

Solar Tracker Tek Eksenli Güneş Takip Sistemi Rüzgâr Kuvveti Dayanımının Analitik Çözümleri

Fatih YÜRÜK*, Nihat GEMALMAYAN

Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

Güneş Takip Sistemleri
Rüzgâr Yükleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
Sonlu Elemanlar Yöntemi
Türbülans Modelleri

Özet

Bu çalışmada, açık arazi ortamına yerleştirilmiş olan tek eksenli bir güneş takip sistemi model olarak ele alınarak, sisteme etki eden en önemli yük olan rüzgâr yüklerinin konstrüksiyon üzerinde oluşturduğu gerilimler ve deplasmanlar incelenmiştir. Rüzgâr akış analizi hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile gerçekleştirilmiştir ve temel akış denklemleri Ansys Fluent paket programı ile çözülmüştür. Sonlu hacimler metodu ve daimi durumlu SST k- ω türbülans modeli kullanılarak güneş panellerine etkiyen rüzgâr yükleri hesaplanmıştır. Bu yükler altındaki metal taşıyıcı sistemin von-mises gerilim değerleri sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir ve temel denklemler Ansys Structure paket programı ile çözülmüştür. Akış analizi sonucunda, güneş panelleri üzerinde oluşan rüzgâr basınç dağılımlarını sonlu elemanlar modeline aktarmak için Ansys akışkan-yapı etkileşimi paket programı kullanılmıştır. Akış ve yapısal analiz çalışmaları sonucunda güneş takip sistemi konstrüksiyonu üzerinde elde edilen gerilim değerleri, malzemelerin akma sınır değerleri ile kıyaslanıp sistem üzerinde kalıcı hasar oluşumunun engellenmesi amaçlanmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak güneş panellerinin eğim açısı, rüzgârın hücum açısı ve şiddeti ile birlikte, kolonların zemine olan yüksekliği de değişken olarak dikkate alınmış ve parametrik analizler yürütülmüştür. Ayrıca, mevcut çalışmada kullanılan sayısal yöntemlerin doğrulanması için literatürde kullanılan çalışmadan yararlanılmıştır.

Analytical Solutions of Wind Force on Single Axis Solar Tracker System

Keywords:

Solar Tracker Systems
Wind Loads
Computational Fluid Dynamics
Finite Element Method
Turbulent Models

Abstract

In this study, the single axis solar tracker system, which is placed in open terrain, has been considered as a model and the stresses and displacements on the construction caused by wind loads, which are the most critical load on the system, have been investigated. The wind flow analysis was performed by computational fluid dynamics method and the basic flow equations were solved by the Ansys Fluent package program. The finite volume method and steady state SST k- ω turbulence model were used to calculate wind loads on solar panels. The von-mises stress values of the steel support structure under these loads were examined by finite element method and the basic equations were solved by the Ansys Structure package program. Ansys fluid-structure interaction package program was used to transfer the wind pressure distributions on solar panels as a result of flow analysis to the finite element model. As a result of flow and structural analysis, it is aimed to prevent permanent failure on the system by comparing the stress and tensile yield strength values of solar construction. Different from other studies, the inclination angle of the solar panels, wind flow direction and velocity, as well as the height of the piers to the ground, were taken into account and parametric analysis were carried out. Also, the study used in the literature was taken into consideration for verification of numerical methods used in the current study.

1. GİRİŞ

Karbondioksit emisyonlarının neden olduğu artan çevre kirliliği, fosil yakıt kaynaklarının tükenebilir olması ve enerji ihtiyaçlarının giderek artması nedeniyle yenilebilir enerji kaynaklarına ilgi artmaktadır. Güneş enerjisi sistemleri ise çevre kirliliği yaratmaması, işletim maliyetinin çok düşük olması ve depolamasının kolaylığı nedeniyle günümüzde tercih edilen yenilebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Son yıllarda güneş enerjisi santrallerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, bu sistemlerdeki verimliliğe de büyük önem verilmektedir. Güneş takip sistemleri, yıllık enerji üretiminin artırılmasında önemli rol oynamaktadır. Genele baktığımızda güneş takip sistemleri açık arazi ortamlarında çalışmaktadır ve bu nedenle metal taşıyıcı sistemler rüzgâr yüküne maruz kalmaktadır. Ayrıca metal taşıyıcı sistemler üzerine yatayda ve dikeyde sıralı diziler halinde güneş panelleri yerleştirilerek istenilen gerilim ve güç seviyelerine ulaşılabilmektedir ve bu durum panel yüzey alanında artışa neden olmaktadır. Bu paneller üzerinde eş zamanlı olarak hareket eden rüzgâr yükleri, geniş yüzey alanı nedeniyle takip sistemi konstrüksiyonlarında zorlanmalara ve buna bağlı olarak ciddi mekanik problemlere neden olabilmektedir.

Türkiye'deki endüstriyel uygulamalarda güneş enerjisi konstrüksiyonlarının rüzgâr yüklerini belirleyebilmek için TS498 standardı [1] kullanılmaktadır. Bu standarda göre yapılan rüzgâr yükü hesapları çok kaba kabullere dayanmaktadır. Ayrıca güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan eğimli ve arkası açık sistemlere ithafen hiçbir bilgi bulunmamaktadır. Bu yüzden rüzgâr yüklerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile belirlenmesi, bu eksikliklerin ve yetersizliklerin giderilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca bu rüzgâr yükleri altında çalışacak olan güneş takip sisteminde, hasar oluşumunu engellemek amacıyla güneş panellerinin ve taşıyıcı sistemlerin rüzgâr yükü altındaki yapısal analizinin yapılması oldukça önemlidir.

Rüzgâr yüklerinin güneş enerjisi sistemleri üzerindeki etkileri üzerine çalışmalara bakıldığında, Bitsumlak ve diğerleri [2] hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımını kullanarak rüzgâr akışı altındaki güneş panellerinin aerodinamik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, güneş panellerinin tek başına veya arka arkaya sıralı dizili olması durumlarında üç çeşit rüzgâr yönüne göre rüzgâr yükleri hesaplanmıştır ve birinci sıradaki panellerin diğer sıradaki panellere siper etkisi sağladığı gözlemlenmiştir. Jubayer ve Hangan [3] atmosferik ortama yerleştirilmiş 25° panel açılı zemin üstü monteli fotovoltaiik sistemlerin rüzgâr yüklerini incelemek amacıyla üç boyutlu daimi olmayan Reynolds ortalama Navier-Stokes metodunu ve SST k- ω türbülans sayısal modelini kullanmışlardır. Rüzgârın hücum açısını 0° ile 180° arasında 45° artışlarla değişken olarak tanımlayıp nümerik analizler gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, sayısal analizler sonucunda elde edilen basınç katsayısı değerleri deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Analizler sonucunda maksimum kaldırma katsayısının 180°deki rüzgâr yönünde olduğu ve maksimum devrilme momentlerinin ise 45° ile 135°deki rüzgâr yönlerinde meydana geldiği belirtilmiştir. Lin ve diğerleri [4] çalışmalarında, 2 kW'lık tek eksenli güneş takip sisteminin kendi ağırlığının ve rüzgâr yükünün yapı üzerinde oluşturduğu deplasmanları ve bu deplasmanların sonucunda oluşan güneş ışınlarındaki sapmaları sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Li ve diğerleri [5] ise çalışmalarında, güneş takip sistemi yerine sabit sistem güneş enerjisi konstrüksiyonun üzerine etki eden rüzgâr ve dalga yükünün, sistemdeki deplasmanlara ve mukavemete etkilerini yapısal analiz ile incelemişlerdir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli ile üç farklı rüzgâr hızı için akış analizi yapılmış ve bir panel üzerindeki basınç dağılımları elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile yapılan yapısal analiz sonucunda kullanılan konstrüksiyonun mukavemet açısından uygun olduğu gösterilmiştir. Khelifi ve Ferroudji [6] çift eksenli güneş takip sisteminin, kendi ağırlığı ve 36 m/s'deki kritik rüzgâr yükü altındaki yapısal gerilim ve yorulma analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre güneş takip sisteminin, statik mukavemet açısından tasarım gereksinimlerini karşıladığı ve hesaplanan yorulma ömrü içerisinde güvenli bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir.

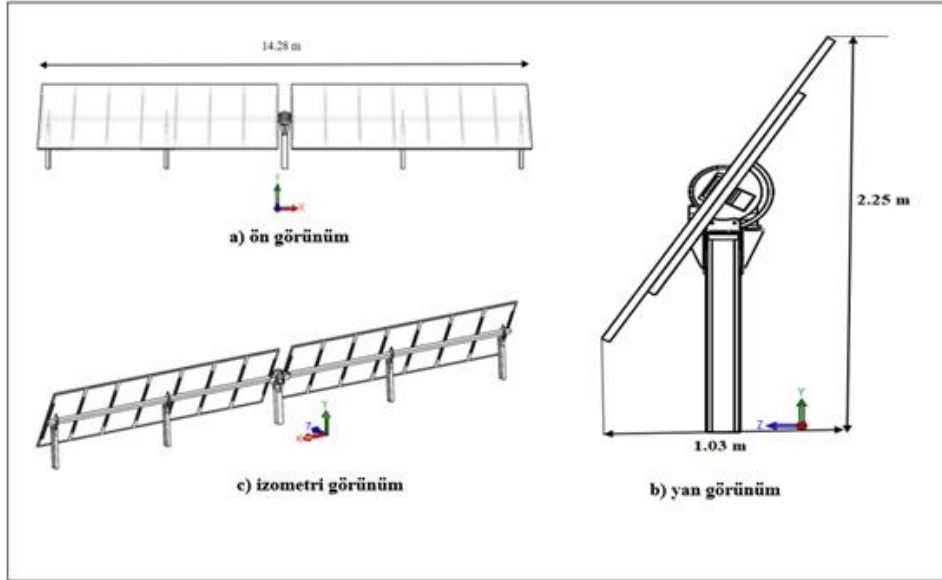
Bu çalışmada, $2,04 \times 10^6$ ve $2,45 \times 10^6$ Reynolds sayılarındaki güneş takip sisteminin, aerodinamik ve basınç katsayılarının tespit edilmesi ve güneş takip sistemi modelinin dış akış incelemesini sayısal çalışmalarla gerçekleştirerek, sistemin temelini oluşturan konstrüksiyonda kalıcı hasar oluşumunu engellemek amacıyla model geometrisinde akışa uygun olmayan kısımların belirlenmesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Güneş Takip Sistemi Model Geometrisi

Açık arazide zemine monte olarak kurulmak üzere tasarlanmış olan tek eksenli güneş takip sistemi, gün içerisinde x eksenine göre (Şekil 1) $\pm 60^\circ$ dönme hareketi yapmaktadır. Takip sisteminin bu dönme hareketi slew-drive motoru ile sağlanmaktadır. Tasarlanan tek eksenli güneş takip sistemi gerçekte tek sıra halinde 72 panel diziliminden oluşmaktadır. Gerçek boyutlardaki güneş takip sisteminin sayısal analizinin gerçekleştirilebilmesi

için çok fazla sayıda ağ eleman sayısına ihtiyaç vardır. Bu durum, çözüm süresini uzatmaktadır ve çözüm esnasında veri depolama boyutu arttığı için daha yüksek bellekte bilgisayar kullanma ihtiyacı doğurmuştur. Bu yüzden mevcut çalışmada prototip model kullanılmıştır. Güneş takip sisteminin prototipi Solidworks paket programı ile modellenmiştir. Model tek sıra halinde toplamda 14 panel dizilimine sahiptir ve toplam boyu (x eksenine boyunca) 14,28 m'dir. Toplam yüksekliği (y eksenine boyunca) ve toplam genişliği (z eksenine boyunca) ise güneş panellerinin eğim açısına ve kolonların zeminden olan yüksekliklerine bağlı olarak değişmektedir. 60° eğim açısı ve 1,1 m kolon yüksekliğine göre güneş takip sisteminin örnek model görünüşünü ve toplam boyutları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 60° eğim açısı ve 1.1 m kolon yüksekliği için güneş takip sisteminin model görünüşleri

Model tasarımda kullanılan güneş panelleri 1987x992x35 mm boyutlarındadır. Güneş panelleri 3,45 m aralıklarla yerleştirilmiş olan 5 adet kolonla desteklenmiştir. Model geometri YZ düzlemine göre simetriktir. Bu yüzden hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve sonlu elemanlar yöntemi çalışmalarında model geometri simetrik olarak çözdürülmüştür.

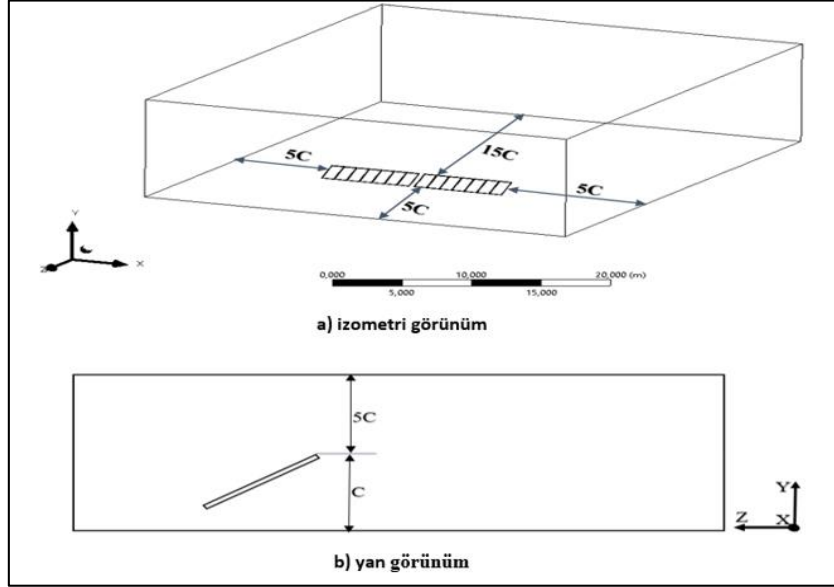
2.2. Güneş Takip Sisteminin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yaklaşımı

2.2.1. Geometri ve Sınır Şartları

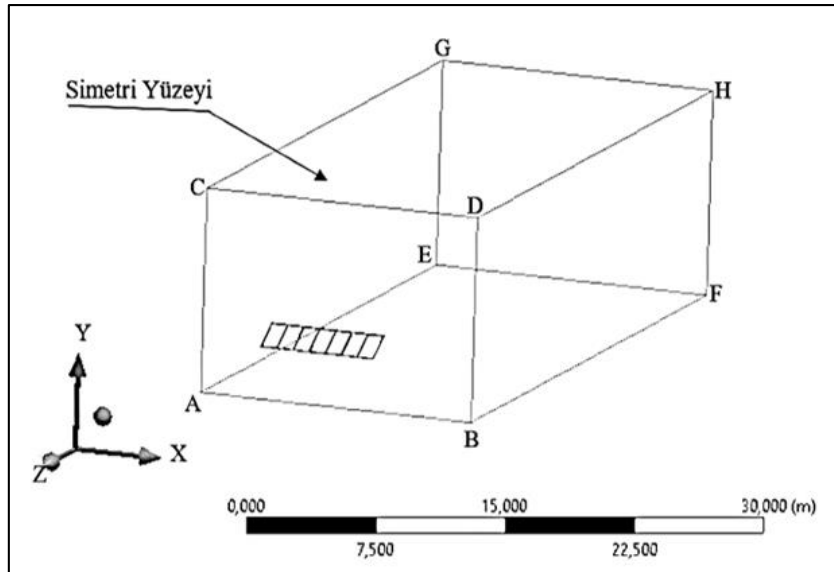
Akış analizinde, güneş panelleri etrafındaki havanın akışı için yeterli miktarda alan sağlayabilmek amacıyla hesaplama alanı (computational domain) oluşturulmalıdır. Hesaplama alanı boyutlarının oluşturulmasında Franke ve diğerlerinin [7] yapmış olduğu çalışma takip edilmiştir. Hesaplama alanı üst yüzeyi ile güneş takip sisteminin tepe noktası arasındaki mesafe ve güneş panellerinin yan yüzeyleri ile hesaplama alanı yan yüzeyleri arasındaki mesafe 5C, olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, hava akışının giriş yaptığı hesaplama alanı giriş yüzeyi ile güneş takip sistemi arasındaki mesafe 5C ve hava akışının çıkış yaptığı hesaplama alanı çıkış yüzeyi ile güneş takip sistemi arasındaki mesafe ise 15C olarak tanımlanmıştır. Burada, C değeri güneş takip sisteminin en üst noktasından zemine olan mesafe olarak tanımlanmıştır ve güneş panellerinin eğim açısı ile kolonların zeminden olan yüksekliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Akış analizleri simetrik çözdürüldüğü için hesaplama alanı modeli simetrik olarak oluşturulmuştur. Hesaplama alanı örnek modelin tam ve simetrik modelleri sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

Oluşturulan geometrinin ağ ile kaplanmasında Ansys Fluent paket programı içindeki ağ (mesh) kısmından yararlanılmıştır. Hava alanı boşluğunu oluşturan güneş panellerinin yakınındaki havanın akışını doğru yakalayabilmek için güneş panellerinin yüzeylerinde yüzey boyutlandırma (face sizing) ve kenarlarında kenar boyutlandırma (edge sizing) ile ağ iyileştirilmesi yapılmıştır. Yüzey boyutlandırma fonksiyonu için 40 mm bölümlenme oranı (mesh size) kullanılmıştır. Kenar boyutlandırma fonksiyonunda ise güneş panellerinin uzun kenarlarında 10 mm, kısa kenarlarında 4 mm bölümlenme oranı kullanılmıştır. Tanımlanan boyut fonksiyonlarında 1,2 artım hızı (growth rate) baz alınmıştır ve tetrahedral elemanlar ile ağlanmıştır. Güneş panellerinin dışında kalan hesaplama alanı bölgesi için genel ağ ayarlarından maksimum yüzey ve tetrahedral boyutları 1000 mm ile sınırlandırılmıştır. Tüm simülasyon durumları için 3,7-3,9 milyon hücreli çözüm ağının

kullanıldığı hesaplama alanındaki ağ elemanlarının kalite kontrolü çarpıklık (skewness) faktörü ile incelenmiştir. Ağ ile kaplanmış olan hesaplama alanı bozuk elemanlar yönünden incelendiğinde maksimum çarpıklık faktörü 0,82 olarak görülmüştür. Ayrıca ağdan bağımsız çözümler elde edebilmek için genel ağ ayarlarındaki kaba, orta ve hassas olmak üzere 3 farklı ağ iyileştirme seviyesi ile güneş panelleri üzerinde oluşan basınç değerleri karşılaştırılmıştır ve elde edilen değerlerin arasında %0,5 oranında değişiklik olduğu görülmüştür. Aralarındaki farkın ihmal edilebilecek kadar az olmasından dolayı yukarıda belirtilen bölümlene oranları kaba iyileştirme seviyesi ile kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.



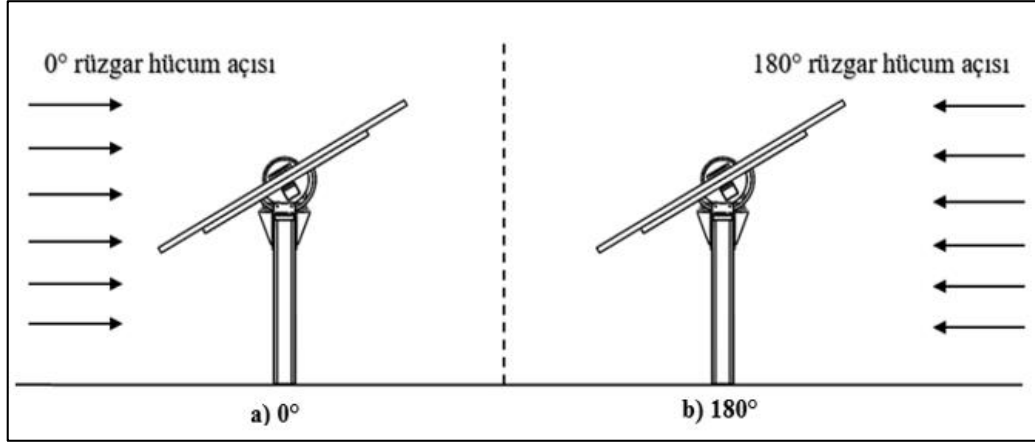
Şekil 2. Hesaplama alanı modeli: Tam model



Şekil 3. Hesaplama alanı modeli: Simetrik model

Şekil 3'te gösterilen hesaplama alanı modelinde alt yüzey (ABEF yüzeyi) kaymayan pürüzlü duvar (no-slip roughness Wall) olarak modellenmiştir ve sınır tabakası profili ile tutarlı olması için yüzey pürüzlülük yüksekliği 0,031m ve pürüzlülük sabiti 9,477 olarak tanımlanmıştır [3]. Üst (CDHG yüzeyi) ve yan (ACGE ve BFDH yüzeyleri) sınırlar simetri olarak tanımlanmıştır. Böylece, bu sınırların yakınındaki akış alanı genişletilmiş ve ağ iyileştirme ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır. Güneş panelleri yüzeyleri kaymayan pürüzsüz duvar (no-slip smooth Wall) olarak belirlenmiştir. Hava akışının giriş yaptığı sınır yüzeyi hız girişi ve çıkış yaptığı sınır yüzeyi basınç çıkışı olarak tanımlanmıştır. Hız giriş ve basınç çıkış sınır yüzeyleri rüzgârın hücum açısına göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin, Şekil 4'te gösterilen rüzgâr hücum açılarından 0° için giriş sınır yüzeyi ABCD yüzeyi ve çıkış sınır yüzeyi ise EFGH yüzeyi olarak tanımlanmaktadır. Hız giriş kısmında, 15 m/s ve 18 m/s olmak üzere iki farklı hız değerleri ele alınmıştır ve giriş türbülans modülü kısmında türbülans yoğunluğu ve yüzey

pürüzlülük uzunluğu yöntemi seçilmiştir. Mevcut güneş takip sistemi açık arazide bulunduğu için yüzey pürüzlülük uzunluğu 0,03 m seçilmiştir. Rüzgâr akışının açık arazide gerçekleşmesi ve rüzgâr şiddetinin düşük olmasından dolayı türbülans yoğunluğu % 1 seçilmiştir. Basınç çıkış kısmında, gösterge basıncı (gauge pressure) sıfır olarak girilmiştir ve çıkış türbülans modülü kısmında Ansys Fluent paket programındaki varsayılan değerler kullanılmıştır.



Şekil 4. Rüzgâr hücum açıları

2.2.2. Akış Modeli ve Çözüm Yöntemi

Akış türüne karar verebilmek için öncelikli olarak Reynolds sayısına bakılmalıdır. Reynolds sayısı aşağıdaki gibi bulunmaktadır;

$$Re = \frac{V_{ref} \rho C_L}{\mu} \quad (1)$$

Burada, V_{ref} akış referans hızını, ρ akışkanın yoğunluğunu, μ dinamik viskoziteyi ve C_L kord uzunluğunu belirtir. Güneş panellerinin yatay uzunluğu kord uzunluğu olarak tanımlanmıştır ve 1,987 m olarak belirlenmiştir. Ayrıca analiz esnasında akışkan olarak hava seçildiği için $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$ seçilmiştir. 15 m/s ve 18 m/s hızındaki akışlar için sırasıyla $2,04 \times 10^6$ ve $2,45 \times 10^6$ Reynolds sayıları elde edilmiştir. Bu yüzden akış türü için türbülans akış koşulları ele alınmıştır.

Türbülanslı akış koşulları için ortalama akış özelliklerini simüle etmek amacıyla SST (kesme gerilme aktarımı) k- ω modeli seçilmiştir. Bu türbülans modelin kullanımı ile ilgili detaylı incelemeler Menter ve diğerleri [8] tarafından yapılmıştır. Menter ve diğerleri tarafından oluşturulan SST k- ω modelinin türbülans kinetik enerji (k) ve birim zamandaki yutulma oranı (ω) için aktarım denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3)$$

Burada;

ρ : yoğunluğu,

G_k : türbülans kinetik enerji üretimini,

G_ω : üretilen birim zamandaki yutulma oranını,

Γ_k : türbülans kinetik enerjinin efektif difüzyonunu,

Γ_ω : birim zamandaki yutulma oranının efektif difüzyonunu,

Y_k : türbülans nedeniyle türbülans kinetik enerjinin yutulmasını,

Y_ω : türbülans nedeniyle birim zamandaki yutulma oranının yutulmasını,

D_ω : çapraz difüzyon terimini,

S_k ve S_ω : kaynak terimi ifade eder.

SST k- ω türbülans modeli için efektif difüzyonlar aşağıdaki gibidir;

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (4)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (5)$$

Burada, σ_k ve σ_ω sırasıyla k ve ω için türbülans Prandtl sayılarıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{k,2}}} \quad (6)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{\omega,2}}} \quad (7)$$

Denklem 4 ve 5'te geçen μ_t parametresi türbülans viskozitedir ve aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]} \quad (8)$$

Burada S şekil değiştirme hız büyüklüğünü göstermektedir. F_1 ve F_2 ise karışım fonksiyonlarıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (9)$$

$$\Phi_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2}\right] \quad (10)$$

$$D_\omega^+ = \max\left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10}\right] \quad (11)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (12)$$

$$\Phi_2 = \max\left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right] \quad (13)$$

Burada, y bir sonraki yüzeye olan uzaklığı ve D_ω^+ çapraz difüzyon teriminin pozitif kısmını gösterir. Denklem 8'de belirtilen α^* katsayısı türbülans viskozitesini azaltır ve düşük Reynold sayısı düzeltilmesine sebep olmaktadır. Yüksek Reynold sayılarında ise $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$ olarak kabul edilir.

G_k ve G_ω terimleri ise sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (14)$$

$$G_\omega = \frac{\alpha_\infty}{\nu_t} G_k \quad (15)$$

Denklem 15'teki α_∞ terimi $\alpha_\infty = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1-F_1) \alpha_{\infty,2}$ ifadesi ile belirlenir ve $\alpha_{\infty,1}$ ile $\alpha_{\infty,2}$ aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{K^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (16)$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{K^2}{\sigma_{\omega,2}\sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (17)$$

Burada K katsayısı 0.41'dir.

Akış analizlerinde denklemleri çözmek için gerekli olan parametreler aşağıdaki gibi belirlenmiştir [9];

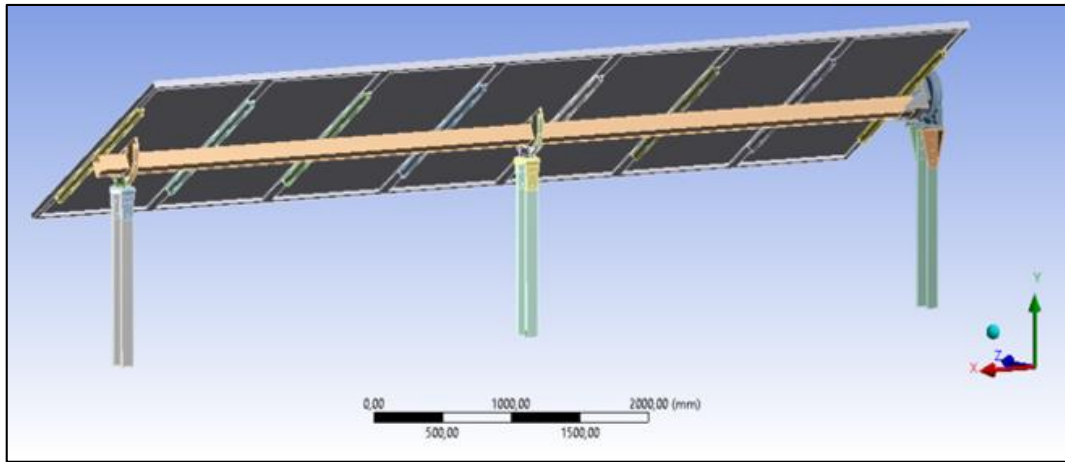
$$\sigma_{k,1} = 1.176, \sigma_{k,2} = 1, \sigma_{\omega,1} = 2, \sigma_{\omega,2} = 1.168, a_1 = 0.31, \beta_{i,1} = 0.075, \beta_{i,2} = 0.0828,$$

$$\beta_{\infty}^* = 0.09, \alpha_{\infty}^* = 1 \text{ ve } \alpha_{\infty} = 0.52.$$

Çözüm işlemlerini iki kez kontrol etmek amacıyla çift hassasiyet (double precision) seçeneği seçilmiştir. Çözücü olarak basınç temelli algoritmadan yararlanılmıştır ve hız formülasyonu mutlak olarak seçilmiştir. Çözüm metodu olarak korunum denklemlerini aynı anda çözen basınç-hız birleşik şeması tercih edilmiştir. Tüm genelleştirilmiş artıklar için 10^{-6} yakınsama toleransı kullanılmıştır. Momentum denklemleri, nümerik difüzyon hatalarını en az düzeye indirmek amacıyla ikinci dereceden interpolasyon şeması ile ayrıklaştırılmıştır.

2.3. Güneş Takip Sisteminin Sonlu Elemanlar Yöntemi Yaklaşımı

Bölüm 2.1, Şekil 1'de gösterilen prototip modelin sonlu elemanlar modeli, yapısal analiz esnasında fazla ağ eleman sayısından kaçınarak çözüm süresini azaltmak amacıyla basitleştirilmiştir. Bu kapsamda, parçalar üzerindeki pahlar ihmal edilmiştir ve yuvalar delik olarak değiştirilmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar modelinin yapısal analizi simetrik olarak çözdürülmüştür. Güneş takip sisteminin sonlu elemanlar modeli Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Güneş takip sisteminin sonlu elemanlar modeli

Yapısal analiz öncesinde, ilk olarak sonlu elemanlar modelindeki parçalara malzeme atanması yapılmalıdır. Atanan malzemeler ve özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzemeler ve özellikleri

| Malzeme | Elastisite Modülü (GPa) | Poisson Oranı | Akma Gerilmesi (MPa) | Yoğunluk (kg/m ³) |
|----------------|-------------------------|---------------|----------------------|-------------------------------|
| Solar cam | 70 | 0,22 | - | 2500 |
| A6063-T6 | 68,9 | 0,33 | 214 | 2700 |
| Delrin (POM) | 3 | 0,44 | 64 | 1410 |
| St-37 (S235JR) | 210 | 0,28 | 235 | 7800 |
| St-52 (S355JR) | 210 | 0,28 | 355 | 7800 |

Yapısal analiz için oluşturulan sonlu elemanlar modelinin ağ ile kaplanmasında Ansys Static Structue paket programı içindeki ağ (mesh) kısmından yararlanılmıştır. Genel ağ ayarlarından güneş takip sistemini oluşturan yapıların tümüne aynı bölümlenme oranı (mesh size) verilmesi durumunda kalitesiz ağ elemanları oluştuğu belirlenmiştir. Bu yüzden tüm parçalarda nesne boyutlandırma (body sizing) ile bölgesel ağ oluşturulmuş ve farklı bölümlenme oranları ile ağ iyileştirilmesi yapılmıştır. Ağdan bağımsız çözümler elde edebilmek için her bir

parçada bölümlenme oranları sırasıyla küçültülerek, belirli bir yük altındaki güneş takip sistemin üzerinde meydana gelen maksimum gerilim değerlerindeki değişiklikler incelenmiştir. Gerilim değerlerindeki farkın %1'e inmesi ile bölümlenme oranları optimize edilmiştir. Bu kapsamda motor ve rulman takımı parçaları dışındaki tüm parçalar hexahedral eleman türü ile ağlanmıştır. Motor ve rulman takımı parçaları ise daha karmaşık yapılardan oluştukları için tetrahedral eleman türü ile ağlanmıştır. Optimize edilmiş bölümlenme oranları ise sırasıyla güneş panelleri için 40 mm, güneş panelinin altındaki destek yapısı için 10 mm, kare kesitli ana taşıyıcı karkas için 25 mm, rulman takımları ve braketter için 5 mm, kolonlar için 20 mm olarak alınmıştır. Tüm simülasyon durumları için yaklaşık olarak toplamda 1,050,00 düğüm noktası ve 510,000 eleman çözüm ağının kullanıldığı sonlu elemanlar modelindeki ağ elemanlarının kalite kontrolü çarpıklık (skewness) faktörü ile incelenmiştir. Oluşturulan çözüm ağları bozuk elemanlar yönünden incelendiğinde maksimum çarpıklık faktörü 0,81 olarak görülmüştür.

Güneş takip sistemini oluşturan parçaların birbiriyle olan temas yüzeylerinde uyumsuz ağ oluşması durumunda gerçek olmayan yüksek gerilimler meydana gelebilmektedir. Bu yüzden temas yüzeyleri arasında kontaklar (contacts) oluşturulmuştur. Birbiri ile kaynaklı olan parçaların temas yüzeyleri arasında tüm serbestlik derecesini kısıtlamak amacıyla kontak türü olarak "bonded" seçilmiştir. Cıvata ile birbirine bağlı olan parçaların temas yüzeyleri arasında ise kontak türü olarak "no separation" seçilmiştir.

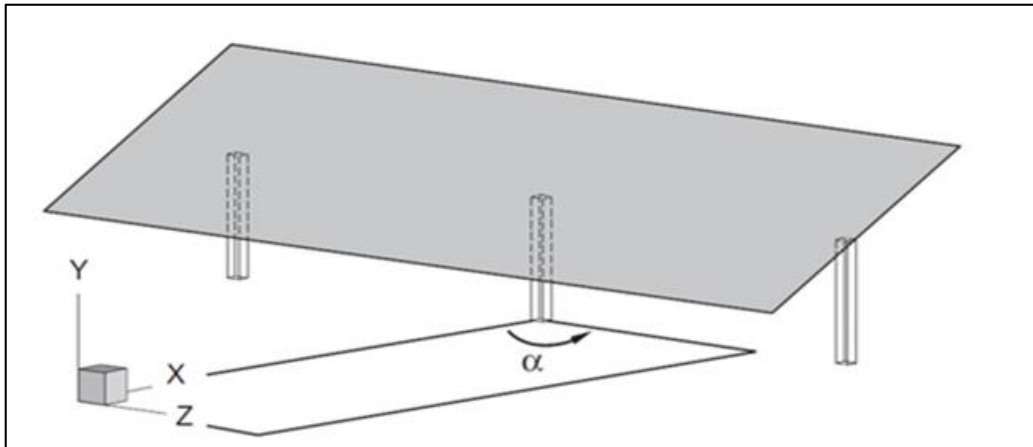
Sonlu elemanlar modelinde bilinmeyen sayısının azaltılması ve çözümleme süresinin en aza indirilmesi için sınır şartlarının tam olarak tanımlanması gerekmektedir [10]. Kolonların alt yüzeyleri sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Böylece güneş takip sisteminin temel destek yapısını oluşturan kolonların zemine göre öteleme (U_x, U_y, U_z) ve dönme hareketleri (Rot_x, Rot_y, Rot_z) kısıtlanmıştır ve güneş takip sistemi statik, sabit pozisyonda gibi düşünülmüştür. Akış analizi sonucunda güneş panelleri yüzeyi üzerinde elde edilen basınç dağılımları, Ansys akışkan-yapı etkileşimi paket programı kullanılarak sonlu elemanlar modeline aktarılmıştır ve güneş takip sistemine etki eden yük olarak tanımlanmıştır.

Güneş takip sisteminde oluşan gerilim değerlerini belirlemek amacıyla von-mises kriterinden yararlanılmıştır. Bu kriterde, malzemeye uygulanan çok eksenli gerilmeler eşdeğer bir tek gerilme ($\sigma_{eş}$) ile değerlendirilir ve uygulanan yükleme sonucunda elde edilen maksimum eşdeğer gerilme değeri malzemenin akma gerilmesinin üstünde bir değer ise malzeme kalıcı olarak şekil değiştirmiş demektir [10]. Von-mises kriterinde uygulanan eşdeğer gerilme denklemi ise aşağıdaki gibidir;

$$\sigma_{eş} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right]} \quad (18)$$

3. DOĞRULAMA ÇALIŞMASI

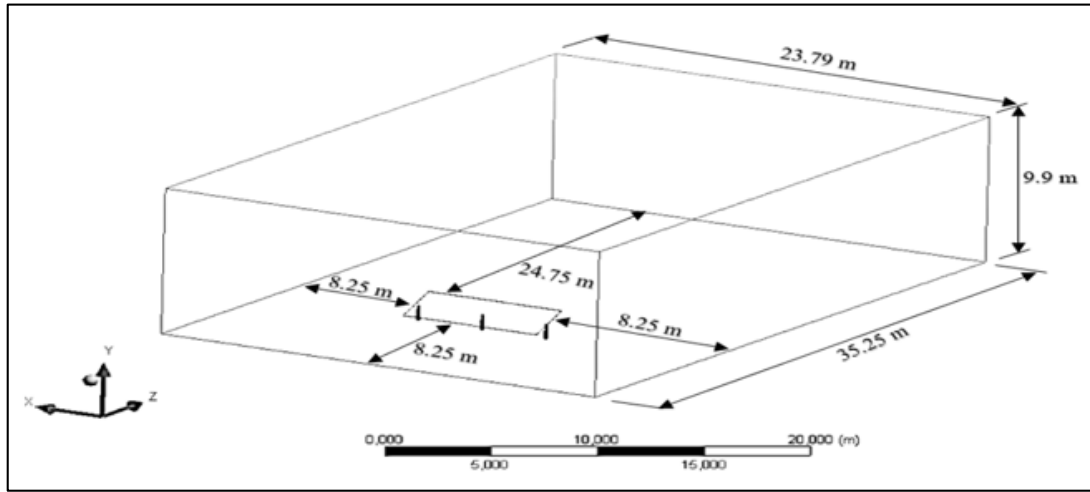
Mevcut çalışmanın sayısal analiz sonuçlarına geçmeden önce önceki bölümlerde sunulan sayısal modelleme ve analiz araçlarının literatürdeki mevcut verilerle doğrulanması gerekmektedir. Bu amaçla 2014 yılında Jubayer ve Hangan [3] tarafından yapılan sayısal analiz çalışmaları dikkate alınmıştır. Jubayer 'in nümerik çalışmaları sonucunda elde etmiş olduğu direnç katsayıları (C_d) ve kaldırma katsayıları (C_L), bu çalışmada sunulan sayısal analiz yöntemleri ile bulunan katsayı değerleri ile karşılaştırılacaktır.



Şekil 6. Doğrulama çalışması: Geometrik model [3]

Jubayer, zemine monteli güneş panellerinin üzerindeki rüzgâr yüklerini incelemek amacıyla 26 m/s rüzgâr hızını ele alarak nümerik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Jubayer ve Hangan çalışmalarında ele aldığı güneş panelleri, yatayda 4 ve dikeyde 6 panel dizilimine sahip olmak üzere toplamda 24 panelden oluşmaktadır. Güneş panellerinin eğim açısı 25° olacak şekilde sabitlenmiştir. Güneş panelleri toplamda 2,48 m x 7,29 m boyutlarındadır ve güneş panellerinin en tepe noktasından zemine olan mesafe 1,65 m'dir. Toplam 7,29 m genişliğindeki güneş panellerinin altına eşit aralıklarla 3 tane destek kolunu yerleştirilmiştir.

Jubayer nümerik analizlerini 5 farklı rüzgâr hücum açısına göre gerçekleştirmiştir. Rüzgâr hücum açıları 0° ile 180° arasında olup 45° aralıklarla değişmektedir. Çalışmasında kullanmış olduğu sayısal geometrinin ve rüzgâr hücum açısının temsili gösterimi Şekil 6'da verilmiştir. Jubayer 'in çalışmasında oluşturduğu örnek geometri doğrudan alınmıştır ve Bölüm 2'de sunulan sayısal model ve analiz araçları ile nümerik analizi yapılarak doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Doğrulama çalışması için oluşturulan hesaplama alanı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Doğrulama çalışması: Hesaplama alanı modeli

Mevcut çalışmada gerçekleştirilen nümerik analizler sonucunda elde edilen direnç ve kaldırma katsayı değerleri maksimum %7,6 hata oranıyla literatürde sunulan sonuçlara yaklaşmıştır (Tablo 2). Bu durum, oluşturulan hesaplama alanının gerçeğe uygun olduğunu, oluşturulan ağ yapısının çözümde doğru yakınsama sağladığını ve kullanılan sayısal çözüm yönteminin doğruluğunu göstermektedir. Bu yüzden, Bölüm 2'de sunulan sayısal metodoloji parametrik sayısal analiz çalışmalarında kullanılabilir.

Tablo 2. Sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

| | 0° Rüzgâr hücum açısı | | 180° Rüzgâr hücum açısı | |
|--------------------------|-----------------------|--------|-------------------------|--------|
| | C_d | C_L | C_d | C_L |
| Jubayer ve Hangan | 0,57 | -1,24 | 0,66 | 1,45 |
| Mevcut Çalışma | 0,55 | -1,18 | 0,62 | 1,34 |
| Hata Oranı | - %3,5 | - %4,8 | - %6,0 | - %7,6 |

4. BULGULAR

Bu bölümde, güneş panellerinin eğim açısı, rüzgârın hücum açısı ve şiddeti, kolonların zeminden olan yüksekliği değişken parametreler olarak ele alınmış, Bölüm 2.2 ve 2.3'te sunulan hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve sonlu elemanlar yöntemi metodolojilerini kullanarak parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizlerde kullanılan değişken parametreler aşağıdaki gibidir;

Güneş panellerinin eğim açısı (α_p): 15°, 30°, 45° ve 60°

Rüzgâr şiddeti (V_{ref}): 15 m/s ve 18 m/s

Rüzgâr hücum açısı (α_r): 0° ve 180°

Kolonların zemine olan yüksekliği (H_k) : 1,1m ve 1,3m.

Yukarıdaki değişken parametreler dikkate alındığında 32 farklı durum için parametrik analiz yapılmalıdır. 0° ve 180° rüzgâr hücum açısına maruz kalan güneş takip sistemi için farklı simülasyon durumları sırasıyla Tablo 3 ve 4'te gösterilmiştir.

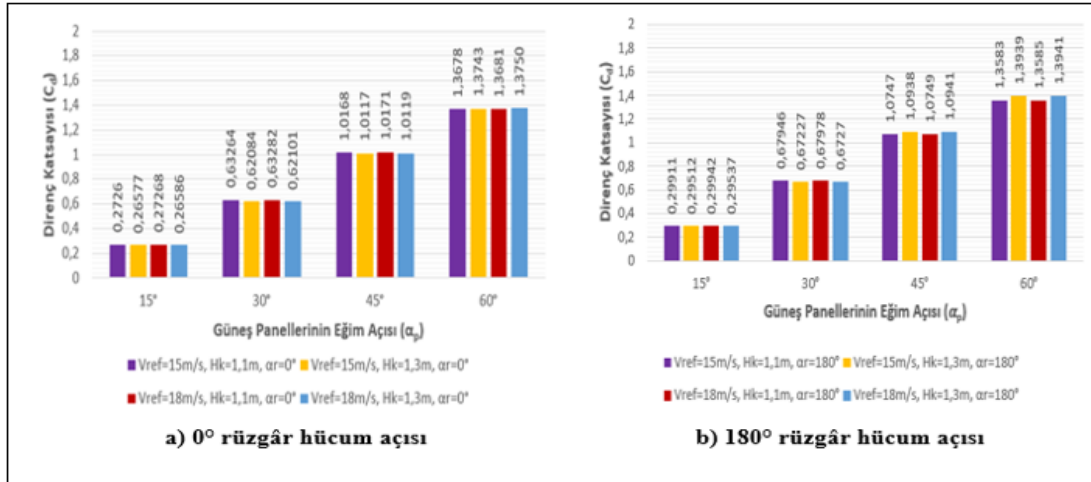
Tablo 3. 0° rüzgâr hücum açısına göre simülasyon durumları

| Rüzgâr Şiddeti (V_{ref}) | Kolon Zemin Yüksekliği (H_k) | Güneş Panellerinin Eğim Açısı, (α_p) | | | |
|------------------------------|----------------------------------|---|------------|------------|------------|
| | | 15° | 30° | 45° | 60° |
| 15 m/s | 1,1 m | 1. Durum | 2. Durum | 3. Durum | 4. Durum |
| 15 m/s | 1,3 m | 5. Durum | 6. Durum | 7. Durum | 8. Durum |
| 18 m/s | 1,1 m | 9. Durum | 10. Durum | 11. Durum | 12. Durum |
| 18 m/s | 1,3 m | 13. Durum | 14. Durum | 15. Durum | 16. Durum |

Tablo 4. 180° rüzgâr hücum açısına göre simülasyon durumları

| Rüzgâr Şiddeti (V_{ref}) | Kolon Zemin Yüksekliği (H_k) | Güneş Panellerinin Eğim Açısı, (α_p) | | | |
|------------------------------|----------------------------------|---|------------|------------|------------|
| | | 15° | 30° | 45° | 60° |
| 15 m/s | 1,1 m | 17. Durum | 18. Durum | 19. Durum | 20. Durum |
| 15 m/s | 1,3 m | 21. Durum | 22. Durum | 23. Durum | 24. Durum |
| 18 m/s | 1,1 m | 25. Durum | 26. Durum | 27. Durum | 28. Durum |
| 18 m/s | 1,3 m | 29. Durum | 30. Durum | 31. Durum | 32. Durum |

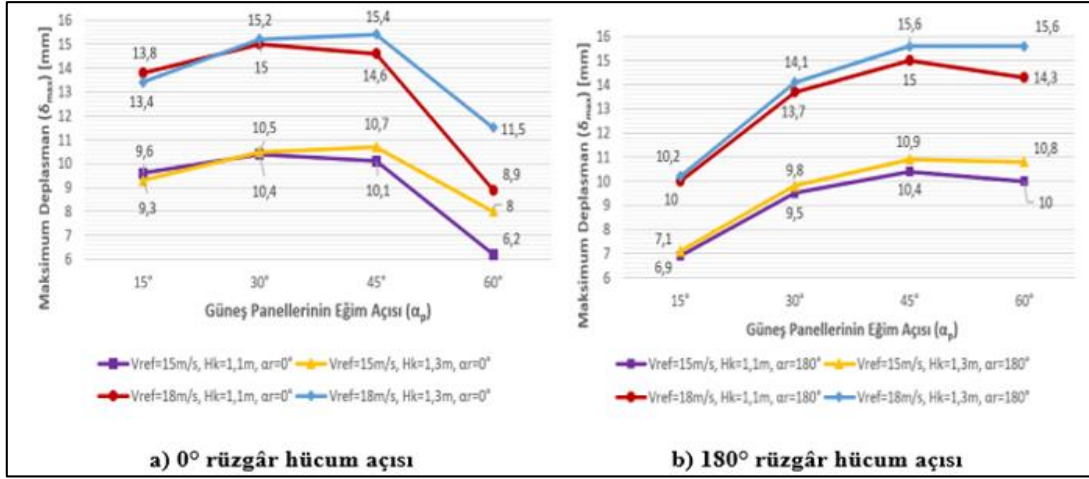
Direnç katsayı değerleri tüm simülasyon durumları için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen değerler 0° ve 180° rüzgâr hücum açısı için Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Direnç katsayı değerleri

0° rüzgâr hücum açısına göre maksimum direnç katsayısı değerinin 1,3750 olduğu ve 16. Durum için olduğu görülmüştür. Minimum direnç katsayısı değerinin ise 0,26577 olduğu ve 5. Durum için olduğu görülmüştür. 180° rüzgâr hücum açısına göre maksimum direnç katsayısı değerinin 1,3941 olduğu ve 32. Durum için olduğu görülmüştür. Minimum direnç katsayısı değerinin ise 0,29512 olduğu ve 21. Durum için olduğu görülmüştür. 180° rüzgâr hücum açısı ile elde edilen direnç katsayısı değerleri 0° rüzgâr hücum açısı ile elde edilen değerlere göre daha yüksektir. Yani, 180° rüzgâr hücum açısı ile esen hava direnç katsayısı olarak daha kritiktir. Tüm simülasyon durumları için sonuçlara bakıldığında güneş panellerinin eğim açısının artmasıyla direnç katsayısının belirgin bir şekilde arttığı, rüzgâr şiddetinin ise 15 m/s'den 18 m/s'ye çıkması ile direnç katsayısında neredeyse değişme olmadığı görülmüştür.

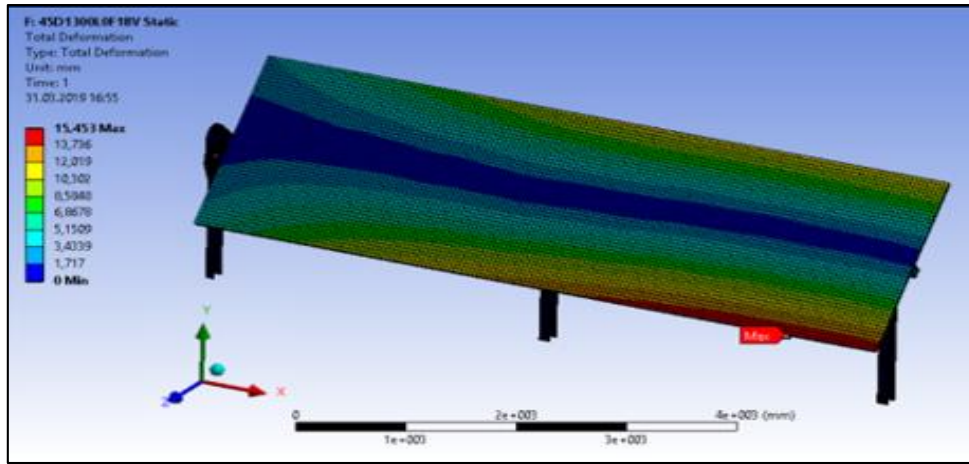
Maksimum deplasman değerleri sonlu elemanlar analizi ile tüm simülasyon durumları için elde edilmiştir. Elde edilen değerler 0° ve 180° rüzgâr hücum açısı için Şekil 9'da gösterilmiştir.



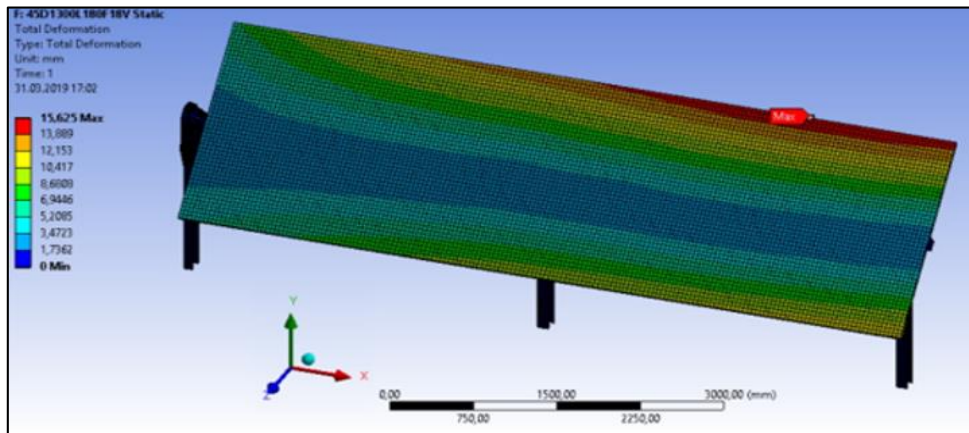
Şekil 9. Maksimum deplasman değerleri

0° rüzgâr hücum açısına göre maksimum deplasman değerinin 15,4 mm olduğu ve 15. Durum için olduğu görülmüştür. 180° rüzgâr hücum açısına göre maksimum deplasman değerinin 15,6 mm olduğu ve 31 ile 32. Durumlar için olduğu görülmüştür. Rüzgâr şiddeti ve kolon yüksekliğinin artmasıyla maksimum deplasman değerlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir.

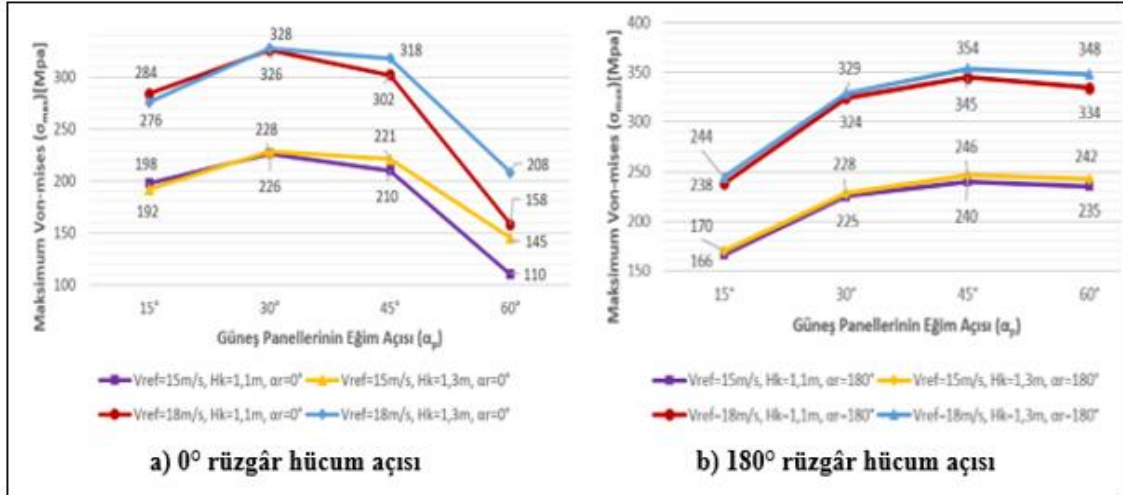
Ayrıca maksimum yer değiştirmenin tüm durumlar için güneş panelleri üzerinde olduğu belirlenmiştir ve rüzgârın hücum açısına göre (0° ve 180°) güneş takip sistemindeki deplasman haritası sırasıyla Şekil 10 ve 11'de gösterilmiştir. 0° rüzgâr hücum açısı için maksimum yer değiştirme güneş panelinin alt kısmının köşe kısmında (Şekil 10) ve 180° rüzgâr hücum açısı için maksimum yer değiştirme güneş panelinin üst kısmının köşe kısmında olduğu görülmüştür (Şekil 11).



Şekil 10. 0° rüzgâr hücum açısı için güneş takip sisteminin deplasman haritası



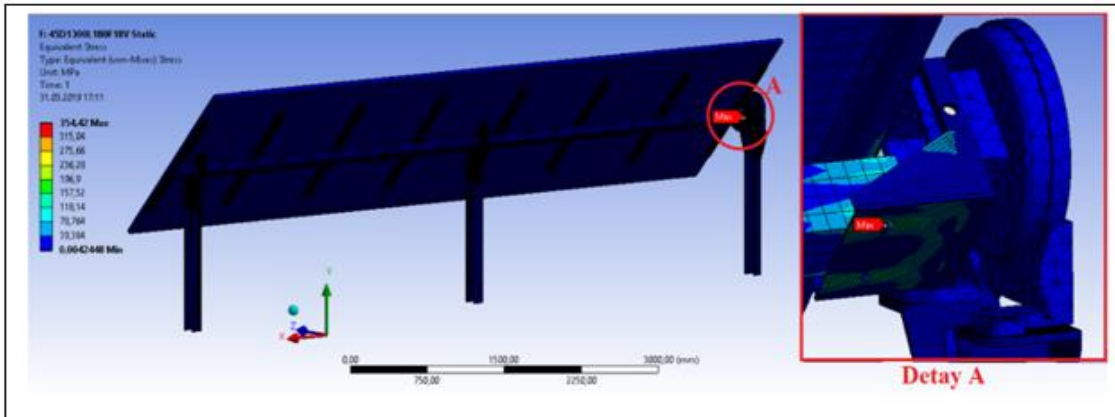
Şekil 11. 180° rüzgâr hücum açısı için güneş takip sisteminin deplasman haritası



Şekil 12. Maksimum von-mises gerilim değerleri

Yapı üzerinde oluşan von-mises gerilim değerleri sonlu elemanlar analizi ile tüm simülasyon durumları için elde edilmiştir. Elde edilen değerler 0° ve 180° rüzgâr hücum açısı için Şekil 12’de gösterilmiştir. 0° rüzgâr hücum açısına göre maksimum von-mises gerilim değerinin 328 MPa olduğu ve 14. Durum için olduğu görülmüştür. 180° rüzgâr hücum açısına göre maksimum von-mises gerilim değerinin 354 MPa olduğu ve 31. Durum için olduğu görülmüştür. Rüzgâr şiddeti ve kolon yüksekliğinin artmasıyla maksimum von-mises gerilim değerlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir.

Ayrıca tüm simülasyon durumları için maksimum von-mises gerilme değerinin motor rulman takımı parçasının üzerinde olduğu belirlenmiştir (Şekil 13, A Bölgesi). Motor rulman takımı parçasının malzemesi St-52 kalite çeliktir ve akma sınır değeri 355 MPa’dır (Tablo 1). Dolayısıyla, 31. durum için motor rulman takımında elde edilen gerilim değeri akma sınır değerine ulaştığı için parçada hasar oluşabileceği belirlenmiştir.



Şekil 13. Güneş takip sisteminin von-mises gerilim değerleri

5. SONUÇLAR

Güneş takip sisteminin her durum altında sorunsuz bir şekilde çalışmasını sağlayarak enerji üretiminin beklenen seviyede tutulabilmesi için metal taşıyıcı sistemlerinin yeterince mukavemetli olması gerekir. Bu yüzden rüzgâr yükü altında çalışacak olan güneş takip sistemlerinin akış ve yapısal analizlerinin yapılması oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, atmosferik ortama yerleştirilen bir güneş takip sistemini oluşturan metal taşıyıcıların ve güneş panellerinin farklı konfigürasyonlardaki rüzgâr yükleri altında davranışları incelenmiştir. Güneş panelleri üzerindeki akışı temsil etmek için üç boyutlu, sıkıştırılmaz ve daimi akış seçilmiştir ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları sonlu hacimler metodunu esas alan Ansys Fluent paket programı ile SST k- ω türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Akış analizi sonucunda güneş panelleri yüzeyi üzerinde elde edilen basınç dağılımları, Ansys akışkan-yapı etkileşimi paket programı kullanılarak sonlu elemanlar modeline

aktarılmıştır ve güneş takip sistemine etki eden yük olarak tanımlanmıştır. Bu yükler altındaki güneş takip sisteminin sonlu elemanlar simülasyonları von-mises kriterini esas alan Ansys Structure paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan çalışma esas alınarak mevcut çalışmadaki metotların kullanılabilirliği %7,6 hata oranı ile desteklenmiştir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve sonlu elemanlar analizleri sonucunda, direnç katsayısı değerlerini etkileyen en önemli parametrenin güneş panellerinin eğim açısı olduğu ve artmasıyla birlikte direnç katsayısında belirgin artışların olduğu belirlenmiştir. Maksimum deplasman ve gerilim değerleri için ise kolonun zeminden olan yüksekliği ve rüzgâr şiddeti parametrelerinin önemli bir kriter olduğu ve artışlarıyla birlikte maksimum deplasman ve gerilme değerlerinde belirgin artışların olduğu belirlenmiştir.

15 m/s rüzgâr hızında güneş takip sisteminde von-mises kriterine göre herhangi bir hasar oluşmadığı fakat 18 m/s rüzgâr hızına çıktığında motor rulman takımı parçasındaki gerilim değerinin malzeme akma sınırına ulaştığı ve kalıcı deformasyonların meydana gelebileceği saptanmıştır. Güneş takip sistemini oluşturan diğer parçalarda ise tüm simülasyon konfigürasyonları için oluşan gerilim değerlerinin malzeme akma dayanımına göre oldukça düşüktür ve herhangi bir kalıcı deformasyon meydana gelmemiştir. Rüzgâr hızının daha da artması durumunda güneş takip sisteminin sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi için motor rulman parçasının güçlendirilmesi gerekmektedir.

Kaynakça

- [1] TS498, “Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri,” (İkinci Baskı). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1997.
- [2] G. T. Bitsumlak, A. K. Dagnev, and J. Erwin, “Evaluation of Wind Loads on Solar Panel Modules Using CFD,” in *2010 The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering*, 2010, pp. 23–27.
- [3] C. M. Jubayer, and H. Hangan, “Numerical Simulation of Wind Effects on a Stand-Alone Ground Mounted Photovoltaic (PV) System,” in *2014 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynaöics*, 2014, vol. 134, pp. 56–64.
- [4] C. K. Lin, C. Y. Dai, and J. C. Wu, “Analysis of Structural Deformation and Deformation-Induced Solar Radiation Misalignment in a Tracking Photovoltaic System Numerical Simulation of Wind Effects on a Stand-Alone Ground Mounted Photovoltaic (PV) System,” in *2013 Journal of Renewable Energy*, 2013, vol. 59, pp. 65–74.
- [5] H. Li, D. Zhang, Z. Qin, L. Li, and E. Zhang, “Analysis of Deformation and Strength of Solar Module Support Under Wind-Wave Load,” in *2015 International Conference on Manufacturing Science and Engineering*.
- [6] Ch. Khelifi, and F. Ferroudji, “Stress and Fatigue Analyses Under Wind Loading of the Dual Axis Sun Tracking System via Finite Element Analysis,” in *2016 Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2016, vol. 10(2), pp. 2008–2015.
- [7] J. Franke, A. Hellsten, H. Schlunzen, and B. Carissimo, “Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment,” Qual. Assur. Improv. Microscale Meteor Models Cost Action 732, May. 2007.
- [8] F. Menter, “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications,” in *1994 Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1994, vol. 32(8), pp. 1598–1605.
- [9] ANSYS Inc., “ANSYS Fluent Theory Guide,” (15th Ed.). 2013.
- [10] I. Ovalı, ve C. Esen, “Von-Mises Kriteri,” *Ansys Workbench*, Kodlab Yayınevi, 2017, pp. 46.