



## The effect of roof and eave pitch angles on pressure distribution on gable roof low-rise buildings

Yücel Özmen\* , Yunus Kopuz

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, 61080, Türkiye

### Highlights:

- The effect of roof pitch angle on pressure distribution
- The effect of eave pitch angle on pressure distribution
- Pressure distributions on building model surfaces

### Keywords:

- Low-rise building
- Gable roof
- Eave
- Pressure coefficient
- Turbulence modelling

### Article Info:

Research Article  
Received: 10.11.2020  
Accepted: 22.12.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.824056

### Correspondence:

Author: Yücel Özmen  
e-mail: yozmen@ktu.edu.tr  
phone: +90 462 377 3576

### Graphical/Tabular Abstract

The wind which is the movement of air caused by thermal and pressure conditions in the atmosphere significantly affects buildings. As a result of the pressure changes on the roofs of the buildings, the roofs that are not aerodynamically suitable can be damaged. The effects of the wind on the roofs of the buildings vary according to the roof geometry. The eaves of the roofs also cause changes in the flow field. In order to determine the negative effects of the wind on the roofs and eaves, the flow fields around the roofs should be examined in detail. In this study, the three-dimensional flow fields around the low-rise building models with a gable roof were computed with different turbulence models. The effect of the change in roof and eave slope angles on the flow field was investigated as mean pressure coefficient distributions on the model surfaces. Pressure coefficients on the building model surfaces of different roof pitch angles were shown in Figure A.

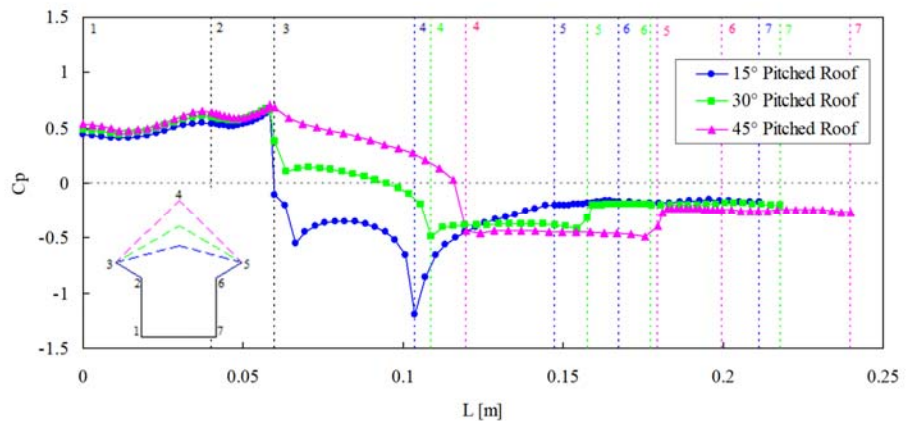


Figure A. Pressure coefficients on the building model surfaces

**Purpose:** The aim of the study is to investigate the effect of the eave's pitch angle on the pressure distributions on the roof surfaces.

### Theory and Methods:

The three-dimensional flow fields around the low-rise building models with a gable roof where the roof pitch angle is 15°, 30°, and 45°, and the eave's pitch angle is 0°, 15°, 30°, 45°, and 60° were computed for the 40000 values of the Reynolds number with Standard k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$ , and Realizable k- $\epsilon$  turbulence models. The wind angle of incidence was considered as 90°. The effect of the change in roof and eave slope angles on the flow field was investigated as mean pressure coefficient distributions on the model surfaces.

### Results:

Geometric changes in building models have created differences in surface pressure distributions. Differences in surface pressure distributions have occurred on the windward roof and eave surfaces. The most critical negative peak pressure coefficients are formed on the ridges of 15° inclined roofs. The difference between two peaks on the windward roof surfaces decreases as the angle of the eave's inclination increases.

### Conclusion:

The numerical results calculated by three different turbulence models are close to each other.



## Çatı ve saçak eğim açısının beşik çatılı alçak binalar üzerindeki basınç dağılımına etkisi

Yücel Özmen\*<sup>ID</sup>, Yunus Kopuz<sup>ID</sup>

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 61080 Ortahisar Trabzon, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Çatı eğim açısının basınç dağılımına etkisi
- Saçak eğim açısının basınç dağılımına etkisi
- Bina modelleri yüzeylerinde basınç dağılımları

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 10.11.2020  
Kabul: 22.12.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.824056

### Anahtar Kelimeler:

Alçak bina,  
beşik çatı,  
saçak,  
basınç katsayısı,  
türbülans modeli

### ÖZ

Bu çalışmada, çatı eğim açısının 15°, 30° ve 45° ve saçak eğim açısının 0°, 15°, 30°, 45° ve 60° olduğu beşik çatılı alçak bina modelleri etrafında sürekli rejimdeki üç boyutlu akış alanları, Reynolds sayısının 40000 değeri için Standard k-ε, RNG k-ε ve Realizable k-ε türbülans modelleri ile hesaplanmıştır. Çatı ve saçak eğim açılarındaki değişikliğin basınç dağılımları üzerindeki etkisi model yüzeylerinde ortalama basınç katsayısı dağılımları şeklinde incelenmiştir. Sayısal çözümlerde rüzgâr geliş açısı 90° olarak dikkate alınmıştır. Bina modellerindeki geometrik değişiklikler yüzey basınç dağılımlarında farklılık oluşturmaktadır. Yüzey basınç dağılımlarındaki belirgin farklılıklar çatı ön yüzeylerinde ve saçak yüzeylerinde ortaya çıkmaktadır. En kritik negatif pik basınç katsayıları 15° eğimli çatıların sırtlarında oluşmakta ve saçak eğim açısı arttıkça ön saçak üzerinde ve çatı sırtında oluşan pikler arasındaki fark azalmaktadır. Üç farklı türbülans modeliyle hesaplanan sayısal sonuçlar birbirine yakın olmaktadır.

## The effect of roof and eave pitch angles on pressure distribution on gable roof low-rise buildings

### HIGHLIGHTS

- The effect of roof pitch angle on pressure distribution
- The effect of eave pitch angle on pressure distribution
- Pressure distributions on building model surfaces

### Article Info

Research Article  
Received: 10.11.2020  
Accepted: 22.12.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.824056

### Keywords:

Keywords:  
Low-rise building,  
gable roof,  
eave,  
pressure coefficient,  
turbulence modelling

### ABSTRACT

In this study, the three-dimensional flow fields in the steady state around the low-rise building models with gable roof where the roof pitch angle is 15°, 30° and 45°, and the eave pitch angle is 0°, 15°, 30°, 45° and 60° were computed for the 40000 value of the Reynolds number with Standard k-ε, RNG k-ε and Realizable k-ε turbulence models. The effect of the change in roof and eave slope angles on the flow field was investigated as mean pressure coefficient distributions on the model surfaces. In numerical solutions, wind angle of incidence is considered as 90°. Geometric changes in building models create differences in surface pressure distributions. Differences in surface pressure distributions occur on the windward roof and eave surfaces. The most critical negative peak pressure coefficients are formed on the ridges of 15° inclined roofs. The difference between two peaks on the windward roof surfaces decreases as the angle of the eave's inclination increases. The numerical results calculated by three different turbulence models are close to each other.

## 1. Giriş (Introduction)

Atmosferde, yüksek basınç bölgesi ile alçak basınç bölgesi arasında yer değiştiren hava akımı olarak tanımlanan rüzgâr, yer yüzeyindeki yapıları önemli ölçüde etkilemektedir. Atmosferik şartların değişkenliği nedeniyle bina çatıları üzerinde meydana gelen basınç değişiklikleri sonucunda, aerodinamik yönden uygun olmayan bina çatıları hasar görebilmekte ve hatta uçabilmektedir. Ayrıca, rüzgâr ve bina arasındaki etkileşim, girdaplara neden olmakta ve oluşan titreşim ve girdaplar hasara yol açabilmektedir. Bina çatıları üzerinde rüzgârın oluşturduğu etkiler, çatı geometrisine göre değişim göstermektedir. Çatıların saçaklı olması da akış alanında değişikliklere neden olmaktadır. Rüzgârın çatılar ve saçaklar üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkilerin belirlenmesi için, çatılar etrafındaki akış alanlarının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Mevcut çalışma, uygulamada karşılaşılan bu olumsuzlukların önlenmesine yönelik uygun çatı ve saçak geometrilerinin belirlenmesini amaçlamaktadır.

Literatürde farklı bina geometrileri etrafındaki akış alanlarının incelenmesine yönelik çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma mevcuttur. Deneysel çalışmalar çoğunlukla rüzgâr tünellerinde modelleme çalışmaları şeklinde gerçekleştirilmekte, sayısal çalışmalar ise türbülans modellerinin hassasiyetine yönelik sonuçlar üretmeyi amaçlamaktadır. Geometrik çeşitliliğe sahip binalar üzerindeki rüzgâr etkilerinin incelenmesinin yanı sıra, son yıllarda yaya konforu ve yüksek binalara entegre rüzgâr türbinlerinin analizini içeren çalışmalar da yaygınlaşmaktadır. Binalarda yükseltme yapılarak gerçekleştirilen geometrik değişiklikler, yaya seviyesindeki rüzgâr konforunu arttırmaktadır. Blocken vd. [1], binalar arasındaki geçit genişliğinin yaya seviyesindeki rüzgâr koşullarına etkisini Realizable k-ε türbülans modeli ile incelendiği çalışmalarında, rüzgâr hızının zemin seviyesine yakın bölgede artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Fan vd. [2], bina modellerinin zeminlerinde bulunan farklı açıklıkların yaya seviyesindeki hava kirletici konsantrasyonları üzerindeki etkisini Standard k-ε türbülans modeli ile incelemişlerdir. Serteser ve Karadağ [3], yüksek bir ofis binasının avlusundaki rüzgârın yaya konforu üzerindeki etkisini sayısal olarak inceledikleri çalışmalarında, sayısal simülasyonların yaya seviyesindeki rüzgâr konforunu iyileştirmeye yönelik etkin bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek bina üzerine ve iki yüksek bina arasındaki boşluğa rüzgâr türbini yerleştirilerek enerji üretmek açısından optimum yerleşim konumunun belirlenmesine yönelik sayısal bir çalışma Veena vd. [4] tarafından gerçekleştirilmiştir. Literatürde mevcut çalışmaların çoğunda model yüzeylerindeki basınç dağılımları incelenmektedir. Alçak binaların çatıları üzerindeki basınç dağılımlarının düz ve pürüzlü arazi durumları için incelendiği ve düz arazilerde basınç katsayısı değerlerinin daha küçük olduğunu gösteren bir çalışma Davenport ve Surry [5] tarafından gerçekleştirilmiştir. Stathopoulos [6], beşik çatılarda, değişen çatı eğim açısıyla birlikte çatı yüzeylerindeki basınç dağılımlarının farklılaştığını belirtmiştir. Kind [7], model yüzeylerindeki ayrıntılı basınç ölçümleriyle gerçekleştirdiği çalışmada, negatif pik basınç değerlerinin çatı köşelerine yakın küçük bölgelerde oluştuğunu ortaya koymuştur. Meecham vd. [8] tarafından kırma ve beşik çatı modellerinin yüzeyleri üzerinde yapılan basınç ölçümleri, emme etkisi açısından kırma çatıların beşik çatılara göre daha uygun olduğunu göstermiştir. Robertson [9], keskin hatlara ve eğrisel forma sahip iki saçak tipi üzerindeki rüzgâr yüklerini karşılaştırmalı olarak incelemiş ve saçak geometrisindeki değişikliğin basınç dağılımlarını etkilediğini belirtmiştir. Stathopoulos ve Luchian [10], saçak detayları olan bir bina modelinin yüzeylerindeki basınç dağılımlarını deneysel olarak belirledikleri çalışmalarında, kritik negatif basınç değerlerinin saçak yakınlarında oluştuğunu ifade etmişlerdir. Richardson vd. [11], bina modellerindeki saçak detayının çatı yüzeylerindeki basınç dağılımlarını değiştirdiğini belirtmişlerdir. Akışın çatı yüzeyleri

üzerinde tutunmasında, eğrisel formdaki saçakların keskin saçaklara göre daha elverişli olduğu Hoxey vd. [12] tarafından ifade edilmiştir. Uematsu ve Isyumov [13], alçak binaların yüzeylerindeki basınç dağılımlarını karşılaştırmalı inceleyen bir literatür çalışması gerçekleştirmiştir. Ginger ve Holmes [14], rüzgâr tüneline gerçekleştirildikleri çalışmalarında, rüzgâr geliş doğrultusunun açılı olması durumunda emme yüklerinin daha kritik olduğunu belirtmişlerdir. Prasad vd. [15] tarafından yapılan bir diğer çalışmada, farklı eğim açılına sahip beşik ve kırma çatılı bina modellerinin yüzeylerinde basınç katsayıları belirlenmiş ve kırma çatı yüzeylerindeki emme yüklerinin %42 daha az olduğu ifade edilmiştir. Bitsumlak vd. [16], çatı köşelerindeki ve saçaklardaki emme etkisini azaltmak amacıyla o bölgelere yerleştirdikleri elemanların, emme yükünü köşelerde %65, saçaklarda ise %25 oranında azalttığını ifade etmişlerdir. Tominago vd. [17], farklı eğimlere sahip kırma çatılı bina modelleri üzerinde ve etrafında, ortalama hız, türbülans kinetik enerji ve basınç katsayılarını dağılımlarını deneysel ve sayısal olarak elde etmişlerdir. Farklı türbülans modellerinin hassasiyetlerini de inceledikleri çalışmalarında, sayısal sonuçların deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu belirtmişlerdir. Fovad vd. [18], farklı eğimlerdeki sundurma, beşik ve kule tipi çatılara sahip alçak bina modelleri etrafındaki akış alanlarını sayısal olarak incelemişler ve elde ettikleri sonuçları uluslararası rüzgâr kodları ile karşılaştırmışlardır. Xing vd. [19], beşik çatılı bir bina modeli üzerine etki eden rüzgâr yüklerini farklı çatı eğimleri ve rüzgâr geliş açıları için sayısal ve deneysel olarak incelemişler ve özellikle 90° rüzgâr geliş açısı durumunda akış çizgileri ve basınç dağılımlarında önemli farklılıklar olduğunu belirtmişlerdir. Shan vd. [20], yüzey eğiminin, çatı sırt formunun ve çift saçak düzenlenmesinin Çin kırma çatıları üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Tek saçaklı geleneksel Çin kırma çatısı üzerinde oluşan emme etkisinin, çift saçaklı durumda her iki saçak üzerinde oluşan emme etkisine göre daha kritik olduğunu ortaya koymuşlardır. Singh ve Roy [21], piramit çatıya sahip kare kesitli bina modelleri etrafındaki akış alanlarını, model duvarlarında açıklık durumunu da dikkate alarak farklı çatı eğimleri ve rüzgâr geliş açıları için Realizable k-ε türbülans modeli kullanarak çözmüşlerdir. Duvar açıklığı bulunmayan modellerde basınç katsayılarının daha büyük olduğunu ifade etmişlerdir.

Çalışma konusu ile ilgili mevcut literatürde, çoğunlukla çatı tipi, çatı eğim açısı, rüzgâr geliş açısı, bina yüksekliği ve bina konumu gibi parametreler incelenmektedir. Saçak tipinin akış alanına etkisine yönelik çalışmalar son derece kısıtlıdır. Özellikle çatı eğiminin etkisi ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte saçak eğiminin etkisinin de gerçekten incelenmeye değer olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, yeni bir parametre olarak incelenen saçak eğim açısının, çatı yüzeyleri üzerindeki basınç dağılımlarına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Saçak açılarının değiştirilmesiyle sağlanacak geometrik değişikliğin çatılar üzerindeki rüzgâr yüklerine olan etkisinin incelenmesi çalışmaya özgünlük katmaktadır.

## 2. Teorik Metot (Theoretical Method)

### 2.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Sıkıştırılmaz bir akışkanın üç boyutlu sürekli hareketi kartezyen koordinatlarda, Eş. 1 şeklinde süreklilik denklemi ve Eş. 2 şeklinde Navier-Stokes denklemleri ile ifade edilmektedir.

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

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

Bu denklemlerde yer alan çalkantı terimlerinin hesaplanmasına yönelik çok sayıda türbülans modeli mevcuttur. Bu çalışma kapsamında, Standard k-ε, RNG k-ε ve Realizable k-ε türbülans modelleriyle çözümler gerçekleştirilmiştir.

Launder ve Spalding [22] tarafından önerilen Standard k-ε türbülans modeli, kolay uygulaması nedeniyle, günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Yarı ampirik bir model olan Standard k-ε türbülans modeli, Eş. 3 türbülans kinetik enerjisi (k) ve Eş. 4 türbülans yutulma oranı (ε), şeklinde iki adet transport denklemden oluşmaktadır.

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

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

Burada;  $G_k$ , ortalama hız gradyanına bağlı türbülans kinetik enerjisini,  $G_b$ , kaldırma kuvvetine bağlı türbülans kinetik enerjisini,  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$  ve  $C_{3\epsilon}$ , model sabitlerini,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\epsilon$ , k ve ε için türbülans Prandtl sayısını,  $S_k$  ve  $S_\epsilon$ , kaynak terimlerini ve  $Y_M$ , türbülans hacim değişiminin toplam yayılım oranına katkısını ifade etmektedir. Denklemlerde yer alan  $\mu_t$ , türbülans viskozitesi, Eş. 5 şeklinde tanımlanmaktadır.

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

Model sabitleri  $C_{1\epsilon}=1,44$ ,  $C_{2\epsilon}=1,92$ ,  $C_\mu=0,09$ ,  $\sigma_k=1,0$  ve  $\sigma_\epsilon=1,3$  şeklindedir.

RNG metodu kullanılarak çözülen denklemlerin oluşturduğu model Standard k-ε modeline göre farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar, yeni katsayılar, yeni terimler ve transport denklemlerindeki değişimler şeklindedir. RNG k-ε türbülans modelinde transport denklemleri, Eş. 6 ve Eş. 7 şeklinde oluşmaktadır.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (7)$$

Burada  $G_k$ ,  $G_b$ ,  $S_k$ ,  $R_\epsilon$  ve  $S_\epsilon$ , Standard k-ε modelindeki terimlerle aynı olmakta,  $\alpha_k$ , k için ters etkili Prandtl sayısını,  $\alpha_\epsilon$ , ε için ters etkili Prandtl sayısını,  $\mu_{\text{eff}}$ , efektif viskoziteyi,  $R_\epsilon$ , RNG modelinde ε için kullanılan ek terimi, ve  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$  ve  $C_{3\epsilon}$ , model sabitlerini göstermektedir.  $C_{1\epsilon}$  ve  $C_{2\epsilon}$  model sabitleri, RNG k-ε türbülans modelinde analitik olarak  $C_{1\epsilon}=1,42$ ,  $C_{2\epsilon}=1,68$  olarak belirlenmiştir.

Shih vd. [23] tarafından önerilen Realizable k-ε modelde, normal gerilmelerdeki bazı matematiksel yetersizliklerin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Bu yaklaşımda,  $\delta_{ij}$  kroneker delta olmak üzere, sıkıştırılmaz bir akış için Reynolds gerilmeleri, Eş. 8 şeklinde ifade edilmektedir.

$$-\rho \overline{v_i' v_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (8)$$

Eş. 9, türbülans viskozitesini ve Eş. 10, normal gerilmeleri ifade etmektedir.

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

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

Türbülans viskozitesi ifadesinde yer alan  $C_\mu$  katsayısı, şekil değişimi, rotasyon ve açılal hızının bir fonksiyonudur. k ve ε için modellenmiş transport denklemleri sırasıyla Eş. 11 ve Eş. 12'de görülmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon + S_k \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (12)$$

Bu denklemde  $G_k$ , ortalama hız gradyenti kaynaklı türbülanslı kinetik enerji üretimini;  $G_b$ , kaldırma kuvveti kaynaklı türbülanslı kinetik enerji üretimini ifade etmektedir.  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_2$  ve  $C_{3\epsilon}$ , sabitler olup,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\epsilon$  ise türbülans Prandtl sayılarıdır.  $S_k$  ve  $S_\epsilon$  sırayla, k ve ε için kaynak terimleridir. Realizable k-ε modelinde kullanılan sabitler,  $C_{1\epsilon}=1,44$ ,  $C_2=1,9$ ,  $\sigma_k=1,0$ ,  $\sigma_\epsilon=1,2$  şeklindedir.

## 2.2. Bina Modelleri (Building Models)

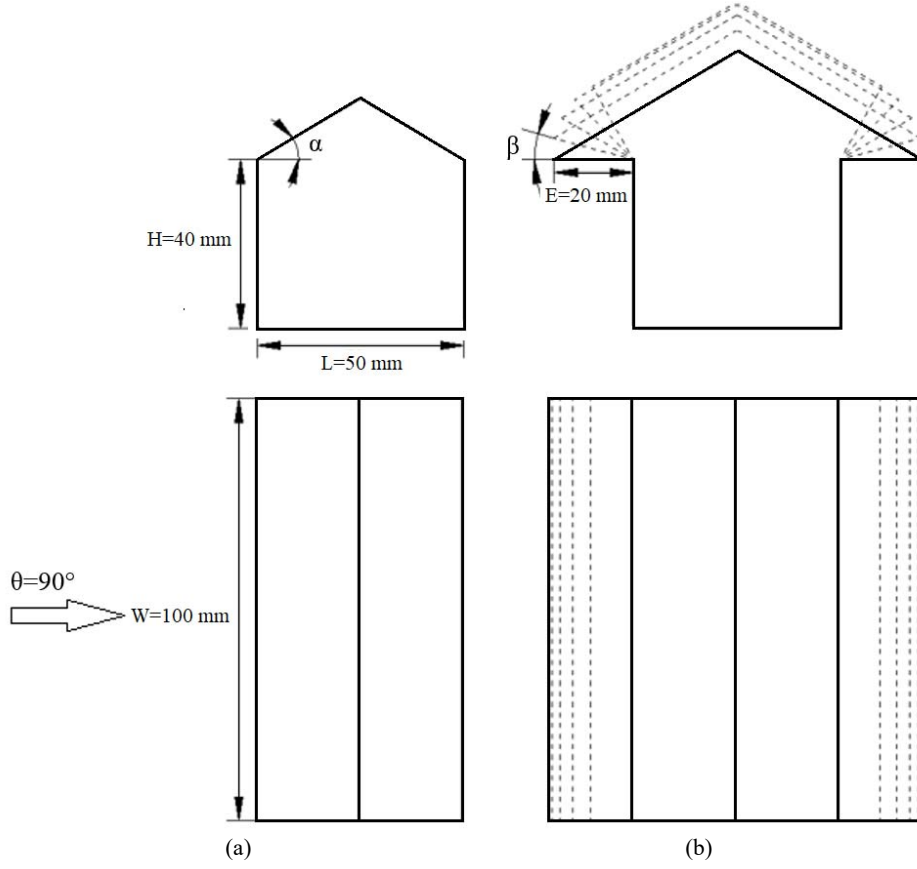
Çalışmada, çatı eğim açısının  $\alpha = 15^\circ, 30^\circ$  ve  $45^\circ$  ve saçak eğim açısının  $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  ve  $60^\circ$  olduğu durumlar için 15 farklı bina geometrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bina geometrileri etrafındaki üç boyutlu akış alanları Standard k-ε, RNG k-ε ve Realizable k-ε türbülans modelleri kullanılarak hesaplanmıştır. Sayısal çözümlerde rüzgâr geliş açısı  $\theta=90^\circ$  olarak dikkate alınmıştır.

Çalışma kapsamında, öncelikle şematik görüntüsü Şekil 1a'da verilen, çatı eğim açısının  $30^\circ$  olduğu saçaksız beşik çatılı bina modeli etrafındaki akış alanı, literatürde mevcut deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapmak üzere üç farklı türbülans modeli ile hesaplanmıştır. Daha sonra bina modeline sabit uzunluktaki saçak detayının ilave edilmesiyle ve çatı ve saçak açılarının değiştirilmesiyle oluşturulmuş bina modelleri etrafındaki üç boyutlu akış alanları da aynı türbülans modelleri ile hesaplanmıştır (Şekil 1b). Çalışmada incelenen bina modellerinin boyutları,  $H=40$  mm yükseklik,  $L=50$  mm uzunluk,  $W=100$  mm genişlik ve  $E=20$  mm saçak uzunluğu şeklindedir. 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 [24]. Mevcut çalışmada maksimum blokaj oranı, %2,8 olarak gerçekleştirilmiştir.

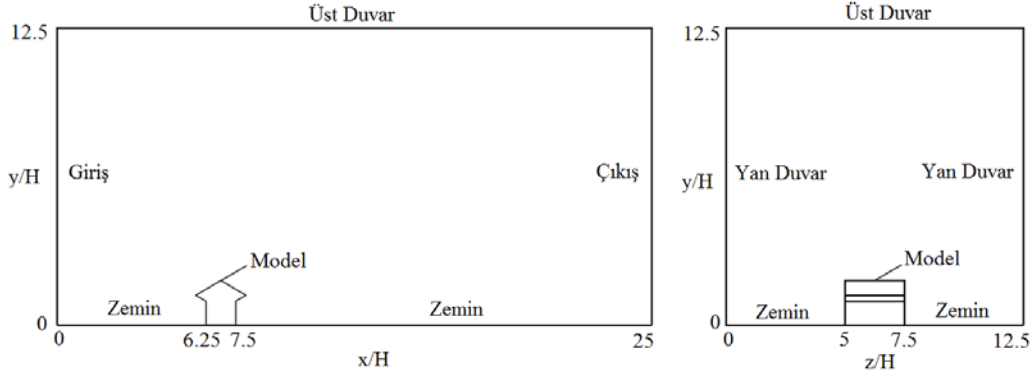
## 2.3. Akış Alanı ve Sınır Şartları (Flow Field and Boundary Conditions)

Akış alanı için geçerli sınır şartları Şekil 2'de görülmektedir. Sınır şartları, girişte "VELOCITY INLET", çıkışta "PRESSURE OUTLET", duvarlarda ise "WALL" şeklinde tanımlanmıştır.

Hesaplama alanındaki boyutlar, sayısal çözümlerin doğruluğunu önemli derecede etkilemektedir. Model yüksekliğine göre tanımlanmış ve hesaplama alanının sınırlarını gösteren mesafeler literatüre uygun olarak belirlenmiştir. Özmen [25] tarafından açık kırsal arazi şartları için deneysel olarak elde edilen ortalama hız ve türbülans şiddeti profilleri, akış alanlarında giriş sınır şartı olarak kullanılmıştır.  $K=0,41$ ,  $\delta=0,15$  m,  $C_\mu=0,09$ ,  $l=K\delta$ , olmak üzere, türbülans kinetik enerji (k) ve yutulma (ε) için giriş profilleri sırasıyla Eş. 13 ve Eş. 14'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Model ölçüleri a) 30° çatı eğimine sahip saçak bulunmayan beşik çatılı bina modeli, b) Farklı saçak eğimlerine sahip bina modeli (Model dimensions a) Gable roof building model without eaves with 30 ° roof pitch, b) Building model with different eave slopes)



**Şekil 2.** Akış alanı ve sınır şartları (Flow fields and boundary conditions)

$$k = \frac{3}{2} (U_o \cdot TI)^2 \quad (13)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (14)$$

$U_o$ , serbest akış hızını,  $H$  model yüksekliğini ve  $\nu$ , kinematik viskoziteyi göstermek üzere, Reynolds sayısı, Eş. 15'de görülmektedir.

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

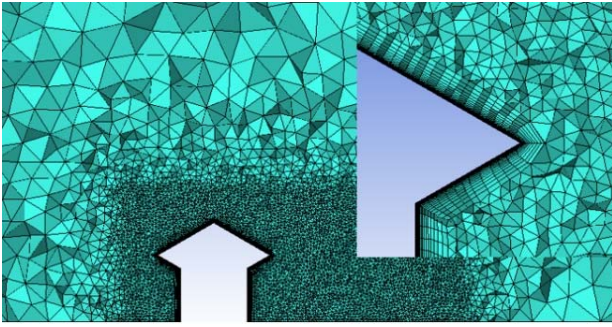
Çalışmada, model yüksekliğine göre tanımlanmış Reynolds sayısı 40000 olarak gerçekleştirilmiştir.

#### 2.4. Çözüm Yöntemi (Solution Method)

Bina modelleri etrafındaki üç boyutlu akış alanlarının sayısal çözümleri, ANSYS 18.0 programı bünyesinde bulunan ve sonlu hacim yaklaşımını esas alan FLUENT paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümlerde, Standard k- $\varepsilon$ , RNG k- $\varepsilon$  ve Realizable k- $\varepsilon$  türbülans modelleri kullanılmıştır. Duvar yaklaşımı olarak İyileştirilmiş Duvar Fonksiyonu (Enhanced Wall Function) seçilmiştir. İteratif çözücü olarak ise SIMPLE algoritması tercih edilmiştir. Değişkenlerin ağ noktaları arasındaki değişim için Second Order Upwind çözüm yolu benimsenmiştir. Normalize edilmemiş artıkların süreklilik,  $k$  ve  $\varepsilon$  denklemleri için  $10^{-5}$  den, diğer denklemler için ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  hızları) ise  $10^{-6}$  dan küçük olma koşulu,



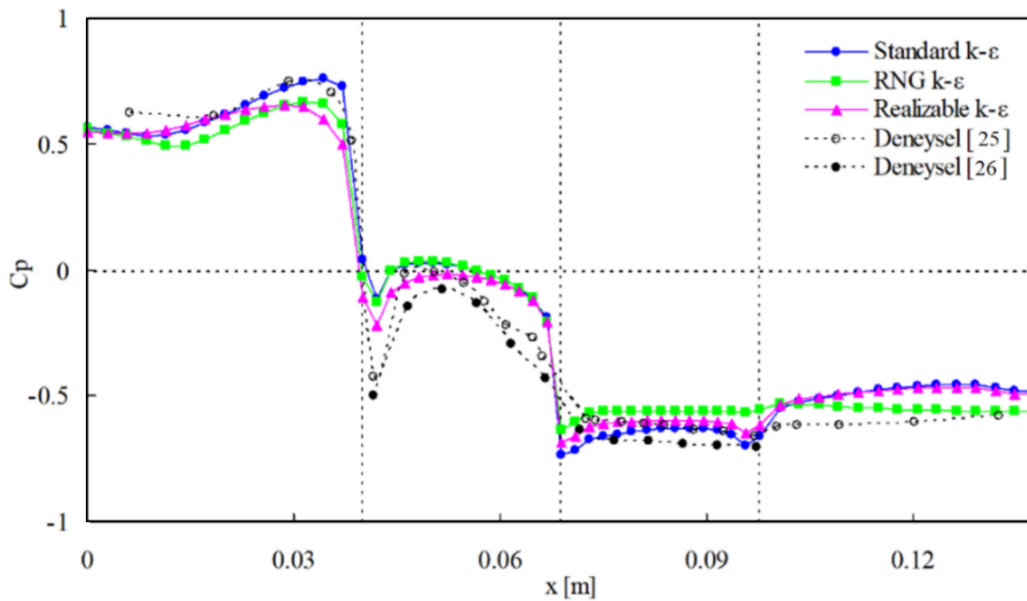
yakınsama kriteri olarak dikkate alınmıştır. Çalışmada, karmaşık modeller etrafındaki akış alanlarının üç boyutlu sayısal analizinde sıklıkla kullanılan yapılandırılmamış üçgen tabanlı üç boyutlu tetrahedral ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 3’de 30° eğimli çatı ve saçak geometrisine sahip beşik çatılı bina modeli etrafındaki ağ yapısının iki boyutlu görüntüsü örnek olarak verilmiştir. Bina modeline yaklaştıkça sıklaşan bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Ayrıca çözüm hassasiyetini artırmak amacıyla, bina modelinin katı duvarından ilk ağ noktasına olan mesafe 0,02 mm seçilmiş, sınır tabaka ağ büyütme oranı ise 1,2 alınarak toplam 26 katmandan oluşan bir sınır tabaka ağı oluşturulmuştur. Ağdan bağımsız çözümler elde edebilmek için farklı sayısal ağ yapıları ile denemeler yapılmıştır. Bu şekilde hesap alanlarında ağdan bağımsız çözümlerin sağlandığı yaklaşık 2,5 milyon ağ belirlenmiş ve çözümler bu ağ yoğunluğunda gerçekleştirilmiştir. Tüm model yüzeylerinde  $y^+ \approx 2$  değerinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3. Bina modeli etrafındaki ağ düzeni (Mesh type around building model)

## 2. Sayısal Çözümün Doğrulanması (Validation of Numerical Solution)

30° çatı eğimine sahip saçaksız beşik çatılı bina modelinde Standard k-ε, RNG k-ε ve Realizable k-ε türbülans modelleriyle hesaplanmış basınç katsayısı dağılımlarının aynı modele ait olan deneysel basınç katsayısı değerleriyle karşılaştırması Şekil 4’de görülmektedir. Her üç türbülans modeliyle hesaplanan basınç katsayısı dağılımlarının da birbirine yakın ve deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Model yüzeyleri boyunca basınç katsayısı değişimleri (Variations of pressure coefficient along the model surfaces)

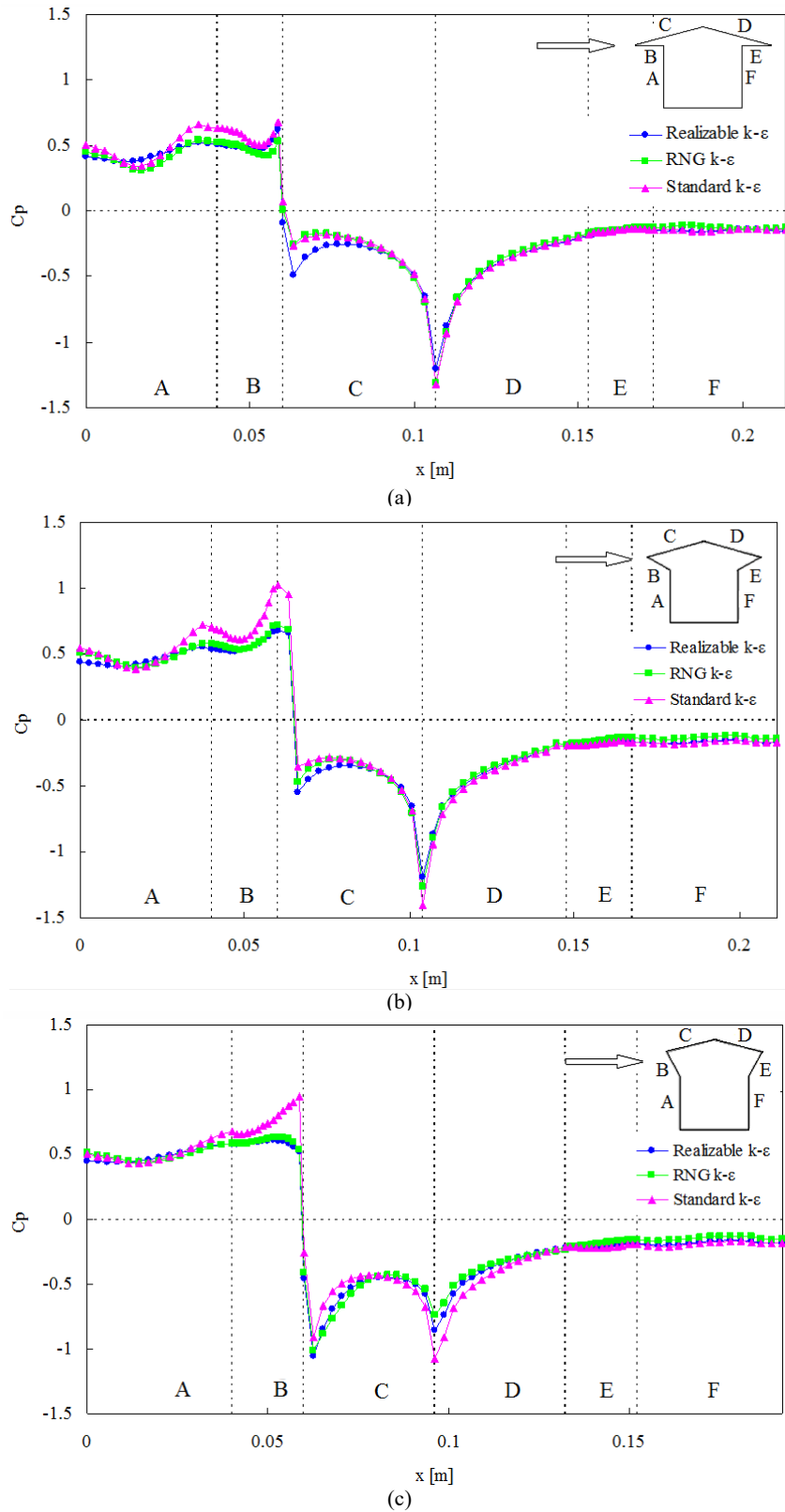
## 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

### 3.1. Modellerin Yüzeylerinde Basınç Dağılımları (Pressure Distributions on Model Surfaces)

Tez kapsamında incelenen bina modellerinin yüzeylerindeki basınç dağılımları, Eş. 16 şeklinde basınç katsayısı cinsinden verilmiştir.

$$C_p = \frac{\Delta P}{0,5\rho U_0^2} \quad (16)$$

Burada;  $\Delta P$ , yüzey basıncı ve ortam basınç arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Farklı türbülans modelleriyle hesaplanan basınç katsayıları, bina model yüzeylerinin orta eksenleri boyunca basınç dağılımları ve model yüzeylerinde eş basınç alanları şeklinde değerlendirilmiştir. Çatı eğim açısının 15° olduğu beşik çatılı bina modellerinin yüzeylerinde akış doğrultusunda orta eksen boyunca Standard k-ε, RNG k-ε ve Realizable k-ε türbülans modelleriyle hesaplanmış basınç dağılımları 0°, 30° ve 60° saçak eğim açısına sahip bina modelleri için sırasıyla Şekil 5a-Şekil 5c’de verilmiştir. Saçak açısının 0° olduğu durumda, rüzgâra doğrudan maruz kalan model ön yüzeyinde (A) ve ön saçak yüzeyinde (B) basınç katsayıları itme etkisiyle pozitif değerler almaktadır. Ön saçak ucundan itibaren çatı yüzeylerinde (C ve D) ve arka saçak (E) ve model arka yüzeyinde (F), basınç katsayıları negatif olmaktadır. Ön saçak ucu civarında küçük bir negatif piktan sonra çatı sırtına kadar gittikçe kuvvetlenen emme etkisi, çatı sırtında en kritik değerine ulaşmaktadır. Çatı sırtından itibaren ise çatı arka yüzeyi boyunca hafifleyerek arka saçak ve model arka yüzeyi üzerinde yaklaşık sabit olmaktadır. Model yüzeylerinde her üç türbülans modeliyle hesaplanmış basınç katsayılarının ön saçak ucu yakınında ve çatı sırtındaki pik değerler dışında birbirine yakın olduğu görülmektedir. Model yüzeylerindeki en kritik basınç katsayısı Standard k-ε türbülans modeli ile çatı sırtında -1,32 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5a). Saçak açısının 30° olduğu durumda, model yüzeylerindeki basınç dağılımları 0° saçak açısındaki dağılımlarla benzerlik göstermektedir. Standard k-ε türbülans modelinin model ön yüzeyi ve ön saçak yüzeyi üzerinde hesapladığı pozitif basınç katsayıları, diğer türbülans modelleri ile hesaplanan değerlerden daha büyük olmaktadır. Model yüzeylerindeki en kritik basınç katsayısı Standard k-ε türbülans modeli ile çatı sırtında -1,40 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5b). 60°



**Şekil 5.** 15° çatı eğimine sahip bina modeli yüzeylerinde orta eksen boyunca basınç dağılımları a) 0° eğimli saçak, b) 30° eğimli saçak, c) 60° eğimli saçak

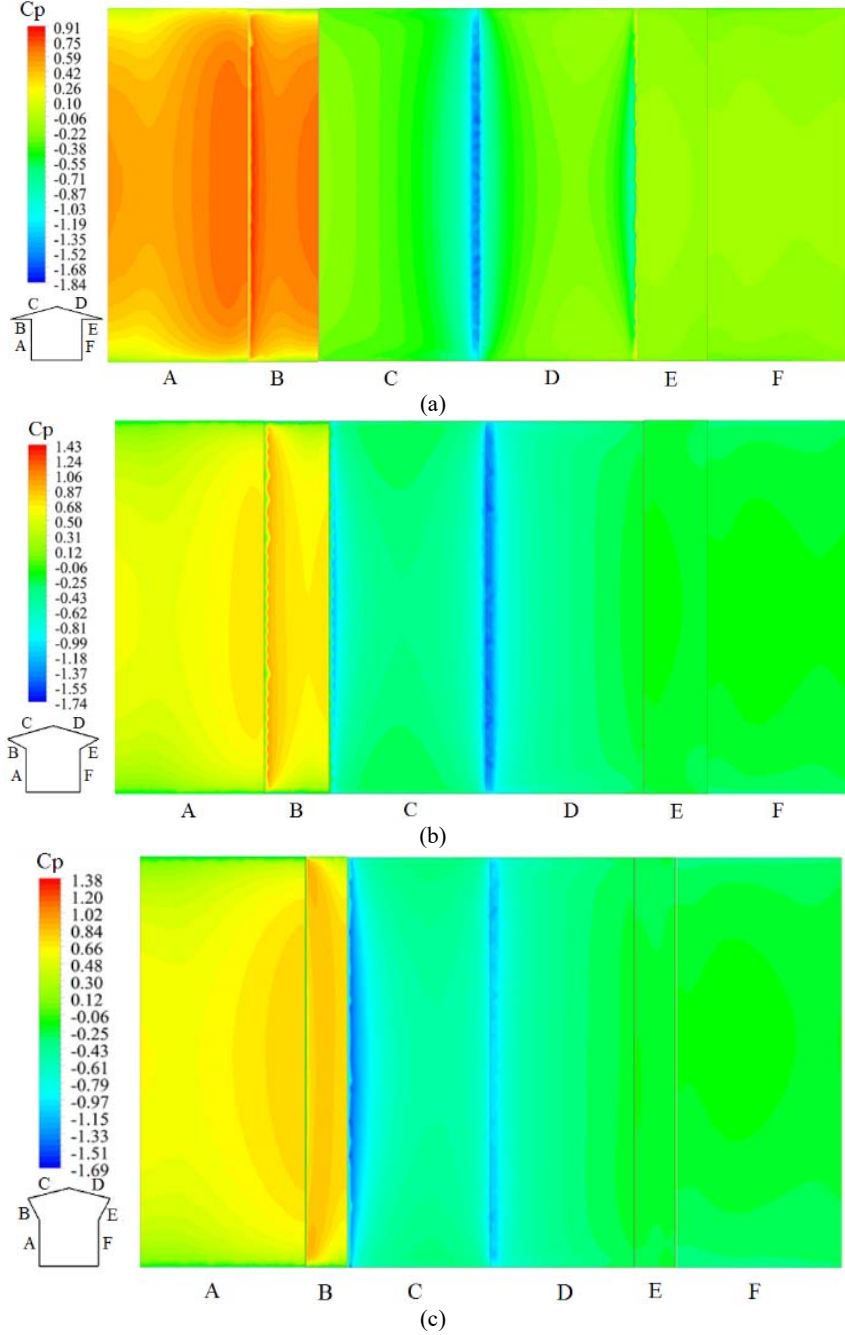
(Pressure distributions along the mid axis on building model surfaces with 15° roof pitch a) 0° pitched eave b) 30° pitched eave c) 60° pitched eave)

saçak eğim açısı durumunda, ön saçığın altında oluşan küçük ölçekli pozitif piktan hemen sonra çatı ön yüzeyinin ön saçak üzerine yakın

kısımında kritik bir negatif pik oluşmaktadır. Çatı ön yüzeyinin orta bölümüne doğru hafifleyen emme etkisi çatı ön yüzeyinin çatı sırtına

yakın bölgesinde tekrar kuvvetlenerek çatı sırtında ikinci bir kritik pik oluşturmaktadır. Çatı ön yüzünün ön saçak ve çatı sırtı yakınındaki bölgelerinde oluşan negatif piklerin aynı etki derecesinde olduğu görülmektedir. Emme etkisi, çatı sırtından itibaren çatı arka yüzeyi boyunca hafifleyerek arka saçak ve model arka yüzeyi üzerinde yaklaşık sabit olmaktadır. Model yüzeylerindeki en kritik basınç katsayısı Standard k-ε türbülans modeli ile çatı sırtında -1,07 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5c). 15° çatı eğim açısına sahip beşik çatılı bina modellerinin yüzeylerinde Realizable k-ε türbülans modeliyle eş basınç alanı şeklinde hesaplanmış basınç dağılımları 0°, 30° ve 60° saçak eğim açılarında sahip modeller için sırasıyla Şekil 6a-Şekil 6c’de verilmiştir. Her üç saçak eğim açısı durumunda da, Şekil 5’deki basınç

dağılımlarına benzer şekilde modellerin ön yüzeylerinde ve ön saçak yüzeylerinde pozitif basınç alanları oluşmakta, bina modellerinin diğer yüzeylerinde ise negatif basınç alanları etkili olmaktadır. Modellerin yüzeylerindeki en kritik basınç katsayıları 0° ve 30° eğimli saçaklara sahip modellerde çatıların sırt bölgesinde, 60° eğimli saçığa sahip modelde ise ön saçak üzerinde oluşmaktadır. 15° çatı eğim açısına sahip bina modellerinin yüzeylerinde hesaplanmış basınç dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, çatı ön yüzeylerinin ön saçak ve çatı sırtına yakın bölgelerinde oluşan negatif piklerin, artan saçak eğim açısı ile birlikte birbirine yaklaştığı görülmektedir. Çatı eğim açısının 30° olduğu beşik çatılı bina modellerinin yüzeylerinde akış doğrultusunda orta eksen boyunca Standard k-ε, RNG k-ε ve

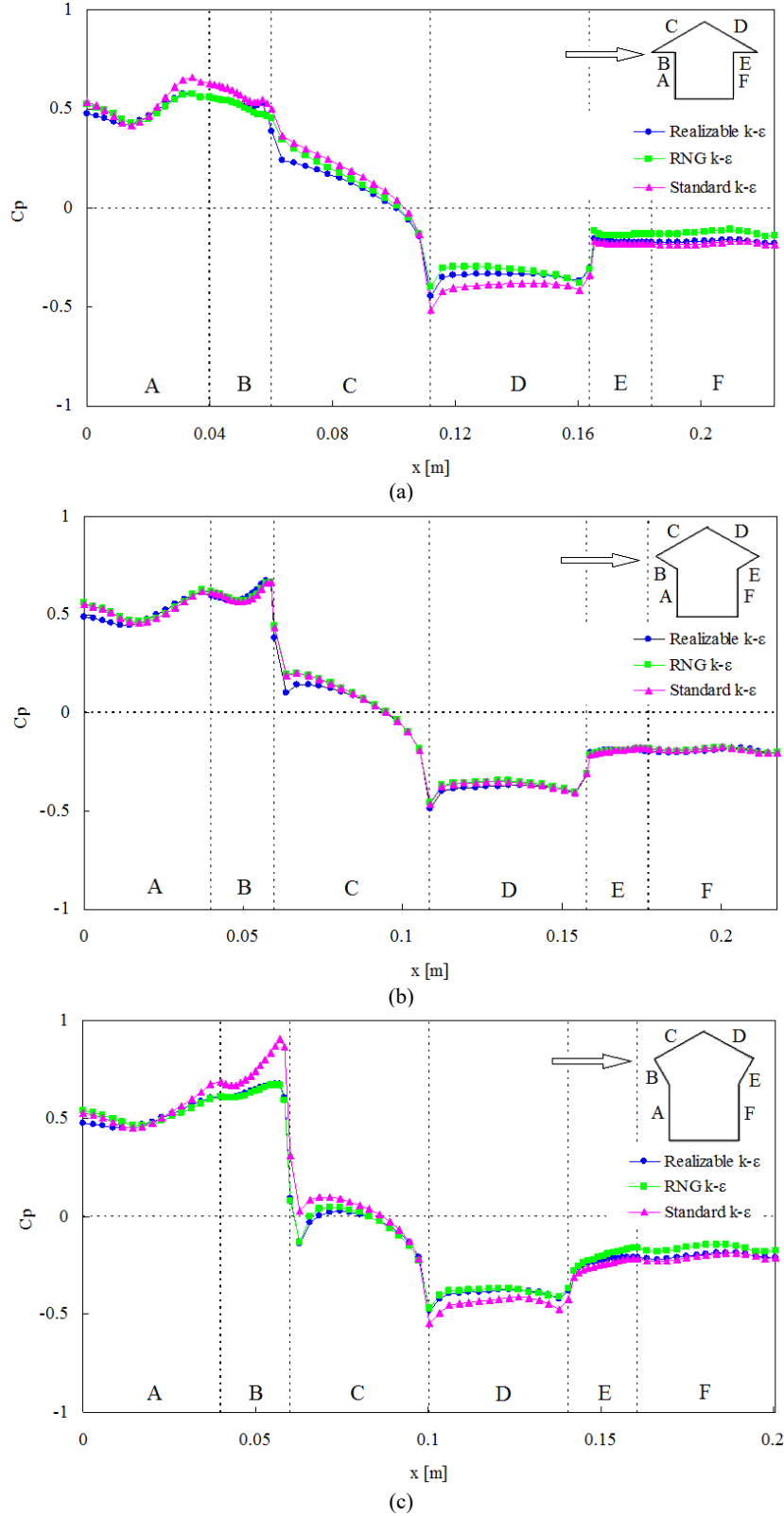


Şekil 6. 15° çatı eğimine sahip bina modellerinin yüzeylerinde Realizable k-ε türbülans modeli ile hesaplanmış eş basınç alanları a) 0° eğimli saçak, b) 30° eğimli saçak c) 60° eğimli saçak (Pressure contours computed with Realizable k-ε turbulence model on building model surfaces with 15° roof pitch a) 0° pitched eave, b) 30° pitched eave, c) 60° pitched eave)



Realizable k-ε türbülans modelleriyle hesaplanmış basınç dağılımları 0°, 30° ve 60° saçak eğim açılarında sahip bina modelleri için sırasıyla

Şekil 7a-Şekil 7c'de verilmiştir. 0° saçak açısına sahip modelde, rüzgâra doğrudan maruz kalan model ön yüzünde (A), ön saçak



**Şekil 7.** 30° çatı eğimine sahip bina modeli yüzeylerinde orta eksen boyunca basınç dağılımları a) 0° eğimli saçak, b) 30° eğimli saçak, c) 60° eğimli saçak

(Pressure distributions along the mid axis on building model surfaces with 30° roof pitch a) 0° pitched eave, b) 30° pitched eave, c) 60° pitched eave)

yüzeyinde (B) ve çatı ön yüzeyinin (C) büyük bölümünde basınç katsayıları itme etkisiyle pozitif değerler almaktadır. Çatı ön yüzeyinin çatı sırtına yakın bölümünden itibaren negatif olan basınç katsayıları çatı sırtında negatif pik oluşturduktan sonra hafifleyerek çatı arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit emme etkisi göstermektedir. Çatı arka yüzeyinin arka saçakla birleştiği noktadan itibaren daha da hafifleyen emme etkisi arka saçak (E) ve model arka yüzeyi (F) boyunca yine yaklaşık sabit olmaktadır. Model yüzeylerinde her üç türbülans modeliyle hesaplanmış basınç katsayılarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Model yüzeylerindeki en kritik basınç katsayısı Standard k-ε türbülans modeli ile çatı sırtında -0,51 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7a). 30° saçak açısına sahip modelde, model yüzeylerindeki basınç dağılımları 0° saçak açısındaki dağılımlarla benzerlik göstermektedir.

Ön saçak ucunun alt ve üst bölgelerinde pozitif değerler alan basınç katsayıları, sırasıyla küçük ölçekli maksimum ve minimum pikler oluşturmaktadır. Model yüzeylerindeki en kritik basınç katsayısı Realizable k-ε türbülans modeli ile çatı sırtında -0,49 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7b). 60° saçak açısına sahip modelde, rüzgâra doğrudan maruz kalan model ön yüzeyinde (A) ve ön saçak yüzeyinde (B) basınç katsayıları itme etkisiyle pozitif değerler almaktadır. Ön saçığın alt yüzeyi boyunca artarak ön saçığın ucunda maksimum olan basınç katsayısı, aniden azalarak ön saçığın çatı ön yüzeyiyle birleştiği bölgede küçük ölçekli bir minimum pikle emme etkisi göstermektedir. Çatı ön yüzeyinin büyük bölümünde de gözlenen emme etkisi çatı sırtında kritik negatif pik oluşturduktan sonra hafifleyerek çatı arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit olmaktadır. Çatı arka yüzeyinin arka saçakla birleştiği noktadan itibaren arka saçak alt yüzeyi (E) boyunca daha da hafifleyen emme etkisi model arka yüzeyi (F) boyunca yine yaklaşık sabit olmaktadır. Standard k-ε türbülans modelinin ön saçak yüzeyi üzerinde hesapladığı pozitif basınç katsayıları, diğer türbülans modelleri ile hesaplanan değerlerden daha büyük olmaktadır. Model yüzeylerindeki en kritik basınç katsayısı Standard k-ε türbülans modeli ile çatı sırtında -0,54 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7c). 30° çatı eğim açısına sahip beşik çatılı bina modellerinin yüzeylerinde Realizable k-ε türbülans modeliyle eş basınç alanı şeklinde hesaplanmış basınç dağılımları 0°, 30° ve 60° saçak eğim açılına sahip modeller için sırasıyla Şekil 8a-Şekil 8c'de verilmiştir. Her üç saçak eğim açısı durumunda da, Şekil 7'deki basınç dağılımlarına benzer şekilde model ön yüzeylerinde, ön saçak yüzeylerinde ve kenar bölgeler dışındaki çatı ön yüzeylerinin büyük bölümünde pozitif basınç alanları oluşmakta, bina modelinin diğer yüzeylerinde ise negatif basınç alanları ortaya çıkmaktadır. 30° çatı eğim açısına sahip bina modellerinin yüzeylerinde hesaplanmış basınç dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, 15° çatı eğim açısına sahip bina modellerindeki sonuçlara benzer şekilde, çatı ön yüzeylerinin ön saçak ve çatı sırtına yakın bölgelerinde oluşan piklerin, artan saçak eğim açısı ile birlikte yine birbirine yaklaştığı görülmektedir.

Çatı eğim açısının 45° olduğu beşik çatılı bina modellerinin yüzeylerinde akış doğrultusunda orta eksen boyunca Standard k-ε, RNG k-ε ve Realizable k-ε türbülans modelleriyle hesaplanmış basınç dağılımları 0°, 30° ve 60° saçak eğim açılına sahip bina modelleri için sırasıyla Şekil 9a-Şekil 9c'de verilmiştir. Rüzgâra doğrudan maruz kalan model ön yüzeyinde (A), ön saçak yüzeyinde (B) ve çatı ön yüzeyinde (C) basınç katsayıları itme etkisiyle pozitif değerler almaktadır. Ön saçığın alt yüzeyi boyunca azalan basınç katsayısı, ön saçığın çatı ön yüzeyiyle birleştiği bölgede maksimum değer almakta ve çatı ön yüzeyi boyunca tekrar azalarak çatı sırtında negatif olmaktadır. Çatı arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit olan emme etkisi çatı arka yüzeyinin arka saçakla birleştiği noktadan itibaren hafifleyerek arka saçak (E) ve model arka yüzeyi (F) boyunca yine yaklaşık sabit kalmaktadır. Model yüzeylerinde her üç türbülans modeliyle hesaplanmış basınç katsayılarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Model yüzeylerindeki en kritik basınç katsayısı RNG

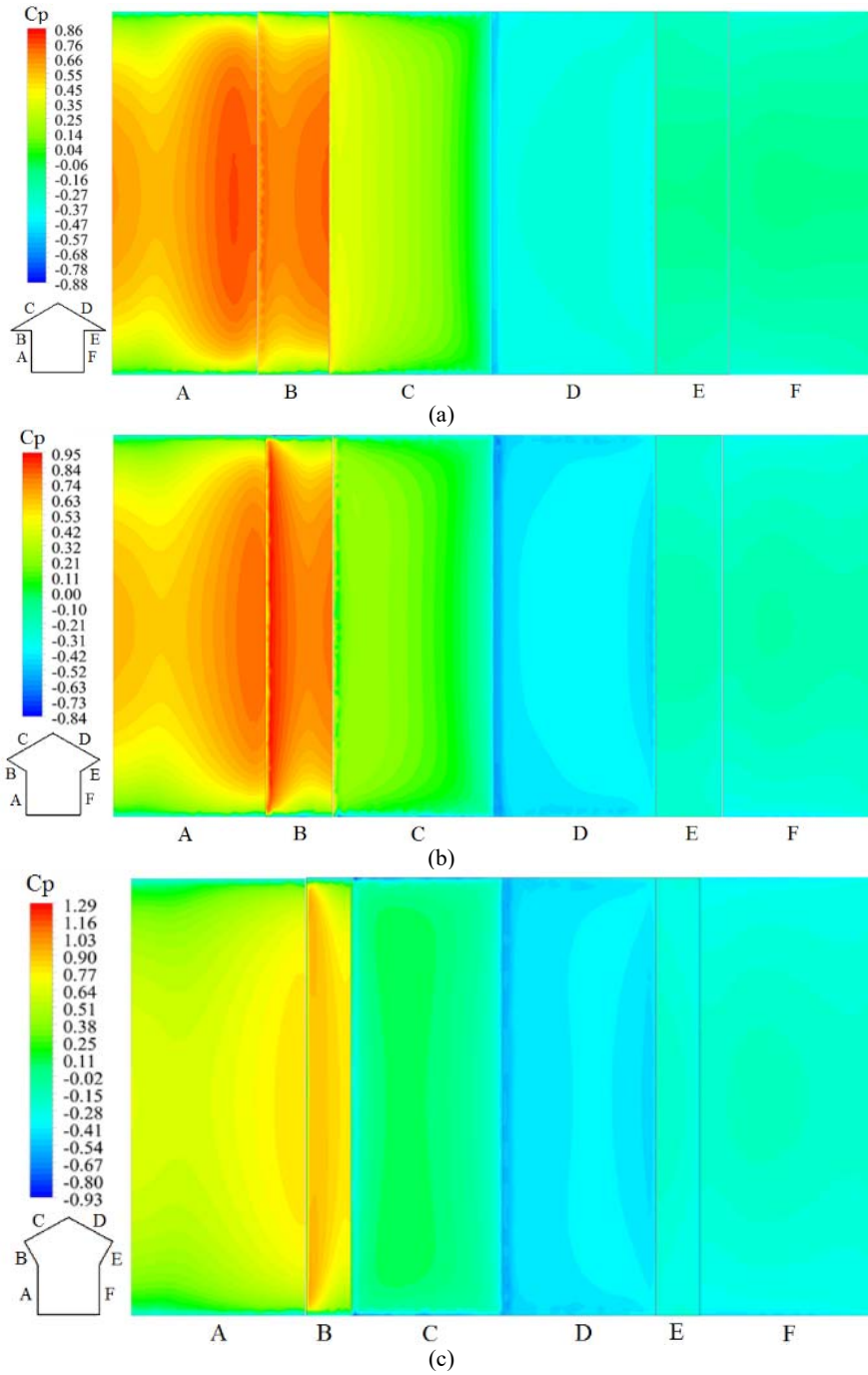
k-ε türbülans modeli ile çatı sırtında -0,51 olarak hesaplanmıştır (Şekil 9a). Saçak açısının 30° ve 60° olduğu durumlarda, modellerin yüzeylerindeki basınç dağılımları 0° saçak açısındaki dağılımlarla benzerlik göstermektedir. Modellerin yüzeylerindeki en kritik basınç katsayıları 30° saçak açısında -0,48 ve 60° saçak açısında -0,54 şeklinde çatı sırtında Standard k-ε türbülans modeli ile hesaplanmıştır (Şekil 9b-Şekil 9c).

45° çatı eğim açısına sahip beşik çatılı bina modellerinin yüzeylerinde Realizable k-ε türbülans modeliyle eş basınç alanı şeklinde hesaplanmış basınç dağılımları 0°, 30° ve 60° saçak eğim açılına sahip modeller için sırasıyla Şekil 10a-Şekil 10c'de verilmiştir. Her üç saçak eğim açısı durumunda da, Şekil 9'daki basınç dağılımlarına benzer şekilde model ön yüzeylerinde, ön saçak yüzeylerinde ve kenar bölgeler dışındaki çatı ön yüzeylerinde pozitif basınç alanları oluşmakta, bina modelinin diğer yüzeylerinde ise negatif basınç alanları etkili olmaktadır.

45° çatı eğim açısına sahip bina modellerinin yüzeylerinde hesaplanmış basınç dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, her üç modelin yüzeylerindeki basınç dağılımlarının da benzer karakterde olduğu görülmektedir.

### 3.2. Çatı Eğimi Etkisi (Effect of Roof Pitch)

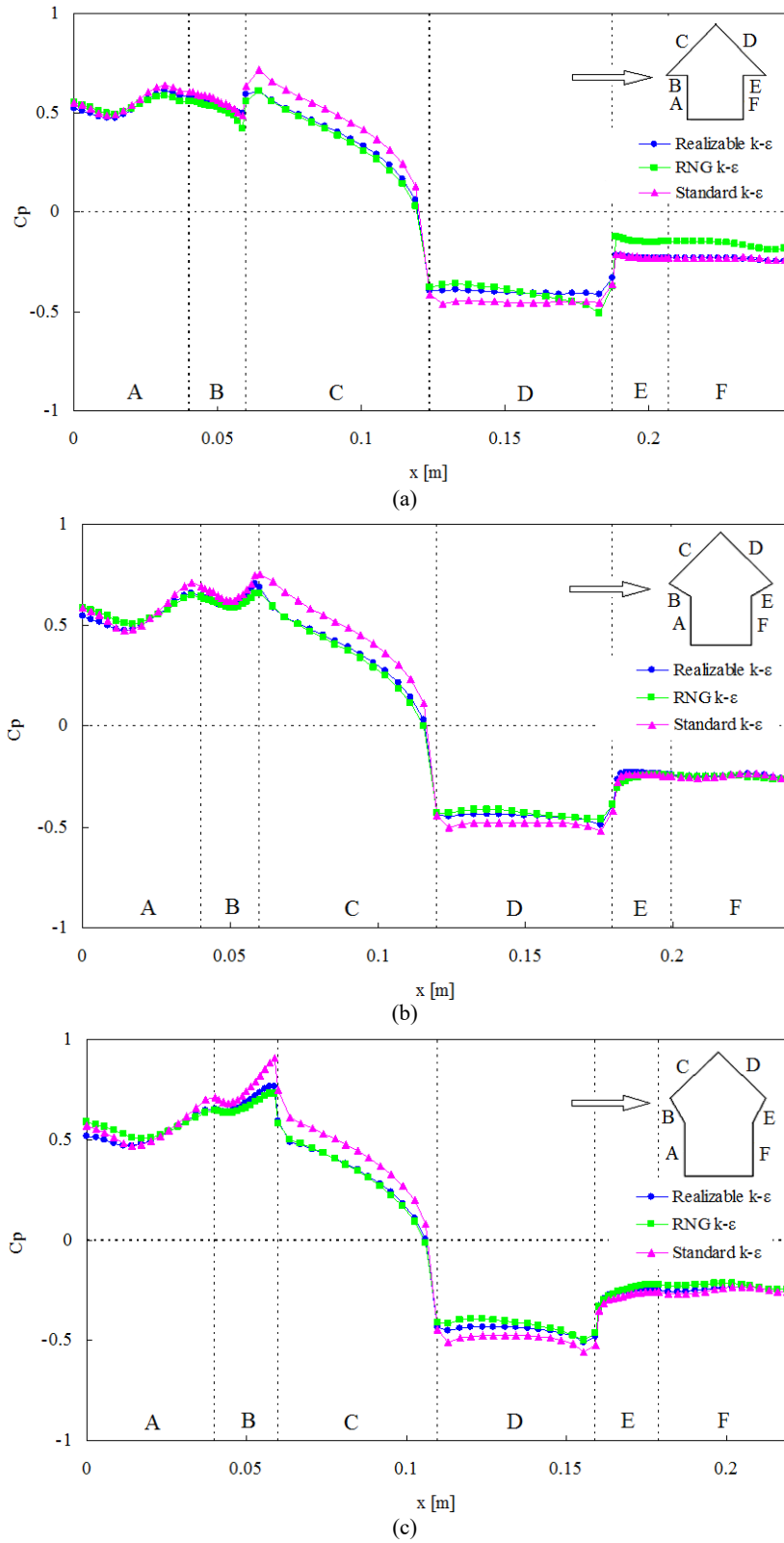
Beşik çatılı bina modellerinin yüzeylerinde akış doğrultusunda orta eksen boyunca Realizable k-ε türbülans modeli ile hesaplanmış basınç dağılımları üzerinde çatı eğim açısının etkisi üç farklı saçak eğim açısı için sırasıyla Şekil 11a-Şekil 11c'de görülmektedir. Saçak eğim açısının 0° olduğu durumda, her üç çatı eğim açısında da modellerin ön yüzeyi (1-2) ve ön saçakların alt yüzeylerinde (2-3) itme etkisi nedeniyle basınç katsayıları yaklaşık aynı değerlerle pozitif olmaktadır. Çatı eğim açısının 15° olduğu modelde ön saçak ucundan itibaren çatı yüzeylerinde (3-4 ve 4-5) ve arka saçak (5-6) ve model arka yüzeyinde (6-7), basınç katsayıları negatif olmaktadır. Ön saçak ucu civarında küçük bir negatif pikten sonra çatı sırtına kadar gittikçe kuvvetlenen emme etkisi, çatı sırtında en kritik değerine ulaşmaktadır. Çatı sırtından itibaren ise çatı arka yüzeyi boyunca hafifleyerek arka saçak ve model arka yüzeyi üzerinde yaklaşık sabit olmaktadır. Çatı eğim açısının 30° olduğu modelde ise, ön saçak ucundan itibaren azalan pozitif basınç katsayısı değerleri, çatı sırtına yakın bir bölgede negatif olup çatı sırtında kritik değerine ulaşmaktadır. Çatı sırtında negatif pik oluşturduktan sonra hafifleyerek çatı arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit negatif değerler göstermektedir. Çatı arka yüzeyinin arka saçakla birleştiği noktadan itibaren daha da hafifleyen emme etkisi ile arka saçak ve model arka yüzeyi boyunca basınç katsayıları yine yaklaşık sabit olmaktadır. 45° çatı eğim açısına sahip modelde, pozitif basınç katsayıları çatı ön yüzeyi boyunca azalarak çatı sırtında negatif olmaktadır. Çatı arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit negatif değerlerde olan basınç katsayıları çatı arka yüzeyinin arka saçakla birleştiği noktadan itibaren hafifleyerek arka saçak ve model arka yüzeyi boyunca yine yaklaşık sabit olmaktadır. Üç farklı çatı eğimine sahip bina modellerinin çatı ön yüzeylerindeki basınç dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, 15° eğimli çatının ön yüzeyinde emme etkisi gözlenirken, 30° ve 45° eğimli çatıların ön yüzeylerinde basınç katsayılarının pozitif olduğu ve yine çatı sırtındaki en kritik negatif pikin 15° eğimli çatıda olduğu görülmektedir. Bu durum, küçük eğim açısına sahip çatıların rüzgâr kaynaklı hasarlara daha çok maruz kalacağını göstermektedir (Şekil 11a). Saçak eğim açısının 30° olduğu durumda, yine her üç çatı eğim açısında da modellerin ön yüzeyi (1-2) ve ön saçakların alt yüzeylerinde (2-3) itme etkisi nedeniyle basınç katsayıları yaklaşık aynı değerlerle pozitif olmaktadır. Çatı eğim açısının 15° olduğu modelde ön saçak ucundan itibaren çatı yüzeylerinde (3-4 ve 4-5) ve arka saçak (5-6) ve model arka yüzeyinde (6-7), basınç katsayıları negatif olmaktadır. Ön saçak ucu civarındaki negatif pikten sonra çatı sırtına kadar gittikçe kuvvetlenen emme



**Şekil 8.** 30° çatı eğimine sahip bina modellerinin yüzeylerinde Realizable k-ε türbülans modeli ile hesaplanmış eş basınç alanları a) 0° eğimli saçak, b) 30° eğimli saçak, c) 60° eğimli saçak (Pressure contours computed with Realizable k-ε turbulence model on building model surfaces with 30° roof pitch a) 0° pitched eave, b) 30° pitched eave, c) 60° pitched eave)

etkisi, çatı sırtında en kritik değerine ulaşmaktadır. Çatı sırtından itibaren ise çatı arka yüzeyi boyunca hafifleyerek arka saçak ve model arka yüzeyi üzerinde yaklaşık sabit olmaktadır. Çatı eğim açısının 30° olduğu modelde ise, ön saçak ucundan itibaren azalan pozitif basınç katsayısı değerleri, çatı ön yüzeyinin ortasında bir bölgede negatif olup çatı sırtında kritik değerine ulaşmaktadır. Çatı sırtında negatif pik oluşturduktan sonra hafifleyerek çatı arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit negatif değerler göstermektedir. Çatı arka yüzeyinin arka saçakla birleştiği noktadan itibaren daha da hafifleyen emme etkisi ile arka saçak ve model arka yüzeyi boyunca basınç katsayıları yine yaklaşık

sabit olmaktadır. 45° çatı eğim açısına sahip modelde, pozitif basınç katsayıları çatı ön yüzeyi boyunca azalarak çatı sırtında negatif olmaktadır. Çatı arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit negatif değerlerde olan basınç katsayıları çatı arka yüzeyinin arka saçakla birleştiği noktadan itibaren hafifleyerek arka saçak ve model arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit olmaktadır. Üç farklı çatı eğimine sahip bina modellerinin çatı ön yüzeylerindeki basınç dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, 15° eğimli çatının ön yüzeyinde ve 30° eğimli çatının çatı sırtına yakın bölümünde emme etkisinin gözlemlendiği, 45° eğimli çatının ön yüzeyinde ise basınç katsayılarının pozitif olduğu ve

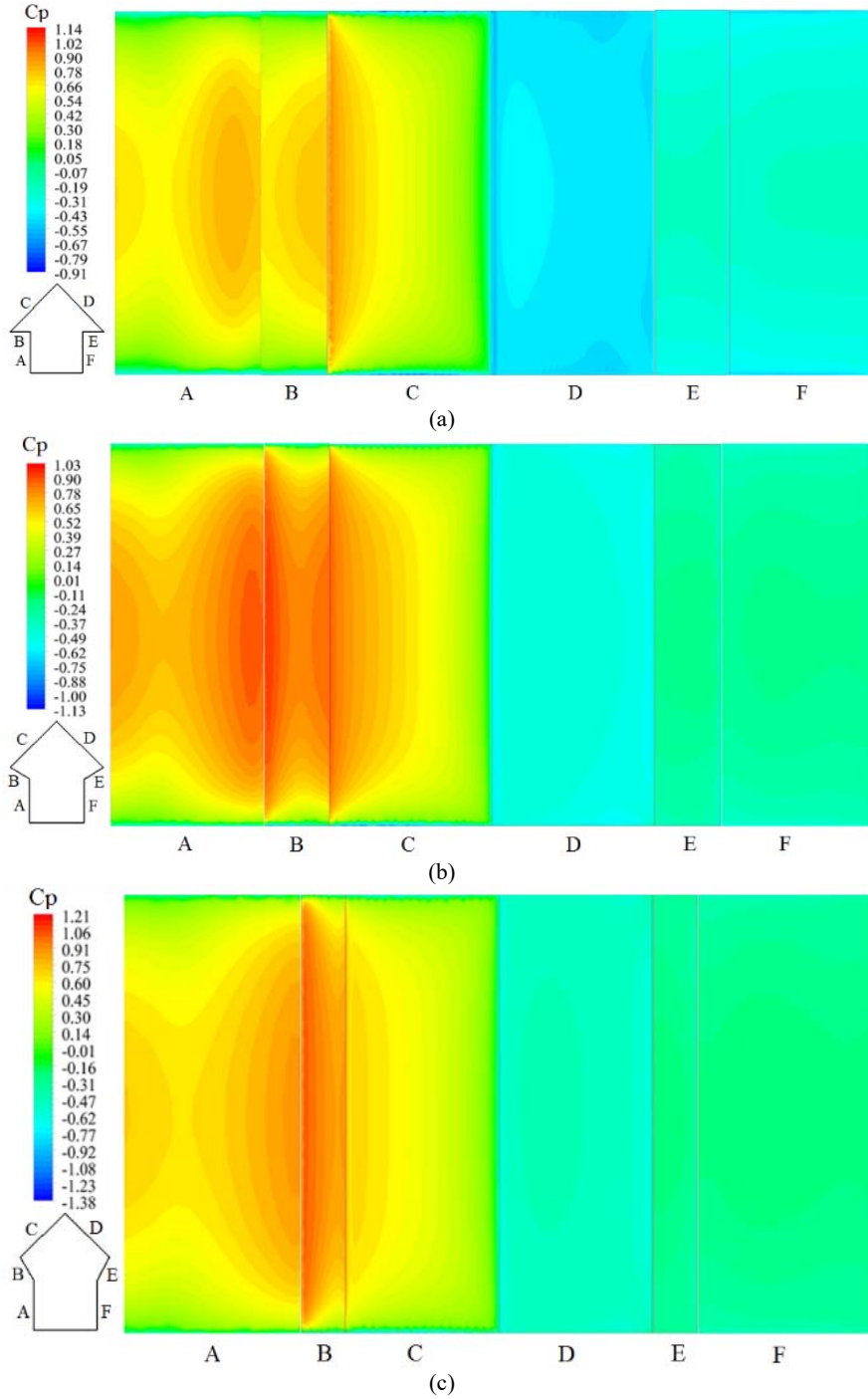


**Şekil 9.** 45° çatı eğimine sahip bina modeli yüzeylerinde orta eksen boyunca basınç dağılımları a) 0° eğimli saçak, b) 30° eğimli saçak, c) 60° eğimli saçak

(Pressure distributions along the mid axis on building model surfaces with 45° roof pitch a) 0° pitched eave, b) 30° pitched eave, c) 60° pitched eave)

yine çatı sırtındaki en kritik negatif piki 15° eğimli çatıda oluştuğu görülmektedir. (Şekil 11b). Saçak eğim açısının 60° olduğu durumda,

her üç çatı eğim açısında da modellerin ön yüzeyi (1-2) ve ön saçakların alt yüzeylerinde (2-3) itme etkisi nedeniyle basınç

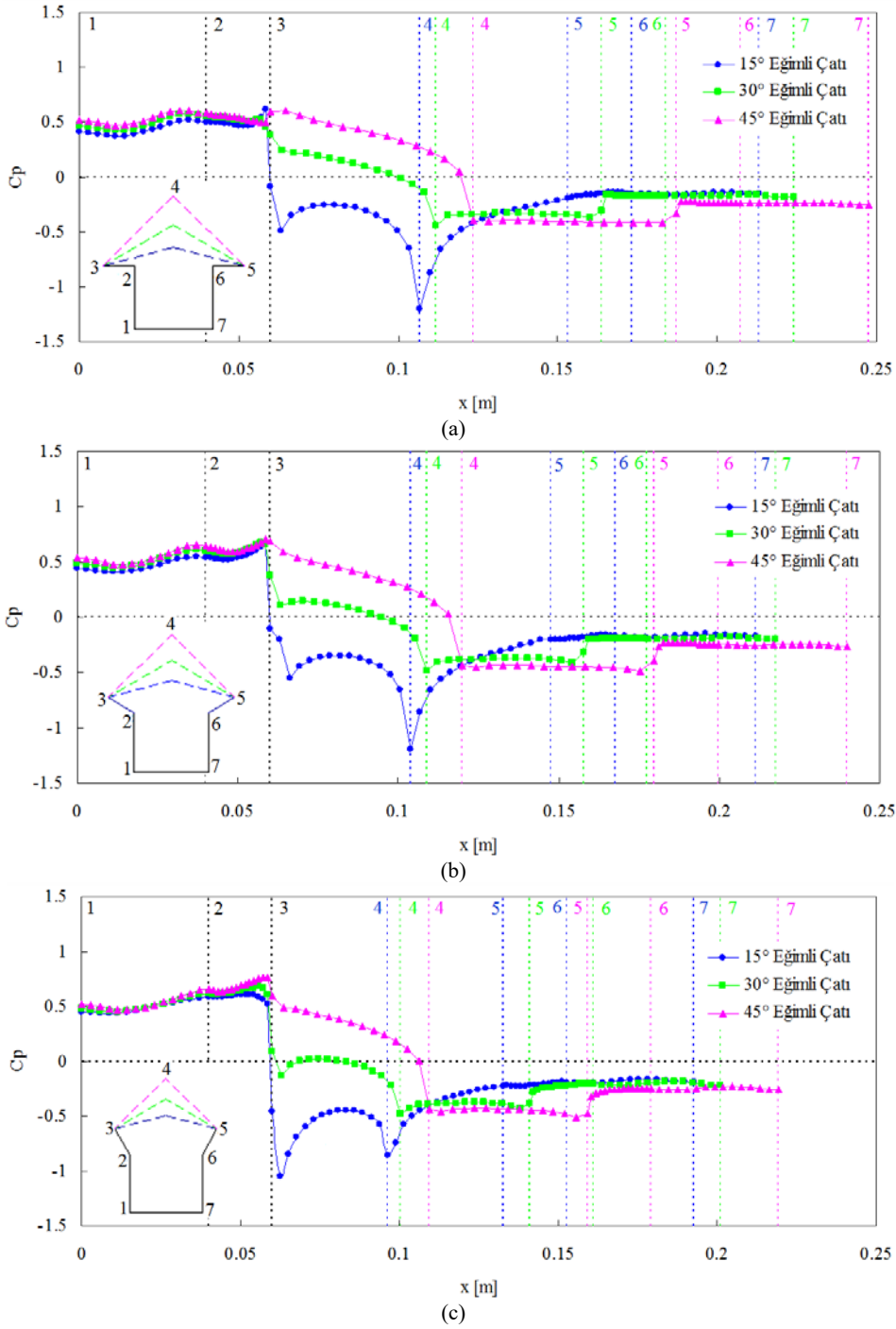


**Şekil 10.** 45° çatı eğimine sahip bina modellerinin yüzeylerinde Realizable k-ε türbülans modeli ile hesaplanmış eş basınç alanları a) 0° eğimli saçak, b) 30° eğimli saçak, c) 60° eğimli saçak (Pressure contours computed with Realizable k-ε turbulence model on building model surfaces with 45° roof pitch a) 0° pitched eave, b) 30° pitched eave, c) 60° pitched eave)

katsayıları yaklaşık aynı değerlerle pozitif olmaktadır. Çatı eğim açısının 15° olduğu modelde, ön saçak ucundan itibaren çatı yüzeylerinde (3-4 ve 4-5) ve arka saçak (5-6) ve model arka yüzeyinde (6-7), basınç katsayıları negatif olmaktadır. Ön saçığın altında oluşan küçük ölçekli pozitif pikten hemen sonra çatı ön yüzeyinin ön saçak üzerine yakın kısmında kritik bir negatif pik oluşmaktadır. Çatı ön yüzeyinin orta bölümüne doğru hafifleyen emme etkisi çatı ön yüzeyinin çatı sırtına yakın bölgesinde tekrar kuvvetlenerek çatı sırtında ikinci bir kritik pik oluşturmaktadır. Çatı ön yüzeyinin ön

saçak bölgesinde oluşan negatif pikten, çatı sırtı yakınındaki bölgede oluşan negatif pikten daha kritik olduğu görülmektedir. Emme etkisi, çatı sırtından itibaren çatı arka yüzeyi boyunca hafifleyerek arka saçak ve model arka yüzeyi üzerinde yaklaşık sabit olmaktadır. Çatı eğim açısının 30° olduğu modelde ise, ön saçığın alt yüzeyi boyunca artarak ön saçığın ucunda maksimum olan basınç katsayısı, aniden azalarak ön saçığın çatı ön yüzeyiyle birleştiği bölgede küçük ölçekli bir minimum pikle emme etkisi göstermektedir. Çatı ön yüzeyinin büyük bölümünde de gözlenen emme etkisi çatı sırtında kritik negatif





**Şekil 11.** Farklı çatı ve saçak eğimine sahip bina modeli yüzeylerinde orta eksen boyunca Realizable k-ε türbülans modeli ile hesaplanmış basınç dağılımları a) 0° eğimli saçak, b) 30° eğimli saçak, c) 60° eğimli saçak (Pressure distributions computed with Realizable k-ε turbulence model on building model surfaces having different roof and eave pitch a) 0° pitched eave, b) 30° pitched eave, c) 60° pitched eave)

pik oluşturduktan sonra hafifleyerek çatı arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit olmaktadır. Çatı arka yüzeyinin arka saçakla birleştiği noktadan itibaren arka saçak alt yüzeyi boyunca daha da hafifleyen emme etkisi model arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit olmaktadır. 45° çatı eğim açısına sahip modelde, ön saçakın alt yüzeyi boyunca önce azalan basınç katsayısı, ön saçakın çatı ön yüzeyiyle birleştiği bölgede maksimum pik yapmakta ve çatı ön yüzeyi boyunca tekrar azalarak çatı sırtında negatif olmaktadır. Çatı arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit olan emme etkisi çatı arka yüzeyinin arka saçakla

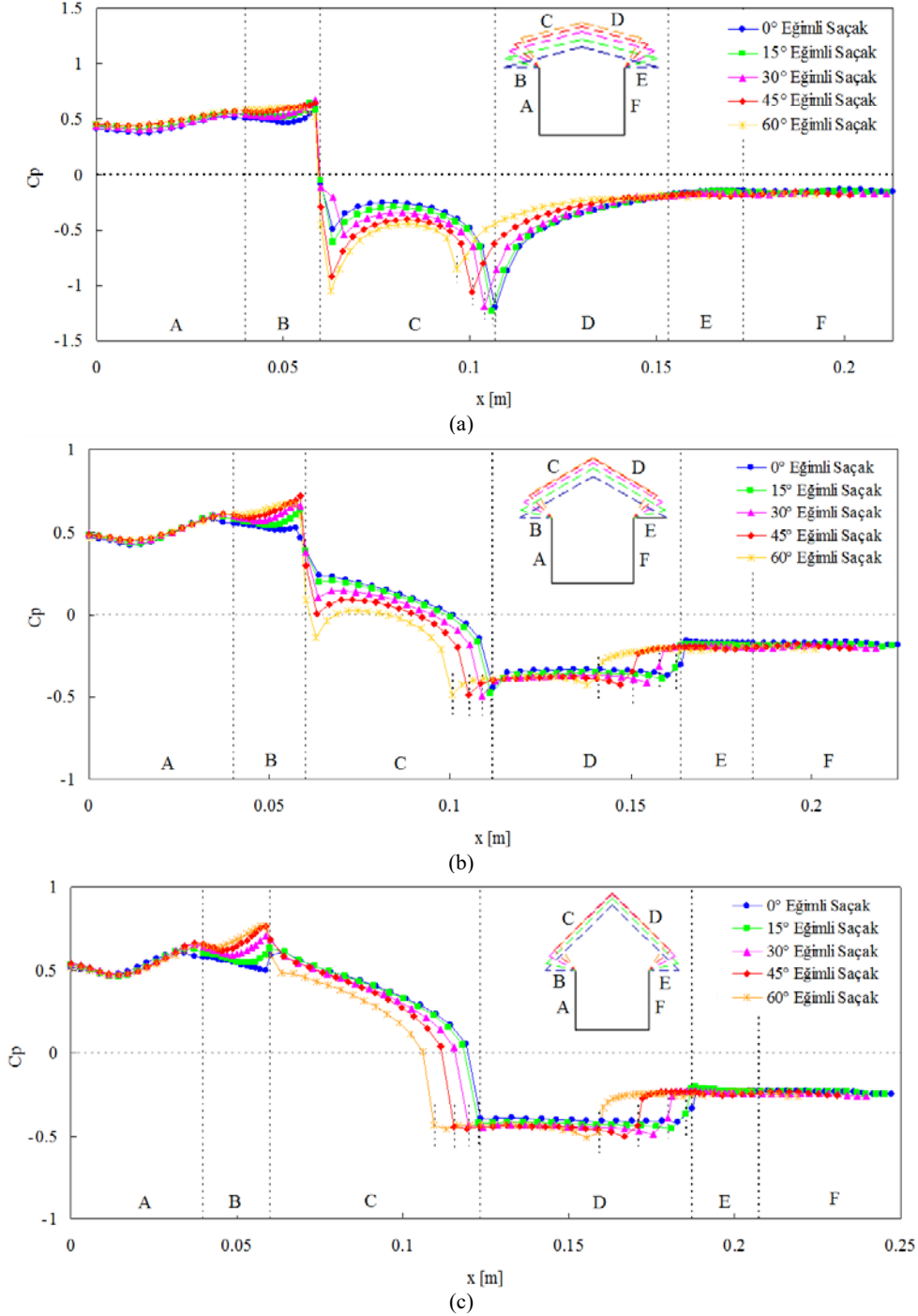
birleştiği noktadan itibaren hafifleyerek arka saçak ve model arka yüzeyi boyunca yaklaşık sabit kalmaktadır. Üç farklı çatı eğimine sahip bina modelinin çatı ön yüzeylerindeki basınç dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, 15° ve 30° eğimli çatıların ön yüzeylerinde emme etkisinin gözlemlendiği, 45° eğimli çatının ön yüzeyinde ise basınç katsayılarının pozitif olduğu görülmektedir. Çatı sırtındaki en kritik negatif piklerin yine 15° eğimli çatıda olduğu ve ön saçak üzerinde oluşan pikin çatı sırtındaki pike göre daha kritik olduğu görülmektedir. (Şekil 11c). Artan saçak açısı ile birlikte, çatıların ön

yüzeylerindeki emme etkilerinin daha büyük çatı eğimlerinde de olduğu ve çatı yüzeylerinde oluşan pikler arasındaki farkın azaldığı görülmektedir.

### 3.3. Saçak Eğimi Etkisi (Effect of Eave Pitch)

Beşik çatılı bina modellerinin yüzeylerinde akış doğrultusunda orta eksen boyunca Realizable k-ε türbülans modeli ile hesaplanmış basınç

dağılımları üzerinde saçak eğim açısının etkisi üç farklı çatı eğim açısı için sırasıyla Şekil 12a-Şekil 12c’de görülmektedir. Çatı eğim açısının 15° olduğu durumda, beş saçak açısı durumunda da, rüzgâra doğrudan maruz kalan modellerin ön yüzeylerinde (A) ve ön saçakların alt yüzeylerinde (B) basınç katsayıları itme etkisiyle birbirine yakın pozitif değerler almaktadır. Ön saçakların üst ucundan itibaren çatı yüzeylerinde (C ve D) ve arka saçak (E) ve model arka yüzeylerinde (F), basınç katsayıları negatif olmaktadır. Saçak açısının değişmesiyle



**Şekil 12.** Farklı çatı ve saçak eğimine sahip bina modeli yüzeylerinde orta eksen boyunca Realizable k-ε türbülans modeli ile hesaplanmış basınç dağılımları a) 15° eğimli çatı, b) 30° eğimli çatı, c) 45° eğimli çatı  
(Pressure distributions computed with Realizable k-ε turbulence model on building model surfaces having different roof and eave pitch a) 15° pitched roof, b)30° pitched roof, c)45° pitched roof)

ortaya çıkan çatı yüzeylerindeki emme etkisi farklılığı ağırlıklı olarak çatı ön yüzeylerinde gözlenmektedir. Çatıların ön yüzeylerinin ön saçağa ve çatı sırtına yakın bölgelerinde negatif pikler oluşmakta, söz konusu pikler düşük saçak eğim açılarında çatı sırtı yakınında daha kritik olurken, yüksek saçak eğim açılarında ön saçak yakınında daha kritik olmaktadır. Saçak eğim açısı arttıkça iki pik arasındaki fark azalmaktadır (Şekil 12a). Çatı eğim açısının 30° olduğu durumda, beş saçak açısı durumunda da, yine rüzgâra doğrudan maruz kalan modellerin ön yüzeylerinde (A) ve ön saçakların alt yüzeylerinde (B) basınç katsayıları itme etkisiyle pozitif değerler almaktadır. Çatı ön yüzeylerinin orta bölümünden itibaren basınç katsayıları negatif olmakta ve çatı arka yüzeylerinde (D), arka saçak yüzeylerinde (E) ve model arka yüzeylerinde (F), basınç katsayıları negatif olmaktadır. Saçak açısının değişmesiyle çatı yüzeylerindeki basınç dağılımlarında ortaya çıkan farklılık ağırlıklı olarak ön saçak yüzeylerinde ve çatı ön yüzeylerinde gözlenmektedir. Çatıların ön yüzeylerinin ön saçağa ve çatı sırtına yakın bölgelerinde pikler oluşmakta, çatı sırtı yakınında kritik negatif değerlerden oluşan pikler beş saçak eğim açısı için de yaklaşık aynı değerleri alırken, ön saçağa yakın küçük ölçekli pikler artan saçak eğim açısı ile birlikte daha kritik olmaktadır. Saçak eğim açısı arttıkça çatı ön yüzeylerindeki pikler arasındaki fark azalmaktadır (Şekil 12b). Çatı eğim açısının 45° olduğu durumda, beş saçak açısı durumunda da, rüzgâra doğrudan maruz kalan modellerin ön yüzeylerinde (A) ve ön saçakların alt yüzeylerinde (B) basınç katsayıları itme etkisiyle pozitif değerler almaktadır. Çatı ön yüzeyleri boyunca azalan basınç katsayıları, çatı sırtlarından itibaren negatif olmakta ve çatı arka yüzeylerinde (D), arka saçak yüzeylerinde (E) ve model arka yüzeylerinde (F), basınç katsayıları negatif etkisini sürdürmektedir. Saçak açısının değişmesiyle çatı yüzeylerindeki basınç dağılımlarında ortaya çıkan farklılık ağırlıklı olarak ön saçak yüzeylerinde ve çatı ön yüzeylerinde gözlenmektedir. Çatıların ön yüzeylerinin çatı sırtına yakın bölgelerinde negatif olan basınç katsayıları, beş saçak eğim açısı için de yaklaşık aynı değerleri alarak çatı arka yüzeyleri boyunca etkilerini sürdürmektedir (Şekil 12c).

#### 4. Simgeler (Symbols)

$C_p$	: Basınç katsayısı [ $\Delta P / (\rho U_o^2/2)$ ]
$C_\mu$	: Model sabiti
$E$	: Bina saçak uzunluğu [m]
$F$	: Kuvvet [N]
$G_k, G_b$	: Türbülanslı kinetik enerji üretimi
$H$	: Bina yüksekliği [m]
$k$	: Türbülans kinetik enerji [ $m^2/s^2$ ]
$L$	: Bina uzunluğu [m]
$m$	: Kütle [kg]
$P$	: Basınç [ $N/m^2$ ]
$P_s$	: Statik basınç [ $N/m^2$ ]
$\Delta P$	: Atmosferik basınç ve yüzey basıncı arasındaki fark [ $N/m^2$ ]
$Re$	: Reynolds sayısı [ $U_o H/\nu$ ]
$S_k, S_e$	: Kaynak terimi
$U_o$	: Serbest akış hızı [m/s]
$u, v, w, x, y, z$	: doğrultularında hız bileşenleri [m/s]
$u_\tau$	: Kayma hızı [m/s]
$t$	: Zaman [s]
$x$	: Yatay koordinat
$y$	: Dikey koordinat
$y^+$	: Boyutsuz mesafe [ $y^+=y u_\tau/\nu$ ]
$Y_M$	: Çalkantı oranı
$W$	: Bina genişliği [m]
$z$	: Derinlik koordinatı
$z_o$	: Pürüz yüksekliği [m]
$\delta$	: Sınır tabaka kalınlığı [m]
$\alpha$	: Bina çatı açısı [ $^\circ$ ]
$\beta$	: Bina saçak açısı [ $^\circ$ ]

$\theta$	: Rüzgâr geliş açısı [ $^\circ$ ]
$\nu$	: Kinematik viskozite [ $m^2/s$ ]
$\rho$	: Havanın yoğunluğu [ $kg/m^3$ ]
$\varepsilon$	: Türbülans yutulma oranı [ $m^2/s^3$ ]
$\mu$	: Dinamik viskozite [ $N.s/m^2$ ]
$\mu_t$	: Türbülanslı viskozite
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	: Prandtl sayısı

#### 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, farklı çatı ve saçak açılarıyla çeşitlendirilen beşik çatılı bina modelleri etrafında sürekli rejimdeki üç boyutlu akış alanları, farklı türbülans modelleri ile hesaplanmış ve geometrik değişikliklerin akış alanı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Bina modellerinin ön yüzeylerinde ve ön saçakların alt yüzeylerinde itme etkisiyle basınç katsayıları pozitif değerler almakta, çatıların arka yüzeylerinde, arka saçak yüzeylerinde ve modellerin arka yüzeylerinde basınç katsayıları negatif olmaktadır. Çatıların ön yüzeylerindeki basınç dağılımları ise çatı eğim açısına göre değişmektedir. 15° eğimli çatıların ön yüzeylerinde emme etkisi gözlenirken, 30° eğimli çatıların yüzeylerinde bu etki kaybolmakta, 45° eğimli çatıların ön yüzeylerinde ise basınç katsayıları pozitif olmaktadır. En kritik negatif pik basınç katsayıları 15° eğimli çatıların sırtlarında oluşmaktadır. 15° eğimli çatıların ön yüzeylerinde oluşan negatif piklerden çatı sırtına yakın olanlar artan saçak eğim açısıyla birlikte hafiflerken, ön saçağa yakın olanlar ise artan saçak eğim açısıyla birlikte kuvvetlenmektedir. 15° çatı eğimine ve 60° saçak eğimine sahip çatının ön yüzeyinde oluşan negatif piklerden ön saçak yakınında oluşan pik çatı sırtında oluşan pikten daha kritik olmaktadır. Saçak eğim açısı arttıkça çatı ön yüzeylerindeki pikler arasındaki fark azalmaktadır. Artan saçak eğim açısı ile birlikte, ön saçak yüzeylerindeki pozitif basınç katsayıları daha büyük değerler almaktadır. Çalışmada farklı türbülans modelleriyle hesaplanan sayısal sonuçlar genel olarak birbiriyle uyumlu olmaktadır. Ancak Realizable k- $\varepsilon$  türbülans modeli ile hesaplanmış basınç katsayıları deneysel sonuçlara daha yakındır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, çatı eğim açısı azaldıkça saçak eğim açısı etkisinin daha çok önem kazandığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçların bu alanda çalışan mimar ve mühendislere katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

#### Kaynaklar (References)

1. Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J.E., Wind environmental conditions in passages between two long narrow perpendicular buildings, *Journal of Aerospace Engineering*, 21 (4), 280-287, 2008.
2. Fan M., Chau C.K., Chan E.H.W., 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.
3. Serteser N., Karadag I., Design for improving pedestrian wind comfort: a case study on a courtyard around a tall building, *Architectural Science Review*, 61 (6), 492-499, 2018.
4. Veena, K., Asha, V., Arshad Shameem, C., Venkatesh T.N., CFD analysis for siting of wind turbines on high rise buildings, *Journal of Physics: Conf. Series* 822, 012013, 2017.
5. Davenport A.G., Surry D.J., The pressures on low rise structures in turbulent wind, *Canadian Structural Engineering Conference*, Ottawa, 1-39, 1974.
6. Stathopoulos T., Wind loads on low-rise buildings with various-sloped roofs, *Engineering Structures*, 23, 813-824, 1984.
7. Kind R.J., Worst suctions near edges of flat rooftops with parapets, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31, 251-264, 1988.
8. Meecham D., Surry D., Davenport A.G., The magnitude and distribution of wind-induced pressures on hip and gable roofs, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 38, 257-272, 1991.
9. Robertson A.P., Effect of eaves detail on wind pressures over an industrial building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 38, 325-333, 1991.

10. Stathopoulos T., Luchian H., Wind-induced forces on eaves of low buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 52, 249-261, 1994.
11. Richardson G.M., Hoxey R.P., Robertson A.P., Short J.L., The Silsoe Structures Building: Comparisons of pressures measured at full scale and in two wind tunnels, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 72, 187-197, 1997.
12. Hoxey R.P., Reynolds A.M., Richardson G.M., Robertson A.P., Short J.L., Observations of Reynolds number sensitivity in the separated flow region on a bluff body, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 73, 231-249, 1998.
13. Uematsu Y., Isyumov N., Wind pressures acting on low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 82, 1-25, 1999.
14. Ginger J.D., Holmes J.D., Effect of building length on wind loads on low-rise buildings with a steep roof pitch, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 1377-1400, 2003.
15. Prasad D., Uliate T., Ahmed M.R., Wind loads on low-rise building models with different roof configurations, *Fluid Mechanics Research*, 36, 231-243, 2009.
16. Bitsuamlak G.T., Warsido W., Ledesma E., Chowdhury A.G., Aerodynamic mitigation of roof and wall corner suctions using simple architectural elements, *Journal of Engineering Mechanics*, 139, 396-408, 2013.
17. Tominago Y., Akabayashi S., Kitahara T., Arinami Y., Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations, *Building and Environment*, 84, 204-213, 2015.
18. Fouad N.S., Mahmoud G.H., Nasr N.E., Comparative study of international codes with loads and CFD results for low rise buildings, *Alexandria Engineering Journal*, 57, 3623-3639, 2018.
19. Xing F., Mohotti D., Chauhan K., Study on localized wind pressure development in gable roof buildings having different roof pitches with experiments, RANS and LES simulation models, *Building and Environment*, 143, 240-257, 2018.
20. Shan W., Tamura Y., Yang Q., Li B., Effects of curved slopes, high ridges and double eaves on wind pressures on traditional Chinese hip roofs, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 183, 68-87, 2018.
21. Singh J., Roy A.K., Effects of roof slope and wind direction on wind pressure distribution on the roof of a square plan pyramidal low-rise building using CFD simulation, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11, 231-254, 2019.
22. Launder B.E., Spalding D.B., The Numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269-289, 1974.
23. 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.
24. 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.
25. Özmen Y., Farklı çatı tipleri ve eğimlerdeki binalar üzerinde rüzgâr etkilerinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
26. Oliveira P.J., Younis B.A., On the prediction of turbulent flows around full-scale buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 86, 203-220, 2000.

