kenarları boyunca basınç dağılımları  
(a) Düşey düzlemde model orta eksenleri boyunca basınç katsayıları  
(b) Yatay düzlemde  $y=0.24$  m de kesit kenarları boyunca basınç katsayıları



Şekil 11. Kesit kenarlarında RNG k-ε türbülans modeli ile hesaplanmış basınç katsayılarının yükseklikle değişimi



Şekil 12. Kare kesitli bina modeli yüzeylerinde RNG k-ε türbülans modeli ile hesaplanmış ve ölçülmüş [15] eş basınç alanları (a) ön yüzey, sayısal (b) ön yüzey, deneysel (c) arka yüzey, sayısal (d) arka yüzey, deneysel (e) sol yüzey, sayısal (f) sol yüzey, deneysel (g) sağ yüzey, sayısal (h) sağ yüzey, deneysel (i) üst yüzey, sayısal (j) üst yüzey, deneysel

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kare kesitli bir yüksek bina modeli etrafındaki akış alanı üç boyutlu ve zaman bağımsız olarak farklı türbülans modelleri ile hesaplanmıştır. Kare kesitli yüksek bina modelinde, akış, ön köşelerden ayrılmakta ve akışa paralel durumdaki yan kenarlar üzerinde küçük ölçekli girdap bölgeleri ve kesit arkasında birbirine göre ters yönde dönen bir simetrik girdap çifti oluşturmaktadır. Akış alanında hesaplanmış ortalama hız profillerinden, bina modelleri arkasında model yüksekliği seviyesinde ters akış bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. Türbülans kinetik enerji profillerinde, türbülans şiddetinin aldığı en büyük değerler, serbest akış ve ters akış bölgeleri arasında oluşan karışım tabakasının varlığını desteklemektedir. Yüksek bina modelinde en kritik negatif basınçlar, ön yüzeyin kenarlarından ayrılmış akış bölgelerinde oluşmaktadır. Kare kesitli bina modelinin yüzeyleri üzerinde yatay ve düşey doğrultularda farklı türbülans modelleri ile hesaplanmış basınç dağılımları değerlendirildiğinde, deneysel verilerle en iyi uyumun RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli ile sağlandığı görülmektedir.

#### 5. KAYNAKLAR

- [1]. Zikov E.A., Liabchuk A.V., Obukhovskiy A.D., Salenko S.D., Telkova J.V. "Investigation in Wind Tunnel Flow Interaction with Models of two High-Rise Apartment Houses" International Conference on Methods of Aerophysical Research (ICMAR), Russia, 2008.
- [2]. Kawai H. "Effects of Corner Modifications on Aeroelastic Instabilities of Tall Buildings", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76, 719-729, 1998.
- [3]. Ikhwan M., Ruck B. "Flow and Pressure Field Characteristics Around Pyramidal Buildings", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 94, 745-765, 2006.
- [4]. Tominaga Y., Mochida A., Murakami S., Sawaki S. "Comparison of Various Revised k- $\epsilon$  Models and LES Applied to Flow Around a High-rise Building Model with 1:1:2 Shape Placed within the Surface Boundary Layer", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96, 389-411, 2008.
- [5]. Braun A.L., Awruch A.M. "Aerodynamic and Aeroelastic Analyses on the CAARC Standard Tall Building Model Using Numerical Simulation", Computers and Structures 87, 564-581, 2009.
- [6]. Revuz J. "Numerical Simulation of the Wind Flow Around a Tall Building and its Dynamic Response to Wind Excitation", PhD, The University of Nottingham, School of Civil Engineering, 2011.
- [7]. Kim J.J., Baik J.J. "A Numerical Study of the Effects of Ambient Wind Direction on Flow and Dispersion in Urban Street Canyons Using the RNG k- $\epsilon$  Turbulence Model", Atmospheric Environment 38, 3039-3048, 2004.
- [8]. Merrick R., Bitsuamlak G. "Shape Effects on the Wind-Induced Response of High-Rise Buildings", Journal of Wind and Engineering 6, 2, 1-18, 2009.
- [9]. Özmen Y., Aksu E. "Düz Çatılı Silindirik Bir Bina Üzerinden Türbülanslı Akış", 19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Samsun, Eylül 2013.
- [10]. Zoubi F., Zheng-liang L., Qi-ke W., Yi, S. "Wind Tunnel Testing and Numerical Simulation of Wind Pressure on a High-Rise Building", J. Chongqing Univ. Eng. Ed. 47-53, 2010.
- [11]. Guirguis N.M., Nassief M.M. "Numerical and Experimental Study of Wind Load Around Buildings of Different Heights", Eighth International Congress of Fluid Dynamics & Propulsion, Egypt, December 2006.
- [12]. Launder B.E., Spalding D.B. "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3, 269-289, 1974.
- [13]. Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A., 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.
- [14]. 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, 2006.
- [15]. Hunte S. "Testing the Application of CFD for Building Design", Master Thesis, Delft University of Technology, Netherland, 2010.