

Yüksek Binalarda Rüzgar Etkilerinin Rüzgar Tüneli Deneyleriyle Tespiti

Özgür KURÇ*
Bengi KAYIŞOĞLU**
S. M. Nima SHOJAE***
Oğuz UZOL****

ÖZ

Günümüzde ülkemizdeki yüksek bina inşaatlarında belirgin bir artış göze çarpmaktadır. Binalarda yükseklik arttıkça rüzgar etkileri de önemini arttırmaktadır. Rüzgar esnek binalarla etkileşime girebilmekte, gerek rüzgar kuvvetlerini gerekse rüzgar kaynaklı bina salınımlarını ciddi miktarda artırabilmektedir. Rüzgar tüneli deneyleri binalardaki rüzgar etkilerinin belirlenmesi için sıkça başvurulan bir yöntemdir. Ancak başarılı bir deney gerçekleştirmek için tünel içi akış koşullarının gerçeğe oldukça yakın oluşturulması gerekmektedir. Türkiye’de ilk defa gerçekleştirilen bu çalışmada kısa test kesitine sahip Ankara Rüzgar Tüneli’nde yönetmeliklerle tanımlanan rüzgar hız profiline oluşturulması için yüzey pürüz elemanları tasarlanmış ve bu elemanların başarımları sayısal ve deneysel olarak sınanmıştır. Daha sonra yüksek frekanslı taban balansı yöntemi kullanılarak dikdörtgen kesitli yüksek bina modeli üzerindeki rüzgar etkileri incelenmiş, türbülans yoğunluğu, periyodik girdap etkisi ve rüzgar vuruş açısının rüzgar yüklerini nasıl değiştirdiği sorgulanmıştır. Son olarak deney sonucu hesaplanan taban momentleri çeşitli rüzgar yönetmelikleri sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar, yüksek bina, rüzgar tüneli testi, rüzgar yükleri

ABSTRACT

Investigation of Wind Effects on Tall Buildings through Wind Tunnel Testing

There has been significant increase in tall building construction in Turkey in the last decade. As the height of building increase, wind effects become more pronounced. Wind can interact with flexible buildings and can significantly magnify the wind loads and wind

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 02.03.2011 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2012 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - kurc@metu.edu.tr

** Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - bengikayisoglu@gmail.com

*** Islamic Azad University, Science and Research Branch, Aerospace Engineering, Tahrán, İran - nimashojae@gmail.com

**** Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Müh. Bölümü, Ankara - uzol@metu.edu.tr

induced oscillations. Wind tunnel tests have been widely utilized for estimating the wind effects on buildings. In order to perform a successful test, however, flow conditions inside the tunnel must represent the actual conditions rather closely. In this study, passive devices were designed to create wind profiles defined in wind codes inside Ankara Wind Tunnel that has a short test section. The performance of the designed passive devices was investigated through numerical and experimental studies. Then, wind effects on a rectangular shaped building were examined with high frequency base balance technique. The effect of turbulence intensity, vortex shedding and wind attack angle on wind loads were questioned. Finally base moments calculated from test results were compared with the results of various wind codes.

Keywords: Wind, tall buildings, wind tunnel testing, wind loads

1. GİRİŞ

Yüksek yapılar 20 yy. başlarından bu yana inşa edilmekte olup bu tip yapıların tasarımıyla ilgili bilgi ve tecrübe gün geçtikçe artmaktadır. Bugün dünyanın birçok bölgesinde kat sayısı yüzün üzerinde birçok yüksek yapı bulunmaktadır. Günümüzün inşaat teknolojisiyle 800m ve üzeri gökdelenler inşa edilebilmektedir. Her ne kadar bu derece yüksekliğe sahip binalar dünya üzerinde fazla sayıda bulunmuyor olsa da kat yükseklikleri 30-90 arasında değişen yüksek binalar, özellikle nüfusun çok yoğun, arsa fiyatlarının aşırı pahalı olduğu bölgelerde yoğun bir şekilde inşa edilmektedir. Ülkemizde de son zamanlarda yüksek bina inşaatında belirgin bir artış olmuştur. Özellikle çeşitli büyük şehirlerimizde yükseklikleri 100 metrenin üzerinde olan birçok bina bulunmaktadır. İstanbul'da bulunan bazı binaların yükseklikleri 200 metreyi aşmış, hatta Türkiye'nin en yüksek binası (236 metre) yapılan bir tanıtım toplantısıyla tüm ülkeye tanıtılmıştır.

Bina yüksekliği arttıkça binalar üzerindeki rüzgar etkisi de önemini arttırmaktadır. Özellikle doğal salınım periyodu 1 saniyenin üzerindeki binalar rüzgarla etkileşime girebilmekte ve rüzgar kaynaklı salınımların etkisi hissedilebilir bir hale gelebilmektedir. Genel olarak, bu tip esnek yapıların tasarımında rüzgar etkileri üç başlıkta incelenir. Konfor kriterleri diye adlandırabileceğimiz ilk başlık bina üst kat ivmelerinin belirli sınır değerlerin altında tutulmasını içerir. İkinci başlık ise rüzgardan dolayı binaya etkileyen dinamik kuvvetlerin ya eşdeğer statik yükler olarak ya da zaman alanında tanımlı değişken yükler olarak doğru ve rüzgarın rastgele davranışını da göz önünde bulunduran bir şekilde ifade edilmesi zorunluluğudur. Buna ek olarak son 20 yılda yapılan araştırmalar binaların rüzgar yönüne dik doğrultuda ve burulma salınımlarının da rüzgarla aynı yöndeki salınımlar kadar önemli olduğunu göstermiştir. Diğer bir deyişle gerek ivme ve deplasman hesabında, gerekse eşdeğer yük hesabında rüzgarın hızının ve yönünün değişkenliği, yapının geometrisi, dinamik davranış ve çevre yapıların etkilerinin de göz önünde bulundurulması bir zorunluluktur. Son olarak, bina dış yüzey kaplamalarının tasarımında bina yüzeyinde oluşabilecek basınç ve emme miktarlarının da bilinmesi gerekmektedir. Kaplama tasarımı için kullanılan basınç değerlerinin hesabı, eşdeğer yük hesabındaki basınç hesabından farklıdır çünkü dış kaplama tasarımında belirli bir alandaki ortalama basınç değerleri yerine türbülans etkilerini de göz önünde bulundurularak lokal anlık değerlerin tespit edilerek kullanılması gerekmektedir. Bu değerleri elde etmenin günümüzde kabul görmüş yollarından bir tanesi rüzgar tüneli testleridir.

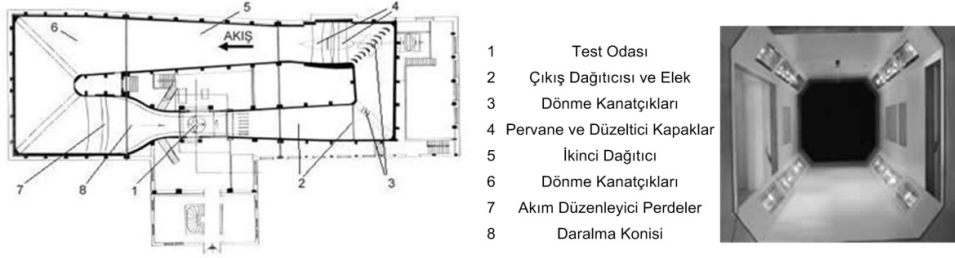
Günümüz bina yönetmelikleri (ASCE 7-05[2], EC1[6]) yukarıda üç başlıkta özetlenen rüzgar etkilerinin hesabı için çeşitli yöntemler önermektedirler. Ancak bu yöntemlerin sadece dikdörtgen, silindir gibi bilinen şekildeki binalar için kullanılmasına izin verilmekte ve ayrıca binanın çevre yapılarla olan etkileşimi göz ardı edilmektedir. Bir diğer dikkat edilmesi gereken önemli nokta ise yönetmeliklerdeki yöntemlerin 200m yüksekliğin altındaki binalar için geçerli olduğudur [2,6,9]. Binaların farklı geometrilere sahip olduğu veya çevresinde etkileşime girebileceği başka yapıların bulunduğu ya da yüksekliğinin fazla olduğu durumlarda ise rüzgar etkilerinin rüzgar tüneli testleriyle tespiti yine bu yönetmelikler tarafından getirilen ayrı bir zorunluluktur.

Ülkemizde ise yapılardaki rüzgar etkileri TS 498 Yük Yönetmeliği'ne [22] göre hesaplanmaktadır. Bu yönetmeliğin rüzgar yükleriyle ilgili kısmı, yazarların takip edebildiği kadarıyla 36 yıldır hiç değiştirilmemiş, DIN 1055'in 1972 yılındaki sürümünden alınan kısımlar hala kullanılmaya devam edilmektedir. TS 498'de sadece rüzgar kaynaklı tek yönde eşdeğer statik yük hesabına değinilmiş ve çok yüzeysel bir şekilde yüzey basınç hesabından bahsedilmiştir. Yüksek bina tasarımı açısından TS 498'in rüzgar etkileriyle ilgili bölümün yetersizliği İstanbul Belediye'si için hazırlanan "Yüksek Binalar için Rüzgar Yönetmeliği [9]" ile büyük ölçüde giderilmiş görünmektedir. Ancak bu yönetmelik de farklı geometrilere sahip veya daha hassas hesap gerektiren yükseklikteki ve önemdeki binalar için rüzgar tüneli testlerinin yapılmasını önermektedir.

Türkiye'de binalar için rüzgar tüneli testlerinin yapılması için uygun olan atmosferik sınır tabakasını oluşturabilecek uzun test kesitine sahip tek rüzgar tünelinin 2012 yılı içerisinde ODTÜ – Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM) bünyesinde kurulması planlanmıştır. Ancak günümüzde bu tip testlerin yapılması için uygun olan tek yer TÜBİTAK-SAGE'ye bağlı Ankara Rüzgar Tüneli'dir (Şekil 1). Ankara Rüzgar Tüneli (ART) yatay kapalı devre bir rüzgar tüneli olup sahip olduğu 750 kW'lık elektrik motorunun çevirdiği eksenel fan sayesinde 6.1 m uzunluğundaki 3.05 m x 2.44 m boyutlarındaki deney odasında 90m/sn'lik bir akış hızına çıkabilmektedir. ART'nin deney odası boyutları bina testleri için yeterli olsa da 6 m'lik bir kesit uzunluğu atmosferik sınır tabakasının oluşturulabilmesi için yetersiz kalmaktadır. Bu tip tünellerde sınır tabakası oluşturulabilmesi kesit girişine yüzey pürüzleri eklenerek mümkün olabilmektedir [17]. Yüzey pürüzlerini çeşitli şekillerde tasarlamak mümkündür ancak en sık kullanılanları örgü sistemleri (grid), bariyerler, çitler (fence), üçgen plakalar (spire) ve yüzey küp elemanlarıdır. Deney odası içerisinde istenen hız profilini ve türbülans yoğunluğunu bu tip yüzey pürüz elemanları kullanılarak elde etmek çok hassas ve dikkatli bir tasarım süreci içerir. Geçmişte bu konuda çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Cermak [3], Cook [4], Irwin [8], Counihan [13]).

Günümüzde rüzgar kaynaklı eşdeğer kuvvetlerin bulunması amacıyla üç çeşit rüzgar tüneli testi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerden ilki, tünele yerleştirilen ölçekli rijit model üzerindeki rüzgara ve binanın geometrisine bağlı ve zaman içerisinde değişim gösteren yüzey basınçlarının ölçülmesi ve bu basınçların gerçek yapı için zaman alanında değişken dinamik rüzgar yüklerine dönüştürülmesidir [1]. Yüksek frekanslı taban balans yöntemi (High Frequency Base Balance, HFBB) olarak adlandırılan ikinci yöntemde ise rüzgar tüneline yerleştirilen rijit ölçeklendirilmiş modelin rüzgar etkisiyle tabanda oluşan tepkime kuvvetleri, hassas ve yüksek frekanslı titreşimleri ölçebilme yetisine sahip bir balans sistemi kullanılarak ölçülür. Elde edilen taban kuvvetlerinden rüzgarın rastgelelik

özellikleri hesaplanır ve bu sayede yapıda azami etkileri oluşturacak statik yükler elde edilir. HFBB yöntemini basınç ölçümü yönteminden ayıran en önemli avantaj, özellikle karmaşık mimariye sahip binalar için ucuz ve hızlı uygulanan bir yöntem olmasıdır. Ancak genel olarak her HFBB yöntemiyle test edilen bina modellerinde, dış yüzey kaplamalarının tasarımı için basınç ölçümlerinin de yapılması gerekmektedir. Bina testleri için uygulanan son yöntem ise aeroelastik testlerdir. Bu yöntemde ölçekli modelin gerçek binanın dinamik ve elastik özelliklerini temsil etmesi sağlanır. Diğer bir deyişle, bina ilk iki yöntemde olduğu gibi rijit modellenmez. Bu yöntem özellikle bina hareketleriyle rüzgar etkileşiminin modellenmesini sağladığından en doğru sonuçları üretir. Ancak gerek maliyet yüksekliği, gerekse model hazırlama süresinin uzunluğu nedeniyle günümüzde binalar için aeroelastik testler pek tercih edilmemektedir [1, 11, 18,19].



Şekil 1: Ankara Rüzgar Tüneli (ART) genel görünümü (solda) ve test kesidi (sağda) [21]

Bu çalışma, rüzgar tüneli testleri gerçekleştirilerek yüksek binalarda rüzgar etkilerinin incelenmesini hedeflemektedir. Türkiye’de ilk defa gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada ilk olarak kısa deney odasına sahip olan Ankara Rüzgar Tüneli’nde [21] atmosferik sınır tabakasının yaratılması için gerekli çalışmalar yapılmıştır [17]. ASCE 7-05 [2]’de tanımlanan üç farklı rüzgar sınıfına ait sınır tabakasının yaratılması için yüzey pürüzleri tasarlanmış ve deney odası içerisindeki hız profili önce sayısal olarak daha sonra deney sırasında ölçülerek hem yüzey pürüz tasarımı sınanmış hem de sayısal ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır [17]. Bir sonraki aşamada, dikdörtgen prizma şekline sahip bir örnek bina modeli rüzgar tüneline test edilmiş ve rüzgar kaynaklı taban titreşimleri ölçülmüştür. Bu sayede deneysel veriler kullanılarak binaya etkiyen eşdeğer statik kuvvetler hesaplanarak çeşitli yönetmeliklerdeki değerlerle karşılaştırılmıştır.

2. TÜNEL KESİTİNDE İSTENEN RÜZGAR HIZ PROFİLİNİN YARATILMASI

Benzetim Gereksinimleri

Deneysel rüzgar mühendisliği alanındaki en önemli gereksinimlerden bir tanesi, doğal rüzgar özelliklerinin deneysel ortamda doğru benzetiminin sağlanmasıdır. Bu amaçla kullanılan kinematik, dinamik ve termal benzetim koşulları kütle, momentumun ve enerjinin korunumu ilkelerinden yola çıkılarak elde edilir. Cermak [10] tarafından da belirtildiği gibi gerçek yapıyla, ölçekli yapı arasındaki benzetimi sağlamak için çeşitli

boyutsuz tanımlar kullanılır. Bu boyutsuz tanımların en önemlileri arasında Reynolds, Richardson, Rossby, Prandtl ve Eckert sayıları sayılabilir.

Standart atmosferik basınç ve yerçekimi koşullarında ölçekli rüzgar tüneli testlerinde, yüksek binalar gibi büyük boyutlu yapılar için Reynolds sayısının deney sırasında yakalanması mümkün değildir. Richardson sayısı ise sadece termal benzetim için gereklidir. Atmosferik sınır tabakasının oluşumu jeostropik rüzgar ve Ekman spiral etkisinden bağımsız olduğu için Rossby sayısının tutturulması da gerekmemektedir. Hava kullanılarak yapılan testlerde Prandtl sayısı ile benzetim otomatik olarak sağlanmakta, Eckert sayısı ile benzetim ise sadece sıkıştırılabilir akış için gerekli olmaktadır. Bu bağlamda, atmosferik sınır tabakasının yaratıldığı testlerde yukarıda bahsi geçen boyutsuz tanımlarla bir benzetim sağlamak gerekmemekte veya mümkün olamamaktadır. Bu sebepten dolayı da, bu tip testlerde atmosferik sınır tabakasının özellikleri (geometrik ve türbülans yoğunluğu) olabildiğince gerçeğe yakın modellenmektedir [10]. Yüksek frekanslı taban balans yönteminde ise rüzgar tüneli testi sonucunda rüzgar-yapı etkileşiminin rastgelelik özellikleri kullanıldığından tünel içerisindeki sınır tabakasının doğru oluşturulması yeterli olmaktadır.

Rüzgar Hız Profili

Doğal koşullarda rüzgar hız profili, coğrafi özelliklere, bitki örtüsüne ve çevredeki yapı stoğunun yoğunluğuna bağlı olarak değişmekte, açık alanda yaklaşık 200 m yükseklikte sabitlenebilen rüzgar hızı (atmosferik sınır tabakası), çok yoğun yerleşim bölgelerinde 1000 m yüksekliğe kadar değişim gösterebilmektedir. Dolayısıyla incelenecek olan yapının çevre koşulları incelenerek uygun rüzgar profilinin tünel içerisinde oluşturulması gerekmektedir. Bu durum tünel içerisinde farklı rüzgar profillerinin yaratılmasını sağlayan yüzey pürüzlerinin her bir hız profili için ayrı ayrı tasarlanmasını gerektirmektedir.

Rüzgar mühendisliğinde ve rüzgarla ilgili yük yönetmeliklerinde genelde arazi koşulları içinde barındırdığı engebe ve yapı stoğu miktarına bağlı olarak sınıflara ayrılır ve her sınıf için ayrı bir rüzgar hız profili tanımlanır. Amerikan Yük Yönetmeliği ASCE 7-05 [2], arazi engebeliğini B, C ve D ismini verdiği üç ayrı sınıfta anlatır. B sınıfı daha çok yerleşim bölgeleri için kullanılırken, D sınıfı açık araziye ve deniz kıyısını temsil eder. C sınıfı ise B veya D sınıfı içerisinde tanımlanamayan araziler içindir. Her bir arazi sınıfı için rüzgar profili kuvvet yasası (power law) denklemi kullanılarak tanımlanır:

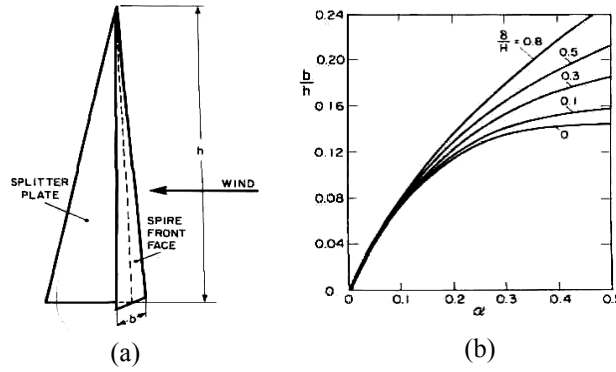
$$\frac{U}{U_{\infty}} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\alpha} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde U_{∞} atmosferik sınır tabakasındaki rüzgar hızını, δ atmosferik sınır tabakasının yüksekliğini ve y ise rüzgar hızının hesaplanacağı yüksekliği tanımlamaktadır. ASCE 7-05’de sınır tabaka yüksekliği sırasıyla B, C ve D sınıfları için 365,74 m, 274,32 m ve 312,36 m olarak ve α katsayısı ise B, C ve D sınıfları için 1/4, 1/6,5 ve 1/9 olarak tanımlanmıştır.

Yüzey Pürüz Tasarımı

ASCE 7-05’de tanımlanan rüzgar hız profillerinin tünel içinde oluşturulması, özellikle ART gibi test kesit uzunluğu yetersiz olan kısa tünellerde çok kolay olamamakta, hatta bazı durumlarda bire bir aynı hız profilinin elde edilmesi mümkün olamamaktadır. Tünel içi rüzgar hız profilinin değiştirilmesi için genelde hareketsiz yüzey pürüz elemanları kullanılmaktadır. Bu pürüz elemanlarından bir tanesi de test kesitinin girişine yerleştirilen üçgen plakalardır (Şekil 2). Üçgen plakaların taban genişliği ve yüksekliğiyle oynanarak tünel içi hız profilini kontrol etmek mümkün olabilmektedir. Yoğun yerleşim bölgelerindeki rüzgar profilini modellerken gereken yüksek yüzey sürtünme kuvveti de tünel yüzeyine monte edilen küçük boyutlu çok sayıda küp ile mümkün olabilmektedir. Ancak gerek üçgen plakaların, gerekse yüzey küplerinin doğru tasarımı hız profilinin doğru elde edilmesi için büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada üçgen plaka tasarımı için Simiu ve Scanlan tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır [5]. Deneysel gözlem ve empirik formüllere dayanan bu yöntemde ilk olarak tünel kesiti içinde istenen sınır tabakası yüksekliği belirlenir (δ). Kuvvet yasası kullanılarak (Denklem 1) oluşturulması hedeflenen rüzgar profilinin α katsayısı belirlendikten sonra Denklem 2’yle üçgen plaka yüksekliği, h , hesaplanır. Daha sonra Şekil 2’de gösterilen grafik kullanılarak plaka taban genişliği belirlenir. Şekil 2b’de gösterilen, H , tünel test kesitinin yüksekliğini temsil etmektedir.



Şekil 2: Üçgen plaka görünümü ve plaka taban genişliği- α katsayısı ilişkisi [3]

$$h = 1.39 \frac{\delta}{(1 + \alpha/2)} \quad (2)$$

Bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilen tasarımlarda, istenen rüzgar profilinin üçgen plakalardan $6h$ kadar uzaklıktaki bir noktada oluşması beklenir. Ayrıca tünel yüzeyinin de boyutları (k) ve aralıkları (D) olarak tanımlanan küplerle de donatılması gerekmektedir. Belirli bir küp boyutu için kullanılması gereken aralık Denklem 3 ve 4 kullanılarak hesaplanır.

$$\frac{k}{\delta} = \exp\left\{\left(\frac{2}{3}\right)\ln(D/\delta) - 0.1161\left[\left(\frac{2}{C_f}\right) + 2.05\right]^{1/2}\right\} \quad (3)$$

$$C_f = 0.136\left[\alpha/(1+\alpha)\right]^2 \quad (4)$$

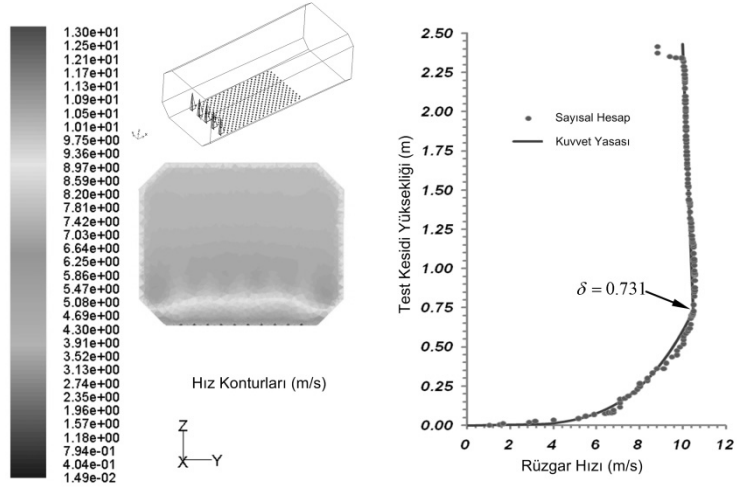
B, C ve D sınıfları için tanımlanan rüzgar hız profilini tünel içinde oluşturmak amacıyla ilk olarak önceden belirlenmiş bir ölçek kullanılarak tünel içi sınır tabakası yüksekliğine karar verilerek, o yüksekliğe karşılık gelen üçgen plaka ve yüzey küp boyutları hesaplanmıştır. Hesaplamalar sırasında tünel içi sabit akış hızı ART'de güvenilir bir şekilde sabitlenen en düşük hız olan 10 m/saniye olarak alınmıştır. Daha sonra Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı, ANSYS FLUENT [24], kullanılarak test kesiti ve yüzey pürüzleri modellenerek, istenen hız profilinin ne derecede başarıyla elde edildiği sınıanmıştır. Her bir hız profili için ayrı bir çözüm ağı oluşturulmuş ve modellerde hız sınıfına göre yaklaşık 1,3 milyon ila 1,7 milyon tetrahedron eleman kullanılmıştır. Hesaplamalar sırasında κ - ϵ türbülans modeli kullanılarak RANS denklemi çözülmüş, çözümlerde standart basınç ve ikinci derece momentum hesapları kullanılmıştır.

Birkaç yinleme sonrasında elde edilen üçgen plaka boyutları Tablo 1'de ve hesaplamalar sonucunda elde edilen hız profili, elde edilmek istenen hız profiliyle karşılaştırılmaları B, C ve D sınıfları için sırasıyla Şekil 3, 4 ve 5'de gösterilmiştir. Tablo 1'deki bütün değerler metre cinsinden olup, Γ modelin yerleştirilmesi gereken uzaklığı göstermektedir. Tasarım sonuçlarına göre sadece B sınıfı hız profili için yüzey küpleri kullanılması gerekmekte, diğer sınıflarda sadece üçgen plakaların kullanılması yeterli olmaktadır. Şekillerdeki sonuçlara göre C ve D sınıflarına ait hesaplamalardan elde edilen hız profillerinde ise üçgen plakalardan 6h kadar uzaklaşmış olmasına rağmen plakaların etkisi hala görünmektedir. Genel olarak modelin konulacağı noktadaki ortalama hız profilleri istenen hız profiliyle büyük ölçüde uyuşmuş görünmektedir.

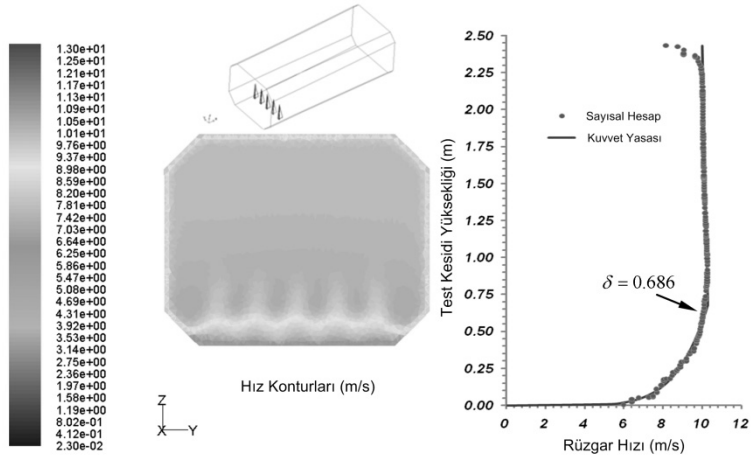
Tablo 1: Rüzgar Hızı Sınıfları için Üçgen Plaka ve Yüzey Küp Boyutları

Hız Profili Sınıfı	Ölçek	δ	α	D	h	b	k	Γ
B	1/500	0,731	1/4	0,2	0,904	0,158	0,033	4,07
C	1/400	0,686	1/6,5	0,2	0,885	0,107	0	3,98
D	1/285	0,747	1/9	0,2	0,983	0,091	0	4,43

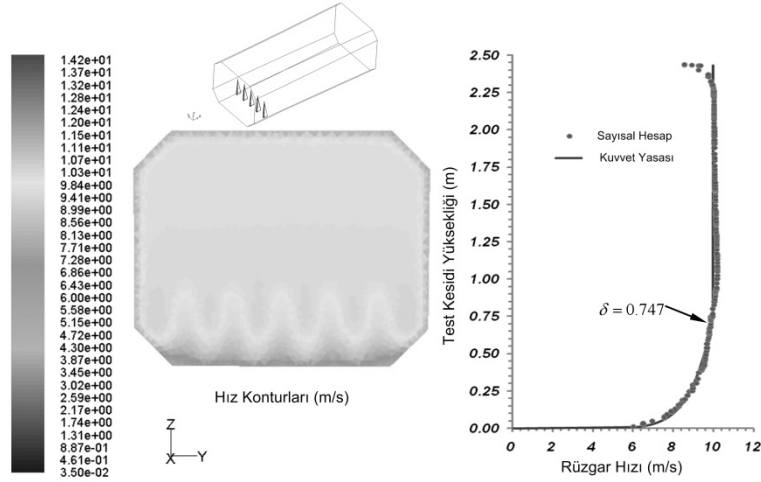
Yüksek Binalarda Rüzgar Etkilerinin Rüzgar Tüneli Deneyleriyle Tespiti



Şekil 3: B Sınıfı için Tünel İçi Hız Profili



Şekil 4: C Sınıfı için Tünel İçi Hız Profili



Şekil 5: D Sınıfı için Tünel İçi Hız Profili

Rüzgar Tüneli Deneyleri – Hız Profilinin Ölçülmesi

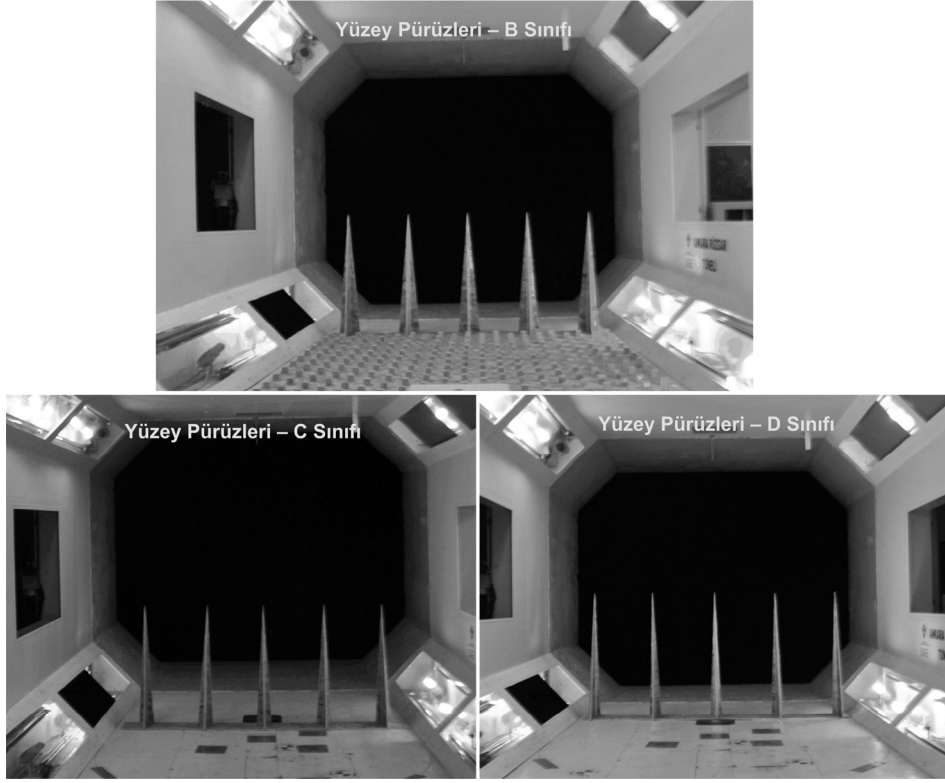
Tasarım sonrasında elde edilen ve sayısal hesaplamalar sonucunda belirli bir güven sağlanan yüzey pürüz elemanları üretilerek Şekil 6’da gösterildiği gibi ART deney odasına monte edilmiştir. Üçgen plakaların yerleştirileceği bölge, ölçümlerin yapılacağı, dolayısıyla bina modelinin yerleştirileceği noktadan Tablo 1’de verilen Γ değeri kadar uzakta olacak şekilde ayarlanmıştır. B sınıfı için gereken yüzey küpleri ise her sıraya şaşırtmalı bir şekilde yerleştirilerek yüzeye sabitlenmiştir.

Tünel içi hız profilleri sıcak tel ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 7’de detayları gösterilen ve tünel deney odasının alt kısmına yerleştirilen bu sistemde sıcak tel anemometresi seri olarak üç farklı hareketlendirme (traverse) sistemine monte edilmiştir. Bu sayede bilgisayar kontrollü bir şekilde tünel tabanından 1m yüksekliğe kadar her 5 mm’de bir hız ölçümünün yapılması mümkün olmuştur. Ölçümlere başlanmadan önce sıcak tel anemometresinin kalibrasyonu yapılmış, daha sonra tünel içi hız okuma sistemiyle sıcak tel anemometresinin okuduğu değerler karşılaştırılarak okumaların doğruluğu sınanmıştır. Şekil 7’de ayrıca tünel içi hız ölçümleri sırasında çekilen bir fotoğraf da sunulmuştur.

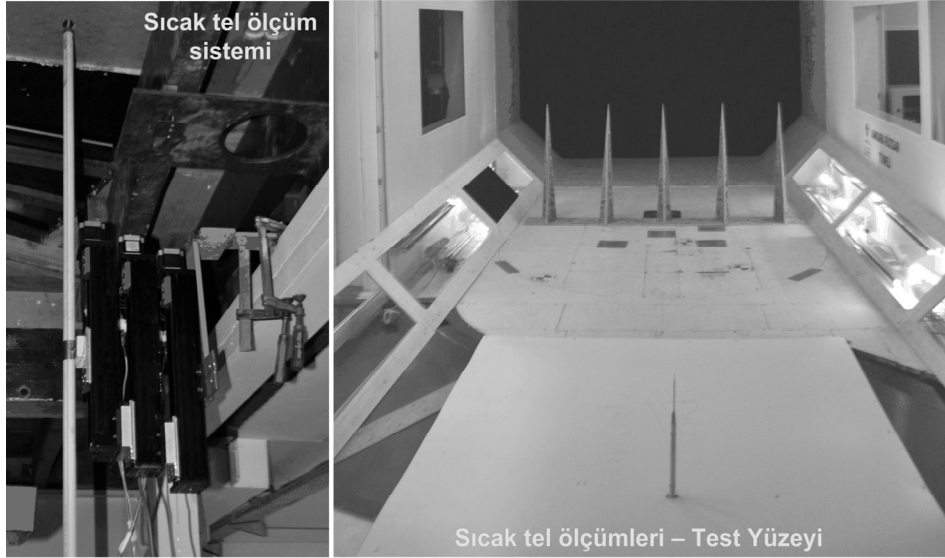
Tünel içinde ölçülen akışın türbülans yoğunlukları ve ASCE 7-05’de tanımlanan türbülans yoğunluğu tanımıyla olan karşılaştırmalar Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 8 hem boş tünel ölçümlerini hem de her bir sınıf için ölçülmüş değerleri sunmaktadır. Türbülans yoğunluğu Denklem 5 kullanılarak hesaplanmış olup, akış hızının değişkenliğini gösteren önemli bir parametredir. Denklem 5’de u' ve U_m sırasıyla hızın ortalama karekök (RMS) ve ortalama değerlerini temsil etmektedir.

$$I = \frac{u'}{U_m} \quad (5)$$

Yüksek Binalarda Rüzgar Etkilerinin Rüzgar Tüneli Deneyleriyle Tespiti

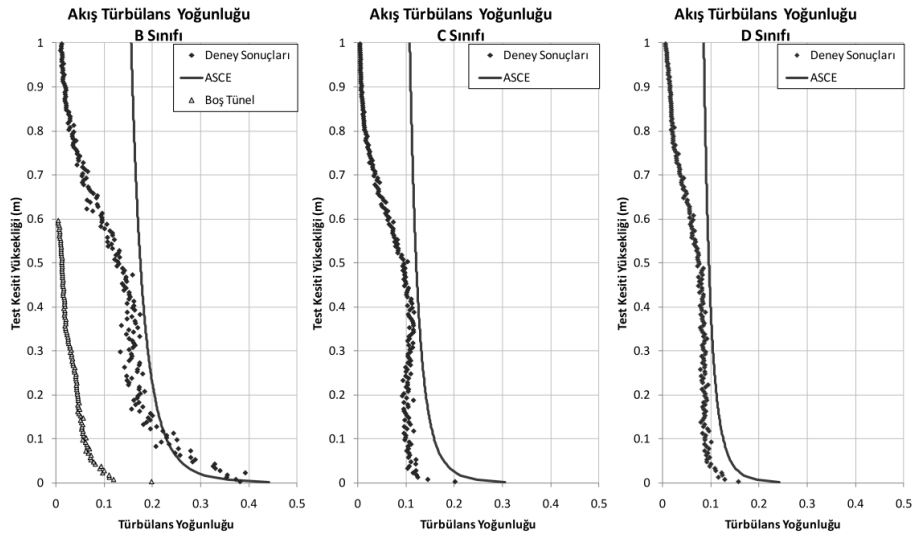


Şekil 6: Yüzey Pürüzlerinin ART Test Kesiti içindeki Yerleşimi



Şekil 7: Tünel İçi Sıcak Tel Anemometresi Ölçümleri

Tünel boş haldeyken akıştaki türbülans yoğunluğu çok düşük kalmış, yerden 50 cm yükseklikten sonra neredeyse %1-2 seviyesine kadar düşmüştür. Test kesitinin girişine konulan üçgen plakalar, akıştaki türbülans yoğunluğunu arttırmıştır. C ve D sınıfları için türbülans yoğunluğu 50 cm yüksekliğe kadar %10 civarlarında olup, %1-2 seviyesi 90 cm yükseklikten sonra görülmüştür. B sınıfının türbülans yoğunluğu ise, özellikle ilk 20 cm'lik yükseklikte %20-%40 aralığında değişmektedir. Bu yüksek değer tünel yüzeyine yerleştirilen yüzey küplerinin yarattığı beklenen bir durumdur. Tünel akışındaki türbülans yoğunluklarının ilk 50 cm'lik yüksekliğe kadar ASCE 7-05'de tanımlanan profile yakın olduğu gözlenmiştir. Ancak 50 cm'den üzerindeki yüksekliklerde akıştaki türbülans azalmaya başlamakta ve yaklaşık 75 cm yükseklikte neredeyse sabitlenmektedir. Tünel girişine konulan üçgen plakalar akışta iz türbülansı yaratmakta ve plaka boyutlarına göre türbülans yoğunluğu miktarı ayarlanabilmektedir. Diğer taraftan 50 cm'nin üzerindeki yüksekliklerde üçgen plakaların etkisi giderek azalmaya başlamakta ve akışta istenen türbülans yoğunluğu elde edilememektedir.

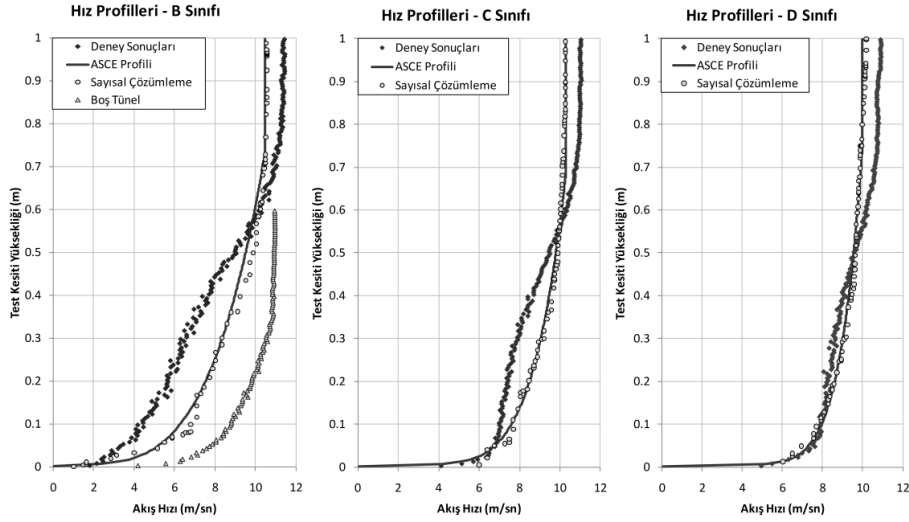


Şekil 8: Tünel İçi Akışın Türbülans Yoğunlukları

Şekil 9'da ise elde edilen hız profillerinin ASCE 7-05 hız profilleri ve sayısal çözümleme sonuçlarıyla olan karşılaştırması sunulmuştur. Tünel kesiti boş haldeyken sınır tabakasının yaklaşık 35 cm yükseklikte olduğu gözlenmiştir. Tünel girişine yerleştirilen üçgen plakalar sayesinde B, C ve D sınıfları için sınır tabakası Tablo 1'deki değerlere (δ) yakın yüksekliklerde oluşmuştur. Sınır tabakasının altındaki bölgede B sınıfı hız profili istenen profile çok da yaklaşmamış, ancak profiller arasındaki farklılık C ve D sınıflarında gittikçe azalmıştır. Her ne kadar sayısal çözümlemelerden elde edilen sonuçlar ASCE profilleriyle çakışık görünse de, gerçek ölçümlerde elde edilen değerler farklıdır. Bu durum sayısal çözümleme sırasında türbülansın, özellikle iz bölgesindeki momentum karışması ve türbülans yayılımı gibi değişimlerin tam olarak modellenemediğinin bir göstergesidir.

Yüksek Binalarda Rüzgar Etkilerinin Rüzgar Tüneli Deneyleriyle Tespiti

Tünel kesitinin kısa olması nedeniyle iz bölgesindeki türbülans muhtemelen tam olarak karışmamakta ve bu yüzden plaka yüksekliğine yakın bir yüksekliğe kadar olan bölgede istenen hızlardan daha yavaş bir akış hızı elde edilmektedir. Zaten bu sebepten dolayı da atmosferik sınır tabakasının tam olarak modellenebilmesi için yaklaşık 15m ila 20m uzunluğunda test kesitine sahip rüzgar tünellerine ihtiyaç vardır [10]. Ölçülen hız profillerindeki dikkat çeken bir diğer önemli nokta ise, sınır tabakasından sonraki yüksekliklerde hızın 10 m/saniye'den büyük olmasıdır. Ancak, yüksek frekanslı taban balans yöntemiyle (HFBB) yapılacak olan hesaplamalarda önemli olan rüzgar hızının büyüklüğü değil, türbülans yoğunluğunun ve rüzgar hız profiline yönetmeliklerde tanımlanan değerlere yakınlığıdır. Şekil 9'da elde edilen hız profilleri ise kısa tünel kesitleri için elde edilmesi mümkün olan iyi sonuçlardan bir tanesidir.



Şekil 9: Karşılaştırmalı Tünel İçi Hız Profilleri

3. YÜKSEK FREKANSLI TABAN BALANS YÖNTEMİ

Teori

Yüksek frekanslı taban balans yönteminde yapının aeroelastik özellikleri modellenmeye çalışılmaz, sadece rijit bir model kullanılarak, bu model üzerindeki rüzgar yüklerinin ortalama ve değişken bileşenlerinin elde edilmesi hedeflenir. Elde edilen sonuçlar yapı-rüzgar etkileşiminde rastgelelik hakkında bilgi verir ve bu sayede gerçek yapıda oluşabilecek azami kuvvetler elde edilir. Bu yaklaşıma göre, yapı tabanında oluşabilecek azami moment (rüzgarla aynı veya rüzgara dik yöndeki moment ya da burulma momentini), yapı-rüzgar etkileşiminin durağan (stationary) Gaussian bir olay olduğu varsayılarak Denklem 6'daki gibi ifade edilir [19]:

$$\hat{M} = \bar{M} + g \times \sigma_M \quad (6)$$

Bu denklemde \hat{M} ve \bar{M} sırasıyla azami ve ortalama moment değerlerini, g tepe katsayısını (peak factor) ve σ_M ise momentin ortalama karekökünü ifade etmektedir. Ortalama karekök değeri ise Denklem 7 kullanılarak hesaplanabilir:

$$\sigma_M = \left(\int_0^{\infty} S_M(f) df \right)^{1/2} \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemde $S_M(f)$ değişken taban momentinin güç yoğunluk spektrumunu ifade etmektedir. Zhou ve Kareem'e [19] göre Denklem 7'deki güç yoğunluk spektrum fonksiyonu Denklem 8'de gösterildiği gibi de ifade edilebilir:

$$S_M(f) = S_{UM}(f) |H_1(f)|^2 \quad (8)$$

$$|H_1(f)|^2 = \left\{ \left[1 - (f/f_1)^2 \right]^2 + (2\zeta_1(f/f_1))^2 \right\}^{-1} \quad (9)$$

$H_1(f)$ yapının birinci moduna bağlı transfer fonksiyonunu ifade etmekte olup f_1 ve ζ_1 sırasıyla yapının birinci doğal frekansını ve birinci moddaki kritik sönüm oranını temsil etmektedir. Yapının rüzgar etkisi altında elastik salınım yapılacağı düşünülürse ζ_1 değeri çelik taşıyıcı sistemli binalar için %1, betonarme binalar için %2 alınabilir. $S_{UM}(f)$ ise yapıya uygulanan kuvvetlerin yarattığı momentlerin güç yoğunluk spektrumunu ifade etmekte olup, yapının dinamik davranışından kaynaklanan dinamik arttırmaları içermez. Denklem 8'deki anlatımda dikkat edilmesi gereken bir nokta, yapının ağırlıklı olarak birinci modda salınım yapacağı varsayımdır. Bu varsayıma uymayan yapılar için hesaplarda çeşitli düzeltmeler yapmak gerekmektedir [24].

Denklem 8'deki ifade, arkaplan ve rezonans tepkisi adı altında iki farklı bileşene ayrılarak incelenebilir. Rezonant moment bileşeni, \hat{M}_R , uyarımın beyaz gürültüyle temsil edilebileceği varsayılarak Denklem 10 ile ifade edilebilir [25]. Rezonant moment bileşeni yapının dinamik tepkisinden kaynaklanan dinamik artımı göz önünde bulundurulur.

$$\hat{M}_R = g_R \sqrt{\frac{\pi}{4\zeta_1} f_1 S_{UM}(f_1)} \quad (10)$$

$$g_R = \sqrt{2 \ln(f_1 T) + 0,5772} / \sqrt{2 \ln(f_1 T)} \quad (11)$$

Rezonant tepe katsayısı, g_R , hesabında T gözlem süresini göstermekte olup genelde hız profilindeki ortalama hızın gözlem süresine eşit olarak alınır. Arkaplan moment bileşeni, \hat{M}_A ise aerodinamik yüklemelerden kaynaklanan momenti temsil etmekte olup, dinamik artım katsayısının bire eşit olduğu yapının statik tepkisine karşılık gelen momenttir. Arkaplan momenti ise Denklem 12 ile hesaplanabilir.

Yüksek Binalarda Rüzgar Etkilerinin Rüzgar Tüneli Deneyleriyle Tespiti

$$\hat{M}_A = g_B \times \sigma_{MA} \quad (12)$$

Arkaplan tepe katsayısı, g_B , genelde 3 ila 4 arasında bir değere eşittir. Yukarıdaki denklemdeki σ_{MA} aerodinamik momentlerin ortalama kareköküdür.

Rüzgar Tüneli testi sonrasında elde edilen taban momentleri kullanılarak rezonant ve arkaplan moment bileşenlerini hesaplamak mümkündür. Bu amaçla ilk olarak taban momentlerinin ortalama karekökü ve güç yoğunluk spektrumu Denklem 13 ve 14 kullanılarak boyutsuz hale getirilir:

$$\sigma_{K_M} = \sigma_{M_T} / \bar{M}_T \quad (13)$$

$$K_M(f) = (f \times S_{M_T}(f)) / \sigma_{M_T}^2 \quad (14)$$

Yukarıdaki denklemlerde ‘ T ’ alt simgesi rüzgar tüneli testi sonucunda yüksek frekanslı taban balans sisteminden okunan momentlerle hesaplanan değerleri göstermektedir. Dolayısıyla, \bar{M}_T model tabanında elde edilen ortalama momenti göstermektedir. Denklem 13 ve 14 kullanılarak boyutsuzlaştırılan değerler kullanılarak gerçek yapıdaki taban moment bileşenleri de Denklem 15 ve 16 kullanılarak hesaplanır:

$$\hat{M}_R = g_R \times \sigma_{K_M} \times \bar{M} \sqrt{\frac{\pi}{4\zeta_1} f_1 K_M(f_1)} \quad (15)$$

$$\hat{M}_A = g_B \times \sigma_{K_M} \times \bar{M} \quad (16)$$

Ortalama moment değeri, \bar{M} , ise yönetmeliklerde tanımlanan ortalama hız profili kullanılarak aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$\bar{M} = \int_0^H \frac{1}{2} C_D \rho \bar{U}(h)^2 B h dh \quad (17)$$

Denklem 17’de B binada rüzgarın etki ettiği yüzün genişliğini, H bina yüksekliğini, C_D bina geometrisine bağlı olan sürüklenme katsayısını, ρ havanın yoğunluğunu ve \bar{U} yüksekliğe göre değişen ortalama rüzgar hızını göstermektedir. Bütün moment bileşenleri Denklem 15, 16 ve 17 kullanılarak hesaplandıktan sonra bina tabanında oluşabilecek azami moment ise Denklem 18 ile hesaplanır:

$$\hat{M} = \bar{M} + \sqrt{\hat{M}_R^2 + \hat{M}_A^2} \quad (18)$$

Balans Sistemi ve Tünel İçi Yerleşimi

Tünel içindeki bina modelinin tabanında rüzgar kaynaklı salınımlardan oluşan tepki kuvvetlerinin ölçülmesi için balans sistemleri kullanılmaktadır. Bu çalışma çerçevesinde tasarlanan ve üretilen balans sistemi birbirine dik iki yöndeki taban momentlerini hassas bir şekilde ölçebilmektedir (Şekil 10). Toplam dört adet 5 kg kapasiteli yaklaşık 50 gr hassasiyetli yük hücrelerinden oluşan balans sistemi karşılıklı ikişer yük hücresinin artı şeklinde alüminyum kirişlerle bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Bu sayede yük hücrelerinden okunan eksenel kuvvetler, yük hücreleri arasındaki mesafeyle çarpılarak taban momentleri hesaplanabilir. Rüzgar tüneli test kesitinin tabanına yerleştirilen balans sistemine, sert köpükten üretilen bina modeli, merkezinden geçen bir alüminyum boruya sabitlenerek sonra monte edilmiştir. Olabildiğince hafifletilmeye çalışılan balans sisteminin doğal frekansı montajdan sonra yaklaşık 10 Hz olarak ölçülmüştür. Şekil 10'da tünel içine yerleştirilmiş olan bina modeli gösterilmiştir.



Şekil 10: Balans Sistemi ve Model Bina'nın Tünel İçi Yerleşimi

Bina modeli 15 x 20 x 50 cm boyutlarında üretilmiştir. Bu ebatlar C sınıfı ölçeğine göre 60 x 80 x 200 m büyüklüğündeki bir binaya eşdeğerdir. Bina yüzey alanının standart 200 m yüksekliğindeki bir binanın boyutlarından büyük seçilmesinin nedeni, bina yüzeyine etkileyen rüzgar kuvvetinin büyüklüğünü artırarak, taban kuvvetlerinin daha hassas elde edilmesini sağlamaktır. Bina testleri B ve C sınıfı hız profilleri kullanılarak gerçekleştirilmiş, B sınıfı için rüzgar binaya tek yönden, C sınıfı için ise bina kendi ekseninde 15'er derecelik aralıklarla döndürülerek yedi farklı yönden etkilmiştir. Her bir test en az iki kere tekrarlanmış ve sonuçların tekrarlanabilirliği de sınanmıştır. Balans sisteminden her seferde 100 Hz hızında 3 dakikalık sürelerle veri toplanmıştır.

Türbülans Yoğunluğu Etkisi

Tablo 2, bina modellerinin farklı hız profillerinde rüzgar etkiletildiği durumlardaki taban ortalama momentini, iki yöndeki momentlerin ortalama kareköklerini ve boyutsuz ortalama kareköklerini göstermektedir. B ve C sınıfı için gösterilen değerler, rüzgar 0°'den etkiletildiği, diğer bir deyişle rüzgarın binanın geniş yüzüne etkidiği testler sonrasında elde edilmiştir. Tablo 2'de gösterilen 'A' üst indisi rüzgarla aynı yöndeki ve 'D' üst indisi ise rüzgara dik yöndeki tepkileri göstermektedir. Ortalama karekök hesabında balans sisteminin kendi salınımının etkisini en aza indirmek amacıyla, balans sisteminin doğal frekansının etkileşime girdiği frekans aralığı 'band-stop' filtresi kullanılarak verilerden çıkartılmıştır.

Tablo 2: Tünel Testi Sonuçları – Hız Profili Etkisi

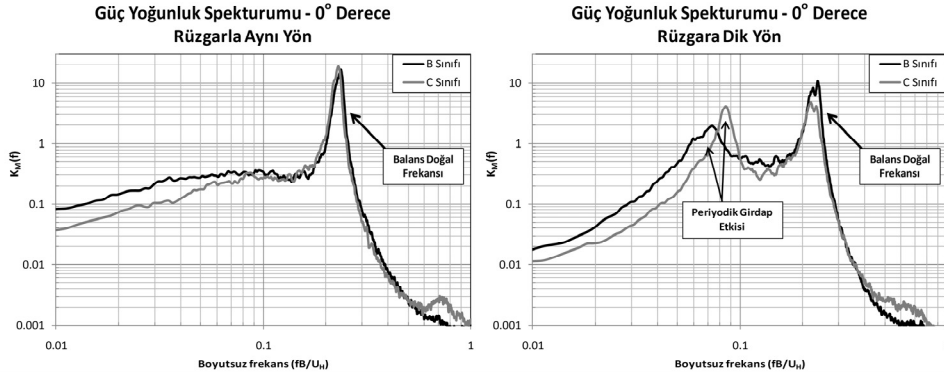
Hız Profili Sınıfı	Ortalama Moment (M_T)	Ortalama Karekök (σ_{MT}^A)	Ortalama Karekök (σ_{MT}^D)	Boyutsuz Ortalama Karekök (σ_{KM}^A)	Boyutsuz Ortalama Karekök (σ_{KM}^D)
B Sınıfı	1,052	0,266	0,276	0,253	0,262
C Sınıfı	1,631	0,335	0,464	0,206	0,284

Bütün birimler N.m cinsindedir

Tablo 2'deki değerler incelendiğinde ortalama moment değerlerinin binaya etkileyen ortalama rüzgar hızıyla ve rüzgarın çarptığı bina yüzünün genişliğiyle uyumlu bir şekilde değiştiği görülecektir. B sınıfı hız profilinde ilk 50 cm'lik yüksekliğe kadar ortalama rüzgar hızı 6 m/sn, C sınıfı için ise ortalama hız 7,73 m/sn olarak ölçülmüş (Şekil 9), ortalama momentler arasındaki oranın ise ortalama rüzgar hızlarının karesiyle doğru orantılı olduğu görülmüştür. B sınıfında bina modeli önüne ve tünel tabanına yerleştirilen küpler, akışta önemli miktarda ortalama momentum kaybına yol açmakta (Şekil 9) ve bu momentum kaybindan dolayı, (17) no'lu denklemle de uyumlu bir şekilde B sınıfı testlerinde ortalama moment C sınıfından yaklaşık %38 daha az çıkmaktadır. B ve C hız profillerinden elde edilen boyutsuz ortalama karekök değerleri karşılaştırıldığında, özellikle rüzgarla aynı yöndeki değerlerde ciddi bir farklılık göze çarpmaktadır. B hız profilinin türbülans yoğunluğu ilk 50 cm için ortalama %22, C sınıfının türbülans yoğunluğu ise ortalama %10,7 olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla, hız profilinin türbülans yoğunluğu doğrudan rüzgarla aynı yöndeki momentlerin ortalama karekökünü etkilemektedir.

Binanın dinamik salınımlarından kaynaklanan rüzgar-bina etkileşimi rezonant moment bileşeni kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem 10'dan görülebileceği gibi rezonant moment bileşeni yapının doğal frekansına ve sönüm katsayısına bağlı olmasının yanı sıra aerodinamik yüklerin güç yoğunluk spektrumuna da bağlıdır. Şekil 11, B ve C sınıfı hız profilleri için rüzgarla aynı ve rüzgara dik yönde elde edilen taban momentlerinin güç yoğunluk spektrumunu göstermektedir. Spektrumlar oluşturulurken balans sisteminden elde edilen veriler hiç değiştirilmeden kullanılmıştır. Bu sebepten dolayı, bütün spektrumlarda boyutsuz frekansın yaklaşık 0,23 değerine yaklaştığı bant aralığında bir

tepe noktası görünmektedir. Bu aralık balans sisteminin doğal salınımının bir etkisi olup, bu aralıktaki verilerin hesaplar sırasında kullanılması gerçekçi değildir.

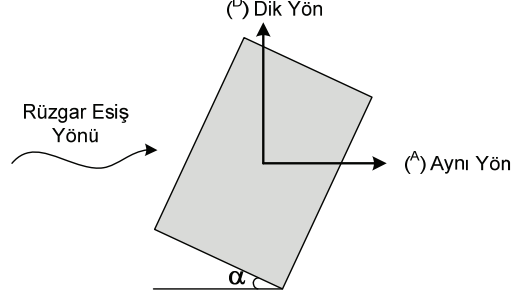


Şekil 11: 0° Rüzgar Yönünde Farklı Hız Profilleri için Güç Yoğunluk Spektrumları

Dinamik etki bakış açısıyla, B ve C hız profilleri arasındaki en büyük fark akıştaki türbülans yoğunluğudur. Ortalama %10,7'lik bir türbülans yoğunluğuna sahip C sınıfı hız profilinde, rüzgara dik yöndeki salınımlarda periyodik girdap etkisi, B sınıfına göre çok daha etkilidir. Akıştaki türbülansın fazlalığı, girdaplar arasındaki periyodikliği etkilemiş ve yapıdaki rezonant etkiyi nispeten azaltmıştır. Bu durum Şekil 11'de gösterilen güç yoğunluk spektrumlarında gözlenebilmektedir. Rüzgara dik yöndeki salınımlara ait spektrumda C sınıfında periyodik girdap etkisini gösteren tepe noktası çok daha keskin bir şekilde olup daha büyük arttırıma yol açmakta ($K_M = 4,65$), ancak B sınıfındaki daha türbülanslı akım yüzünden tepe noktasının bant genişliği artmakta ve rezonans kaynaklı arttırım daha sınırlı kalmaktadır ($K_M = 2,12$). Her iki durumda da periyodik girdap etkisi yapıyı dikdörtgen prizmalar için hesaplanan Sthouhal sayısı ile uyumlu frekansta rezonansa sokmaktadır. Rüzgarla aynı yöndeki güç yoğunluk spektrumları incelendiğinde yapının rüzgardan kaynaklı bir rezonansa girmediği, salınımların daha çok türbülans kaynaklı basınç değişimlerinden kaynaklandığı gözlenmiş, B sınıfına ait hız profilinin düşük frekanslı salınımlarda daha büyük bir arttırıma yol açtığı görülmüştür.

Rüzgar Vuruş Açısı Etkisi

Rüzgar vuruş açısının bina salınımlarına ve taban kuvvetlerine olan etkisinin incelenmesi amacıyla, C sınıfı hız profili altında bina modeli çevrilerek rüzgarın binaya farklı açılardan vurması sağlanmıştır (Şekil 12, α açısı). Tablo 3, rüzgarın binaya 0, 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 dereceden vurduğu durumlar için ölçülen ortalama momenti, ortalama karekökü ve boyutsuz ortalama karekökü göstermektedir. Şekil 13 ise rüzgarla aynı ve rüzgara dik yönler için hesaplanan boyutsuz ortalama karekökün rüzgar vuruş açısına göre değişimini göstermektedir.



Şekil 12: Rüzgar Vuruş Açısı

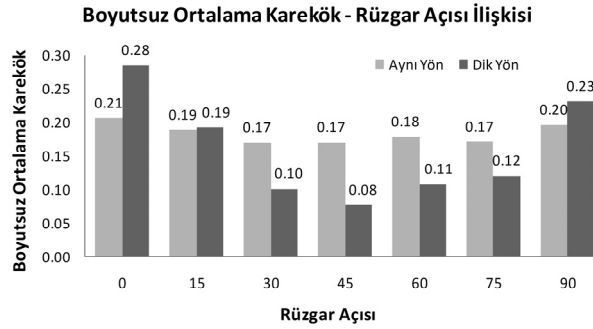
Tablo 3: Tünel Testi Sonuçları – Rüzgar Vuruş Açısı Etkisi

Rüzgar Vuruş Açısı	Ortalama Moment (M_T)	Ortalama Karekök (σ_{MT}^A)	Ortalama Karekök (σ_{MT}^D)	Boyutsuz Ortalama Karekök (σ_{KM}^A)	Boyutsuz Ortalama Karekök (σ_{KM}^D)
0°	1,631	0,335	0,464	0,206	0,284
15°	1,473	0,277	0,282	0,188	0,191
30°	1,520	0,257	0,154	0,169	0,101
45°	1,650	0,280	0,126	0,170	0,076
60°	1,493	0,266	0,161	0,178	0,108
75°	0,997	0,170	0,120	0,170	0,120
90°	0,965	0,189	0,223	0,196	0,231

Bütün birimler N.m cinsindedir

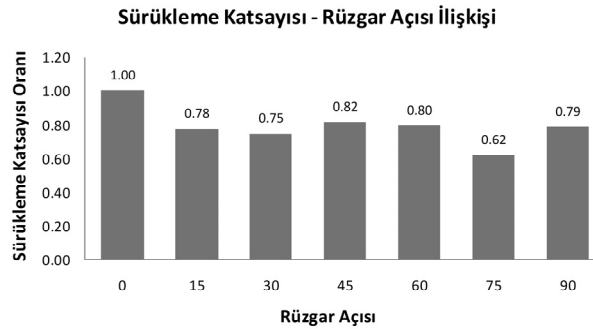
Binalarda rüzgarın esiş yönüne dik yöndeki momentler, binanın her iki yanında periyodik olarak oluşan girdaplardan dolayı meydana gelmektedir [11]. Periyodik girdapların bina üzerinde ne derecede etkili olacağını belirleyen etmenlerden bir tanesi de bina mimarisidir. Rüzgar binaya birbirine dik farklı yönden etkilediği durumda, rüzgara dik yöndeki momentlerin boyutsuz ortalama kareköklerinde yaklaşık %23'lük bir fark ortaya çıkmıştır (0°-90°). Bu durum dikdörtgen prizma şekline sahip binanın rüzgarın çarptığı yüzün boyutu (B) ve rüzgarla aynı yöndeki yüzün boyutu (D) arasındaki oranın, periyodik girdap etkilerini farklılaştırdığını göstermektedir. Rüzgarın 0°'den estiği durumda D/B oranı 0,75 olmakta, 90°'den estiği durumda ise D/B oranı 1,33 olmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre binanın D/B oranı arttıkça arkaplan momentinde periyodik girdapların etkisi azalmaktadır. Şekil 13'den de görülebileceği gibi, rüzgarın binaya 0 ve 90 derecenin dışında vurduğu durumlarda, bina köşelerinin yarattığı girdapları etkisi azalmıştır, rüzgar binaya tam köşeden vurduğu durumla (45°), tam karşıdan vurduğu durum arasında (0°), boyutsuz ortalama karekök değerlerinde yaklaşık 3,7 katlık bir azalma gözlenmiştir. Rüzgarın tam

köşeden (45°) gelmesi durumunda cisim üzerine etki eden kaldırma kuvvetindeki (yan yükler) sapmaların 0°'den estiği duruma göre önemli derecede azaldığı daha önceki çalışmalarda gösterilmiştir [26]. Dolayısı ile bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar literatür ile de uyumluluk göstermektedir. Diğer taraftan rüzgarla aynı yöndeki boyutsuz ortalama karekök değerlerinde ciddi bir farklılık göze çarpmamıştır.



Şekil 13: Boyutsuz Ortalama Karekök Değerinin Rüzgar Açısına Göre Değişimi

Sürüklenme katsayısı (C_D), bir cismin etrafındaki akışa gösterdiği direnci anlatan boyutsuz bir katsayıdır. Binalar için sürüklenme katsayısının büyüklüğü, o binaya daha büyük rüzgar yüklerinin etkiyeceği anlamına gelmektedir. Şekil 14'de binaya rüzgar farklı açılardan vurduğu zaman binanın akışa gösterdiği direnç gösterilmiştir. Şekil 14'deki değerler hesaplanırken, ilk olarak ortalama moment değerleri (M_T), etkin bina genişliğine (B) bölünmüş, elde edilen bütün değerler sıfır derece için bulunan değere bölünerek sürüklenme katsayısının rüzgar vuruş açısına göre değişimi elde edilmiştir.



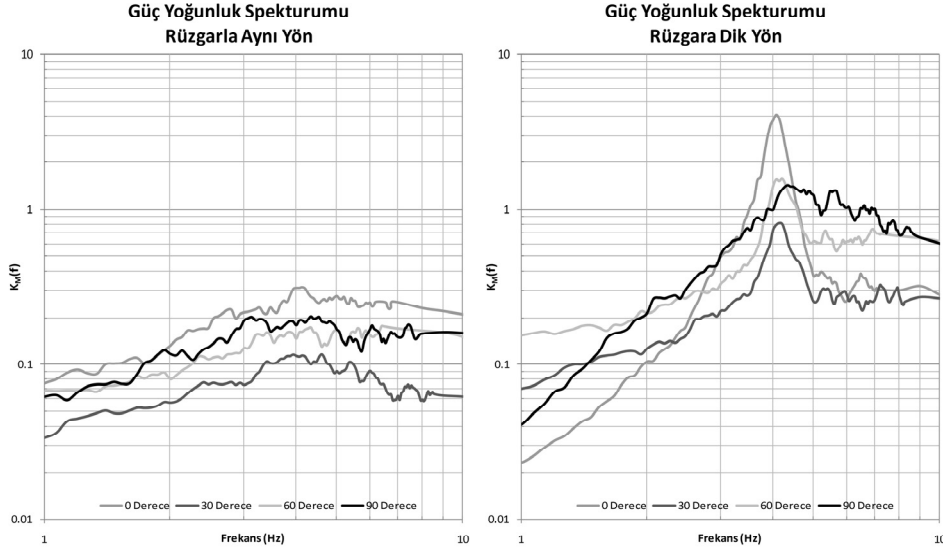
Şekil 14: Sürüklenme Katsayısının Rüzgar Açısına Göre Değişimi

Şekil 14'deki sonuçlara göre, dikdörtgen plana sahip binanın D/B oranı rüzgara dik yöndeki arkaplan momentinin büyüklüğünü etkilediği gibi sürüklenme katsayısını da etkilemektedir.

Yüksek Binalarda Rüzgar Etkilerinin Rüzgar Tüneli Deneyleriyle Tespiti

Bina daha küçük derinliğe sahip olduğu durumda, rüzgara daha büyük bir direnç göstermektedir. Bu çalışmada D/B oranının 0,75'den 1,33'e yükselmesi, sürüklenme katsayısında %21'lik bir azalmaya yol açmıştır. Ayrıca Şekil 13'te görülen, sürüklenme katsayısının 0° ila 45° arasında bir minimumdan geçmesi de Sakamoto [26] tarafından sunulan sonuçlarla uyumludur. Bu karakteristiğin fiziksel sebepleri ve akış kopma bölgesinin açı ile nasıl değiştiği Lee [27] tarafından detaylıca anlatılmıştır.

Farklı rüzgar vuruş açıları için rüzgarla aynı ve rüzgara dik yönlerdeki güç yoğunluk spektrumları ise Şekil 15'de gösterilmiştir. Rüzgar vuruş açısının rüzgar-yapı etkileşimine olan etkisi en çok rüzgara dik yöndeki salınımlarda kendini göstermektedir. Rüzgar 0° 'den vurduğunda, diğer bir deyişle D/B oranı 0,75 olduğu durumda, rezonant momentlerdeki büyüme en çoktur. D/B oranı büyüdükçe (90° vuruş açısı için D/B oranı 1,33) periyodik girdap etkisinin rezonans etkisi azalmakta, tepe noktasının bant genişliği artmaktadır. Binaya rüzgar 30° ve 60° 'den etkilediği durumda rüzgar akışı ilk olarak dikdörtgen kesitli binanın ön köşesine çarpıp ikiye bölünmekte ve bu durum rüzgar-bina etkileşimini azaltmaktadır. Periyodik girdap bu iki açı için de etkili olup binayı rezonansa soksa da, rezonans etkisi 0° ve 90° 'ye nazaran daha küçük kalmaktadır. Rüzgarla aynı yöndeki sonuçlarda da benzer bir durum göze çarpmaktadır. Özetle dikdörtgen kesite sahip bir bina için en kritik vuruş açısı, rüzgarın bina yüzeylerine dik olarak estiği durumdur.



Şekil 15: Farklı Rüzgar Vuruş Açıları için Güç Yoğunluk Spektrumları

Azami Taban Momentleri

Ankara Rüzgar Tüneli'nde gerçekleştirilen deney sonucunda, örnek binaya C sınıfı rüzgar profilinde 0° 'den rüzgar etkitildiği durum için hesaplanan taban momentleri ve aynı bina için farklı yönetmelikler kullanılarak hesaplanan taban momentleri Tablo 4'de gösterilmiştir.

Ayrıca NATHAZ [20] etkileşimli veritabanı kullanılarak hesaplanan taban momentleri de Tablo 4'e eklenmiştir. NATHAZ etkileşimli veritabanı, çeşitli yükseklikte ve farklı bina kesitleri için yaklaşık eşdeğer rüzgar yüklerini, çatı deplasman ve ivmelerini hesaplamaktadır. NATHAZ ve ASCE 7-05'e göre rüzgar hızı hesabında 10 m yükseklikte 3 saniyelik ortalama rüzgar hızını kullanmaktadır. Bu iki yaklaşıma göre yapılan hesaplarda rüzgar hızı 40 m/saniye alınmıştır. ART hesabı için Denklem 17 kullanılarak hesaplanan ortalama moment 1 saatlik ortalama rüzgar hız profiline kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla yine ASCE 7-05'de tanımlanan 1 saatlik ortalama hız profili kullanılmıştır. IYBRY ve EuroCode 1 ise hesaplarda 10 m yükseklikte 10 dakikalık ortalama rüzgar hızını temel almaktadır. Dolayısıyla 3 saniyelik ortalama rüzgar hızı ASCE 7-05'deki dönüştürme katsayıları kullanılarak 10 dakikalık ortalama hıza dönüştürülmüş ve hesaplarda 28 m/saniyelik rüzgar hızı kullanılmıştır. Bunların yanı sıra ASCE 7-05'de tanımlanan C sınıfı rüzgar profiline tam karşılığı IYBRY ve EuroCode 1'de bulunmamaktadır. Bu sebepten dolayı C sınıfı rüzgar profiline en yakın profil olan II.sınıf profil IYBRY ve EuroCode 1 hesaplarında kullanılmıştır.

Tablo 4: Azami Taban Momentleri

	M_x	M_{x_a}	M_{x_r}	M_x	M_y	M_{y_a}	M_{y_r}	M_y
ART	1,917	1,182	0,512	3,206	0,000	1,635	1,104	1,937
NATHAZ	1,914	0,788	0,889	3,102	0,000	1,104	2,502	2,735
ASCE7-05	-	-	-	3,112				
IYBRY	-	-	-	3,925				
EuroCode I	-	-	-	3,835				

Birimler 10⁶ kN.m cinsindedir

Rüzgarla aynı yöndeki taban momentleri incelendiğinde ART, NATHAZ ve ASCE 7-05 sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülecektir. Bu durum her üç yaklaşımda da aynı rüzgar hız profiline kullanılması ve incelenen binanın dikdörtgen prizma şekline sahip olmasının doğal bir sonucudur. Diğer taraftan ART ve NATHAZ'a göre hesaplanan arkapan ve rezonant moment bileşenlerinde farklılıklar da göze çarpmaktadır. ART sonuçlarında arkapan etkisinin daha yüksek olmasının sebebi akışın türbülans yoğunluğunun NATHAZ deneylerine göre daha yüksek olması ve kullanılan örnek bina kesitinin boyutlarının NATHAZ'dakinden iki kat daha büyük olmasıdır. Türbülans etkisinin daha büyük olması bina-rüzgar etkileşimini azaltmış ve bu sebepten dolayı da rezonant moment bileşeni NATHAZ'a göre daha küçük kalmıştır. Ancak bu iki bileşendeki farklılık toplam taban momentine yansımamıştır. Rüzgara dik yöndeki taban momentlerinde de benzer bir durum söz konusudur.

IYBRY ve EuroCode 1'e göre hesaplanan taban momentleri birbirlerine yakın olsalar da gerek rüzgar tüneli deneyi, gerekse ASCE 7-05 sonuçlarından yaklaşık %20 daha büyüktür. Bu durum kullanılan rüzgar hız profillerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. Her üç yönetmelik de sadece rüzgarla aynı yöndeki taban momentlerini hesaplatmış, rüzgara dik

yöndeki moment etkisini yük durumları ve kombinasyonlarıyla ele almıştır. Rüzgarın binayı rezonansa sokmadığı durumlar için bu yaklaşım güvenli tarafta kalmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kısa deney odası boyutlarına kesitine sahip Ankara Rüzgar Tüneli'nde yüksek binalardaki rüzgar etkilerinin tespiti için sıkça kullanılan yüksek frekanslı taban balans yöntemiyle bir seri deney gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla tünel içi hız profillerinin oluşturulması için yüzey pürüzleri tasarlanmış ve oluşan hız profilleri hem sayısal hem de deneysel olarak sınanmıştır. Daha sonra örnek dikdörtgen prizma şeklindeki bina modeli, farklı hız profilleri ve farklı rüzgar vuruş açıları için test edilmiş ve rüzgarın bina üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışma sonrasında aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Rüzgar tüneli deneyleri sırasında tünel içi hız profili ve akışın türbülans özelliklerinin sonuçlara olan etkisi göz ardı edilemeyecek kadar büyüktür. Dolayısıyla, rüzgar tüneli deneyleri sırasında binanın yapılacağı bölgedeki rüzgar koşulları gerçeğe olabildiğince yakın oluşturulmalıdır. Elde bölgeye ait rüzgar verisi bulunmadığı durumlar için ülke rüzgar yönetmelikleri hız profiline yanı sıra türbülans yoğunluğu tanımlamalarını da içermelidir.
- Günümüz hesaplama teknolojisinin geldiği noktada, türbülanslı rüzgar akışını kabul edilebilir bir hata payıyla sayısal çözümlemesinin yapılması mümkün olamayabilmektedir. Her ne kadar hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlemeleri sonuç hakkında bir fikir verse de, asıl güvenilir sonuçlar deneylerden elde edilmelidir.
- Rüzgar-bina etkileşimi üç bileşenle incelenebilir: Ortalama, arkaplan ve rezonant momentler. Ortalama moment ortalama rüzgar hızının yarattığı statik kuvveti temsil etmekte ve sürüklenme katsayısı bilinen herhangi bir kesit için kolayca hesaplanabilmektedir. Arkaplan ve rezonant momentler ise rüzgarın dinamik etkilerinin bir sonucu olup, arkaplan etkisi rüzgarın içerdiği türbülans miktarına, rezonant moment ise bina salınımlarıyla rüzgar arasındaki etkileşime bağlıdır.
- Dikdörtgen kesitli bir binada rüzgar etkisi binanın en-boy oranına göre değişmektedir. Binanın rüzgarla aynı yöndeki boyutuyla rüzgarın çarptığı yüzeyin genişliği arasındaki oran büyüdükçe rüzgarın bina üzerindeki etkisi azalmaktadır.
- Dikdörtgen kesitli bir binada, rüzgarın esiş yönüne dik yönde periyodik girdap oluşmakta ve bu sebepten dolayı bina dik yönde ciddi momentlere maruz kalabilmektedir. Özellikle bina doğal salınım frekansıyla, periyodik girdap frekansının birbirine yakın olduğu durumlarda bina çok ciddi momentlere maruz kalabilmektedir.
- Rüzgarın türbülans yoğunluğu arttıkça periyodik girdap etkisinde bir azalma gözlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma ODTÜ BAP 07.02.2009.06 kod numaralı proje tarafından desteklenmiştir. Ayrıca TÜBİTAK SAGE'ye bağlı Ankara Rüzgar Tüneli ekibine projeye verdikleri destek için teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Alan G. Davenport (2002) "Past, Present and Future of Wind Engineering", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90 1371-1380
- [2] ASCE 7-05 (2005) "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", American Society of Civil Engineers.
- [3] Cermak, J. E., (2003), "Wind Tunnel Developments and Trends in Applications to Civil Engineering", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91 355-370.
- [4] Cook, N.J, (1973), "On Simulating the Lower Third of the Urban Adiabatic Boundary Layer in a Wind Tunnel", Atmos. Environ. Vol.7 P:691-705.
- [5] Emil Simiu and Robert H. Scanlan (1978) "Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering", 111-171, 247-343
- [6] Eurocode 1 (2005) "Actions on structures: Part1-4 General actions: Wind actions
- [7] Gary C. Hart, John D. Ragget, Sampson Huang and Suzanne Dow (1983) "Structural Design Using a Wind Tunnel Test Program and a Risk Analysis", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 14 27-36
- [8] H.P Irwin, (1981), "The Design of Spires for Wind Simulation", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 7 p: 361-366.
- [9] "İstanbul Yüksek Binalar Rüzgar Yönetmeliği", (2008), Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi Çengelköy, İstanbul. Versiyon IV.
- [10] Jack E. Cermak, (1995) "Progress in Physical Modeling for Wind Engineering ", Journal of Wind Engineering, 55 439-455
- [11] John D. Holmes (2007) "Wind Loading of Structures"
- [12] Leighton Cochran (2006) "State of the Art Review of Wind Tunnels and Physical Modelling to Obtain Structural Loads and Cladding Pressures", Architectural Science Review, 49 7-16
- [13] Y. Ohya, (2001), "Wind- tunnel Study of Atmospheric Stable Boundary layer over a Rough Surface", Boundary-Layer Meteorology Vol. 98 P: 57-82.
- [14] P. Mendis, T. Ngo, N. Haritos, A. Hira, B. Samali and J. Cheung (2007) "Wind Loading on Tall Buildings", Ejs International, Ejs Special Issue 2007
- [15] Paul H. Wirsching, Thomas L. Paez and Keith Ortiz (1995) "Random Vibrations"

- [16] Scott Gamble (2003) "Wind Tunnel Testing", STRUCTURE Magazine, November 24-27
- [17] S.M. Nima Shojaee, Bengi Kayışoğlu, Oğuz Uzol & Özgür Kurç (2009) "Design and Analysis of Passive Devices for Atmospheric Boundary Layer Simulation in a Short Aeronautical Wind Tunnel", 6th Ankara International Aerospace Conference.
- [18] T. Tschanz and A.G. Davenport (1983) "The Base Balance Technique for the Determination of Dynamic Wind Loads", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 13 429-439
- [19] Yin Zhou, Tracy Kijewski and Ahsan Kareem (2003) "Aerodynamic Loads on Tall Buildings: Interactive Database", Journal of Structural Engineering, 129 No.3
- [20] NATHAZ Interactive Database, <http://aerodata.ce.nd.edu>
- [21] Ankara Rüzgar Tüneli, <http://www.sage.tubitak.gov.tr/aerodinamik/art.asp>
- [22] TS 498, Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, (1997)
- [23] ANSYS Fluent, <http://www.ansys.com>
- [24] X. Chen and A. Kareem, (2005) "Coupled Dynamic Analysis and Equivalent Static Wind Loads on Buildings with Three-Dimensional Modes", ASCE Journal of Structural Engineering, 1071-1082
- [25] Y. Zhou And A. Kareem, (2001)"Gust Loading Factor: New Model", ASCE ASCE Journal of Structural Engineering, 168-175
- [26] H. Sakamoto, (1985) "Aerodynamic Forces Acting on a Rectangular Prism Placed Vertically in a Turbulent Boundary Layer," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 18, 131—151.
- [27] B.E. Lee, (1975) "The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism", J. Fluid Mech., 69 (1975) 263--282.