

RÜZGÂRA DAYANIKLI YAPILARIN OPTİMUM TASARIMI

Soner SEZER¹, Murat HİÇYILMAZ², Hakan ÖZBAŞARAN^{3*}

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. ABD., Eskişehir/Türkiye
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8116-3837>

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Afyonkarahisar/Türkiye
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-4132-4285>

³Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir/Türkiye
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-1959-5297>

Anahtar Kelimeler	Öz
Rüzgâr Yükleri Optimizasyon Aerodinamik Yapısal Optimizasyon Sönümleyici	<i>Elverişsiz mimari formlar ve gelişen teknoloji ile birlikte artan yapısal donanımlar yapıları rüzgâra karşı daha hassas hale getirmektedir. Bu durum önceleri diğer yüklerle birlikte değerlendirilen rüzgâr etkilerinin artık majör etki olarak kabul edildiği "Rüzgâra Dayanıklı Yapı Tasarımı" (RDYT) alanına olan ilgiyi günden güne arttırmaktadır. RDYT metodolojileri oldukça karmaşık optimizasyon problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada RDYT alanında yapılan optimizasyon çalışmalarının incelenmesi amaçlanmıştır. Literatür incelendiğinde konunun aerodinamik şekil optimizasyonu, rüzgâr etkisi altında yapısal optimizasyon ve sönümleyici sistemler ile rüzgâra dayanıklı optimum tasarım olmak üzere üç alt başlıkta incelenebileceği görülmüştür. Bu bağlamda algoritma tabanlı optimizasyon süreci içeren temel ve güncel çalışmalar tespit edilerek incelemeleri sunulmuştur.</i>

OPTIMUM DESIGN OF WIND RESISTANT STRUCTURES

Keywords	Abstract
Wind Loads Optimization Aerodynamic Structural Optimization Damper	<i>Inappropriate architectural forms and increasing structural equipment with developing technology make the buildings more sensitive to the wind. This situation increases the interest in the field of wind resistant structure design (WRSD) which wind effects are considered as the major effects day by day. WRSD methodologies pose highly complex optimization problems. In this study, it is aimed to review the optimization studies in the field of WRSD. When the literature is examined, it has been seen that the subject can be examined under three sub-titles: aerodynamic shape optimization, structural optimization and optimization with the damping systems. In this context, fundamental and current studies that include algorithm-based optimization process are determined and their reviews are presented.</i>

Derleme Makale	Review Article
Başvuru Tarihi : 04.07.2022	Submission Date : 04.07.2022
Kabul Tarihi : 04.04.2023	Accepted Date : 04.04.2023

1. Giriş

Nüfusun belirli bölgelerde toplanması, yapı malzemeleri alanındaki teknolojik gelişmeler ve yenilikçi mühendislik tasarım prosedürlerinin neticesinde

yüksek binaların sayısının global ölçekte sürekli arttığı bilinmektedir (Momtaz, Abdollahian ve Farshidianfar, 2017). Yüksek mukavemetli hafif yapı malzemelerinin kullanımının yaygınlaşması, artan bina yükseklikleri,

* Sorumlu yazar; e-posta: ozbasaran@ogu.edu.tr



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

estetik kaygılar ile sunulan düzensiz yapısal tasarımlar gibi etkilerin bir sonucu olarak yapısal sistemler rüzgâr etkilerine karşı daha duyarlı hale gelmektedir. Öyle ki belirli bir yükseklik aşıldığında, rüzgâr kuvvetlerinin majör yatay etkiyi oluşturduğu düşünülen deprem kuvvetlerinden de daha etkin olduğu bilinmektedir (Huang ve diğ., 2015). Bu durum kullanıcı konforunun düşmesi, yapısal olmayan eleman hasarları ve yapı elemanlarında hasarlara kadar geniş bir risk yelpazesine neden olmaktadır (Folley, 2002). Rüzgâr etkileri sadece yüksek binalar için değil, rüzgâra maruz bölgelerde hizmet vermesi gereken pek çok yapı için çeşitli riskler oluşturmaktadır.

Rüzgâr etkilerinin öneminin artmasıyla birlikte yapısal optimizasyon alanındaki çalışmalar da bu değişimden etkilenmiştir. Daha önceden rüzgâr etkileri diğer yükler ile birlikte değerlendiriliyorken günümüzde “Rüzgâra Dayanıklı Optimum Yapı Tasarımı (RDOYT)” kavramı ile yeni bir boyut kazandırılmıştır. Bu kavram doğrultusunda, rüzgâr etkileri majör yük olarak kabul edilerek optimizasyon prosedürleri yürütülmektedir. Bu çalışmada literatürde bulunan RDOYT konulu

çalışmaların incelenmesi amaçlanmıştır. Literatür incelendiğinde RDOYT sürecinin üç ana başlık altında ele alınabileceği görülmüştür. Bu başlıklar Aerodinamik Şekil Optimizasyonu (AŞO), Rüzgâr Etkisi Altında Yapısal Optimizasyon (REAYO) ve Sönümleyici Sistemler ile Rüzgâra Dayanıklı Optimum Tasarım (SSRDOT) olarak belirlenmiştir. AŞO çalışmalarının temel amacı yapıya etkileyen rüzgâr yüklerini minimize etmektir. REAYO uygulamalarında ise optimum yanal rijitlik dağılımı ile ilgili kısıtları sağlayan en ekonomik yapısal sistem aranmaktadır. SSRDOT üzerine yapılan çalışmalarda ise optimum sönümleyici parametreleri ve optimum sönümleyici yerleşimi ile yapıda oluşan rüzgâr kaynaklı tepkilerin azaltılması amaçlanmaktadır.

2. Araştırma Metodolojisi ve Bulgular

Literatürdeki rüzgâra dayanıklı optimum yapı tasarımı alanındaki çalışmalara ulaşmak için Scencedirect, Web of Science, Reserchgate, Acedemia ve Google Scholar gibi veri tabanlarından Tablo 1’de sunulan anahtar kelime grupları için taramalar yapılmıştır.

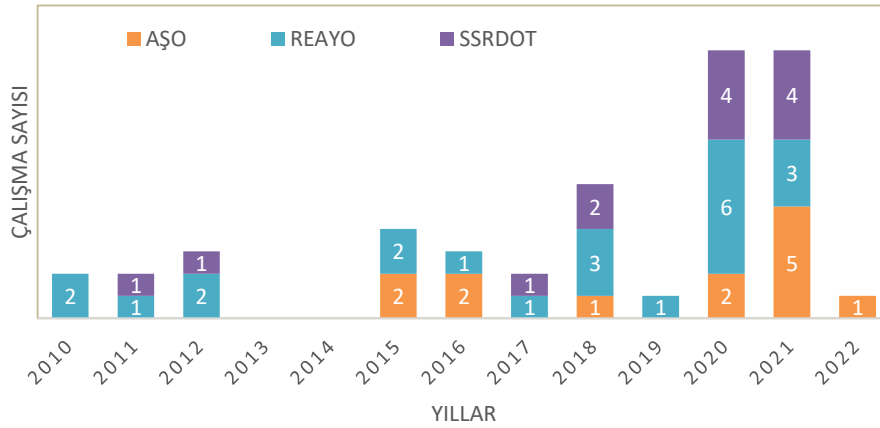
Tablo 1

Anahtar Kelime Grupları

aerodynamic, optimization, building	wind, optimization, structural control
aerodynamic shape optimization, building	wind, parameter optimization, damping systems
aerodynamic building design, optimum	wind induced response optimization, buildings
aerodynamic, wind load, minimization	wind induced vibration control, optimum
aerodynamic mitigation, building, optimization	wind induced, optimum, building
wind, optimization, building	wind resistant, structural optimization
wind, optimization, structures	wind resistant, optimization, damper
wind, optimization, buildings, damper	wind response mitigation, buildings, optimum
wind, vibration control, structural, optimization	wind resistant design optimization, structure
wind, buildings, damper, optimum	wind effect minimization, buildings

Kaynak taraması neticesinde ulaşılan çalışmalardan yalnızca algoritma tabanlı bir optimizasyon metodolojisi barındıranlar ele alınmıştır. Dolayısıyla deneme-yanılma metodolojilerini takip eden çalışmalar bu incelemenin kapsamının dışındadır. İncelenecek çalışmalar seçilirken, belirli bir stratejinin sunulduğu

temel çalışmalara ve erişilebilen güncel çalışmalara odaklanılmıştır. Bu bağlamda incelenen çalışmaların yıllara ve konulara göre dağılımları Şekil 1’de sunulmuştur. Kaynak taraması yapılırken 2013 ve 2014 yıllarında belirtilen nitelikleri taşıyan herhangi bir çalışmaya ulaşılamamıştır.

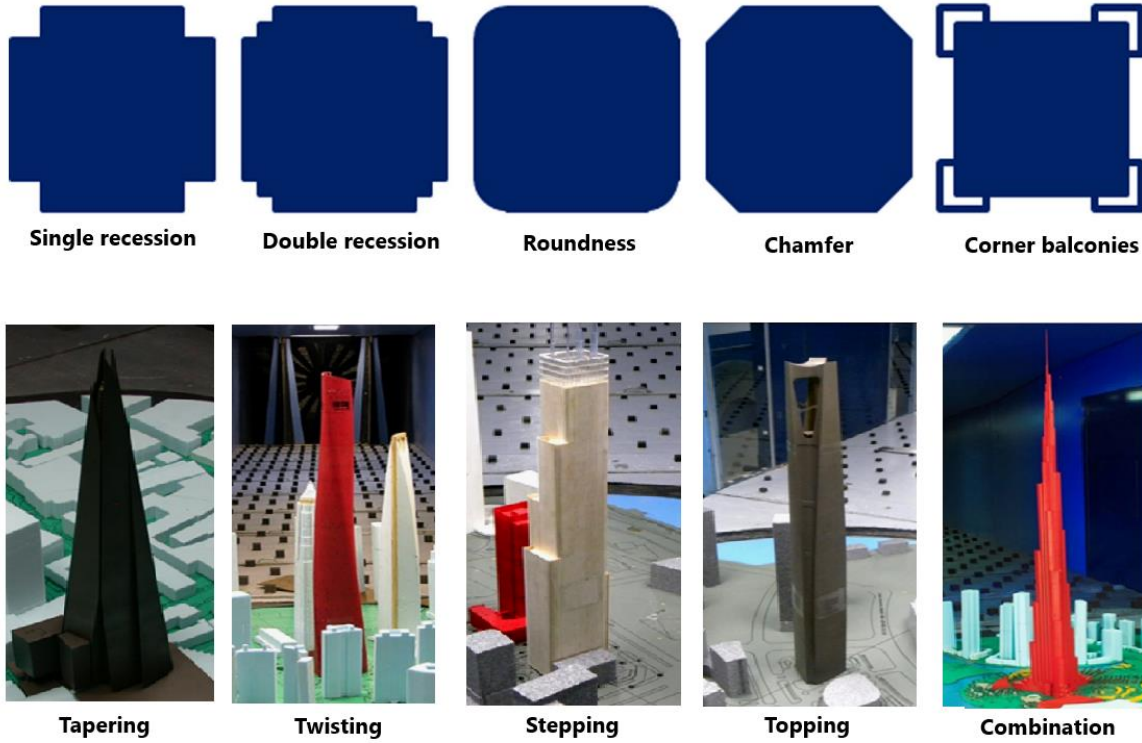


Şekil 1. İncelenen Çalışmaların Yıllara ve Konulara Göre Dağılımları

3. Aerodinamik Şekil Optimizasyonu (AŞO)

AŞO havacılık, uzay, otomotiv, enerji ve savunma gibi pek çok sanayi kolu için uygulanan bir metodolojidir. Buradaki temel amaç sistem üzerine gelen rüzgâr etkilerinin minimize edilmesidir. Yöntem yapı sistemleri için de adapte edilerek ön tasarım aşamasında yapıların rüzgârla etkileşiminin azaltılması, cephe sistemlerinin rüzgâr etkilerini minimize edecek şekilde konumlandırılması, akıllı cephe sistemleri ile bina geometrisinin rüzgâr etkilerini azaltacak şekilde anlık olarak değiştirilmesi gibi alt alanlarda çalışmalar yürütülmüştür. Her ne kadar yapı mühendisliğinden çok mimarlık disiplininin alanına girse de rüzgâra dayanıklı optimum yapısal tasarımın ilk halkası olması bakımından oldukça önemlidir zira yapı mühendisliği var olan rüzgâr etkileri altındaki optimum yapısal sistemi bulmayı hedeflerken AŞO var olan rüzgâr etkilerini azaltmayı amaç edinmektedir.

Xie (2014) tarafından yapılan çalışmada, kritik yükün rüzgâra karşı cephede oluştuğu ve bu yükü azaltmak için benimsenebilecek iki temel yaklaşım bulunduğu belirtilmiştir. Bu yaklaşımlar planda ve düşey doğrultuda şekil değişikliği olarak ifade edilmiştir. Planda değişiklik için köşe optimizasyonu, planın genel olarak revize edilmesi, planda boşluklar açılması gibi yöntemler; düşey doğrultuda değişiklik için ise sivriltme, bükme, kademeleme ve üst katlarda boşluk bırakma gibi yöntemler örnek verilmiştir. Belirtilen yöntemlerin tek başına uygulanması yerine birlikte uygulanması ile verimin artabileceği ifade edilmiştir. Örnek olarak verilen planda ve düşey doğrultuda optimizasyon stratejileri Şekil 2'de gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca yükseklik boyunca yapılan değişikliklerin etkilerini incelemek için matematiksel bir tahmin modeli önerilmiştir.



Şekil 2. AŞO için Sunulan Bazı Stratejiler (Xie, 2014)

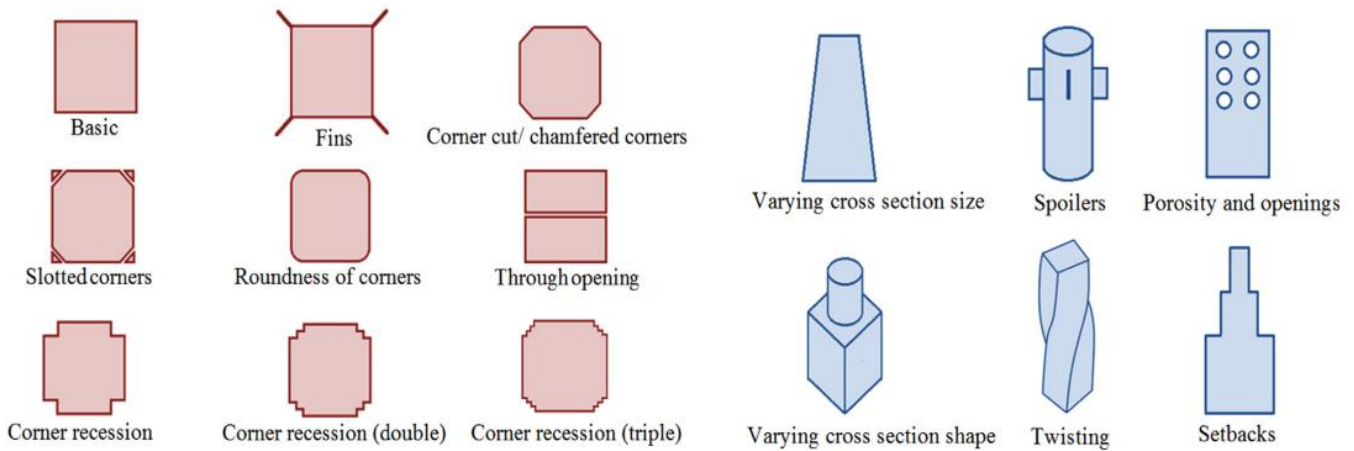
Bernardini, Spence, Wei ve Kareem (2015) tarafından yapılan çalışmada bina türü yapılarda evrimsel algoritmalar ile AŞO yürütülmesi için yenilikçi bir metodoloji sunulmuştur. AŞO problemlerinin pek çok lokal minimumu bulunduğu için gradyan tabanlı algoritmalarla çözümünün global optimuma ulaşılma ihtimalini güçleştirdiği ifade edilmiştir. Bu sebeple çalışmada geliştirilmiş bir genetik algoritma türevi olan NSGA-II tercih edildiği belirtilmiştir. Seçilen algoritmanın global optima yakınsama bakımından daha başarılı sonuçlar sunacağı açıkken, gradyan tabanlı algoritmaların aksine çok daha fazla iterasyon gerektirdiği bildirilmiştir. Çok fazla sayıda analiz gerektiren bu optimizasyon sürecinin mevcut işlem gücü ile gerçekleştirilmesinin mümkün olmadığı ifade edilmiştir. Buradan hareketle hesaplama maliyetini düşürmek amacıyla Simple Kriging (Basit Krigleme) yöntemi ile bir vekil model önerilmiş ve kullanılabilirliği araştırılmıştır. Önerilen optimizasyon stratejisinin uygulanabilirliğini test etmek amacıyla silindirik yüksek bir binanın plan düzleminde AŞO uygulanmıştır. Optimizasyon için ortalama sürüklenme katsayısı ve kaldırma katsayısındaki standart sapma amaç fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, vekil model sayesinde normalde yapılması gereken hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonlarının sadece %0.75'ine ihtiyaç duyulduğu,

vekil modelin algoritmanın optimumu bulmadaki performansına engel olmamakla birlikte gerçek değerlerden belirli oranda saptığı ve bu sapmaların azaltılması için başka vekil modelleme yöntemleri ile çalışmalar yapılması gerektiği ifade edilmiştir.

Elshaer, Bitsuamlak ve El Damatty (2015) tarafından yapılan çalışmada binaların köşe şekillerini değiştirmek suretiyle AŞO yapılan bir yöntem sunulmuştur. Rüzgâr etkilerinin ortaya konması için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemine dayanan bir Yapay Sinir Ağı (YSA) eğitilerek vekil model oluşturulmuştur. Optimizasyon için Genetik Algoritma (GA) tercih edilmiştir. Sürüklenme katsayısı amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. İki adet vaka çalışmasının optimizasyonu sunulmuştur. İlk örnekte rüzgâr etkilerinin hesaplanmasında vekil model kullanılmazken ikinci örnekte YSA ile oluşturulan vekil model sürece dahil edilmiştir. Optimize edilen vaka çalışmasının neticesi olarak amaç fonksiyonunda %45'e varan azalmalar tespit edildiği raporlanmıştır. İkinci örnekte ise vekil model sayesinde hesaplama maliyetinin ciddi oranda azaldığı ve benzer sonuçlara ulaşıldığı ifade edilmiştir. Sonuç olarak GA ile köşe optimizasyonunun başarılı bulunduğu, YSA tabanlı vekil modelin hesaplama maliyetini azaltmak için oldukça işlevsel olduğu bildirilmiştir.

Elshaer, Bitsuamlak ve El Damatty (2016) tarafından yapılan çalışmada binaların helisel bükülmesi ve köşe modifikasyonuna dayalı bir AŞO uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulanan metodoloji Elshaer ve diğ. (2015) tarafından sunulan yöntemle dayanmaktadır. Amaç fonksiyonu olarak rüzgâra karşı cephede oluşan normalize edilmiş moment katsayısı seçilmiştir. Tasarım değişkenleri bina geometrisini karakterize eden parametrelerdir. Sonuç olarak amaç fonksiyonunun kare kesite göre %45 azaldığı; YSA ile sağlanan vekil modelin, optimizasyon algoritması işletilirken hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinin çalıştırılmasına olan ihtiyacı ortadan kaldırdığı ve hesaplama maliyetini düşürdüğü ifade edilmiştir.

Mooneghi ve Kargarmoakhar (2016) tarafından yapılan çalışmada planda ve düşey doğrultuda bina şekli değiştirilerek ya da basit mimari elemanlar eklenerek rüzgâr etkilerinin azaltılmaya çalışıldığı optimizasyon çalışmaları incelenmiştir. Bu bağlamda alçak ve yüksek binalara uygulanabilecek aerodinamik yöntemler ele alınmıştır. Optimizasyon çalışmaları gradyan tabanlı olanlar ve olmayanlar olarak sınıflandırılarak sunulmuştur. Xie (2014) tarafından yapılan çalışmada sunulan stratejilere benzer şekilde planda ve düşey doğrultu boyunca uygulanabilecek stratejiler derlenerek Şekil 3'te gösterildiği gibi sunulmuştur.



Şekil 3. AŞO Stratejileri (Mooneghi ve Kargarmoakhar, 2016)

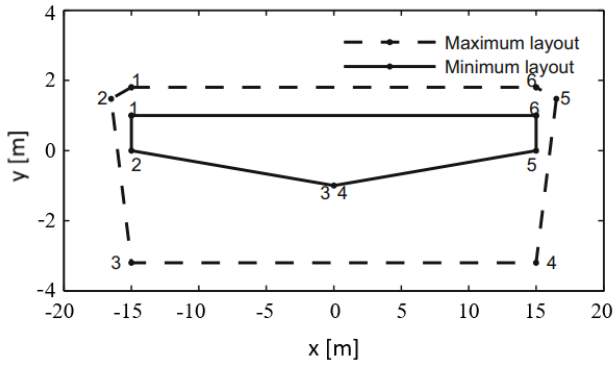
Sonuç olarak, binanın şeklindeki değişiklikler ile rüzgâr etkileşiminin büyük ölçüde değişebildiği ve gradyan tabanlı olmayan optimizasyon algoritmalarının gradyan tabanlı algoritmalara göre daha yüksek hesaplama maliyetleri olsa da global optimuma yakınsama ihtimallerinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Gradyan tabanlı olmayan algoritmalar, çok sayıda iterasyon ile sonuca ulaştığından hesaplamalı akışkanlar dinamiği tekniklerinin yüksek maliyetinin ciddi bir zorluğu gündeme getirdiği belirtilmiştir. Bu zorluğun aşılması için vekil modellerin kullanılacağı ifade edilmiştir.

Ding ve Kareem (2018) tarafından yapılan çalışmada aerodinamik şekil optimizasyonunda kullanılmak üzere doğruluğu yüksek bir vekil model geliştirilmesi amaçlanmıştır. Vekil modelleme için hesaplama maliyeti ve doğruluğu düşük bir HAD simülasyonu olan RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) ve hesaplama maliyeti ile birlikte doğruluğu da yüksek olan LES (Large Eddy Simulation) yöntemlerinden elde edilen ortak veri kullanılmıştır. Önerilen yöntemde düşük hesaplama maliyetleri ile yüksek doğruluğa ulaşılmaya çalışılmıştır. Optimizasyon için gelişmiş bir genetik algoritma türevi

olan NSGA-II kullanılmıştır. Elde edilen vekil model daha önce Bernardini ve diğ. (2015) tarafından optimize edilmiş probleme uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Önerilen vekil model yönteminin yüksek doğrulukla başarılı sonuçlar ürettiği bildirilmiştir.

Jaouadi, Abbas, Morgenthal ve Lahmer (2020) tarafından yapılan çalışmada köprü tabliyeleri için AŞO sunulmuştur. Rüzgâr etkileri bir HAD simülasyonu olan girdap parçacık metoduna dayanan Krigleme vekil modeli vasıtasıyla hesaplanmıştır. Optimizasyon için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) yöntemi kullanılmıştır. Tasarım değişkenleri köprü tabliyesinin geometrisini karakterize eden parametrelerdir. İlgili tasarım uzayı Şekil 4'te gösterilmiştir. Amaç fonksiyonları sürüklenme, kaldırma ve moment etkilerine sebep olan üç farklı statik rüzgâr katsayısı olarak belirlenmiştir. İlgili amaç fonksiyonlarının ortalamasının optimize edildiği tek amaç fonksiyonlu basit bir yaklaşım ve amaç fonksiyonlarının aynı anda optimize edildiği daha gelişmiş bir yöntem ile sabit ve farklı rüzgâr hücum açıları için çeşitli optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak çok amaçlı

optimizasyon yönteminin daha başarılı olduğu ifade edilmiştir.



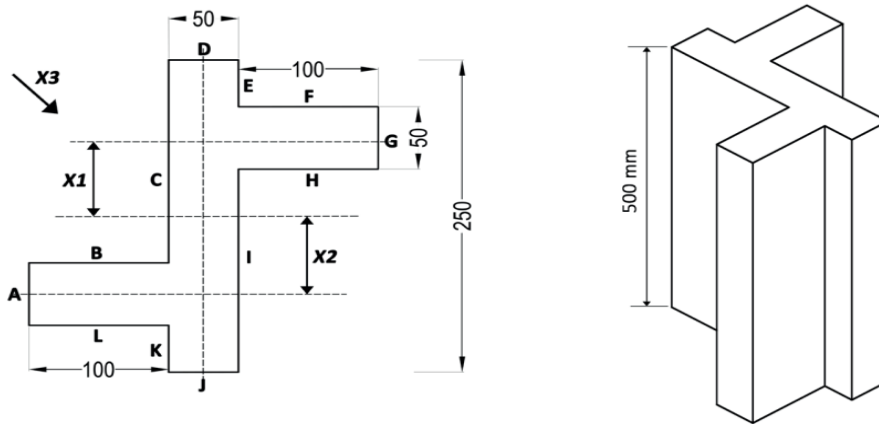
Şekil 4. Jaouadi ve diğ. (2020) Tarafından Optimize Edilen Köprü Tabliyesi

Zhang, Waibel ve Wortmann (2020) tarafından yapılan çalışmada Grasshopper yazılımında bulunan Opossum optimizasyon aracının içindeki RBFOpt ve CMA-ES yöntemleri kullanarak bir binanın düşey doğrultu boyunca aerodinamik şekil optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Düşey doğrultu boyunca seçilen yedi bölgenin çapı tasarım değişkenlerini oluşturmaktadır. Rüzgâr kaynaklı maksimum yer değiştirme amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Seçilen iki optimizasyon yöntemin de hesaplama maliyeti yüksek problemler için verimli sonuçlar ürettiği belirtilmiştir. Rüzgâr etkileri için doğruluk ve maliyette görece yüksek HAD ve doğruluk ve maliyette görece düşük FFD (Fast Fluid Dynamics) olmak üzere iki farklı simülasyon kullanılmıştır. Sonuç olarak; AŞO ile maksimum yer değiştirmenin %67'ye varan oranda azaldığı, amaç fonksiyonu hesaplanırken FFD yönteminin sekiz kat daha hızlı olmasına karşılık

doğrulukta %1 oranında feragat ettiği, dolayısıyla optimizasyon için çok daha uygun olduğu ve RBFOpt ile yapılan optimizasyonun CMA-ES'ten çok daha hızlı olduğu bildirilmiştir.

Li, Snaiki ve Wu (2021) tarafından yapılan çalışmada Derin Pekiştirmeli Öğrenme (DPÖ) ile rüzgâra duyarlı yapılar için AŞO prosedürü önerilmiştir. Önerilen yöntemde yüksek maliyetli HAD simülasyonlarından alınan sonuçlar kullanılarak daha düşük maliyetli HAD simülasyonlarının sonuçları iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu sayede daha doğru sonuçlara daha hızlı şekilde ulaşan bir sistem oluşturulup hesaplama maliyetinin azaltılması hedeflenmiştir. Sunulan optimizasyon prosedürü gradyan tabanlı (Dereceli Azalma) ve gradyan ihtiyacı olmayan (PSO) iki algoritma ile karşılaştırılmıştır. Bir bina kesiti üzerinde yapılan vaka çalışmasının sonucu olarak, önerilen hesaplama maliyeti düşürme prosedürünün başarımı büyük oranda arttırdığı, sunulan optimizasyon metodolojisinin gradyan tabanlı ve gradyan bilgisine ihtiyaç duymayan diğer iki algoritmadan daha başarılı bulunduğu ifade edilmiştir.

Paul ve Dalui (2021) tarafından yapılan çalışmada dikdörtgen kesitli çıkıntılı bir bina için AŞO yapılmıştır. Optimize edilen model Şekil 5'te sunulmuştur. Optimizasyon algoritması olarak GA tercih edilmiştir. Binanın farklı cephe yüzeylerindeki dış basınç katsayıları amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Çıkıntılı konumu ve rüzgâr geliş açısı tasarım değişkenleridir. Rüzgâr etkilerini değerlendirmek için yanıt yüzey yöntemiyle HAD simülasyonlarına dayanan bir vekil model oluşturulmuştur. Çalışmanın özgün değerinin optimize edilen bina şeklinin aykırılığında kaynaklandığı bildirilmiştir. Optimizasyon neticesinde ulaşılan tasarımların kullanılabilir ve başarılı sonuçlar olduğu belirtilmiştir.

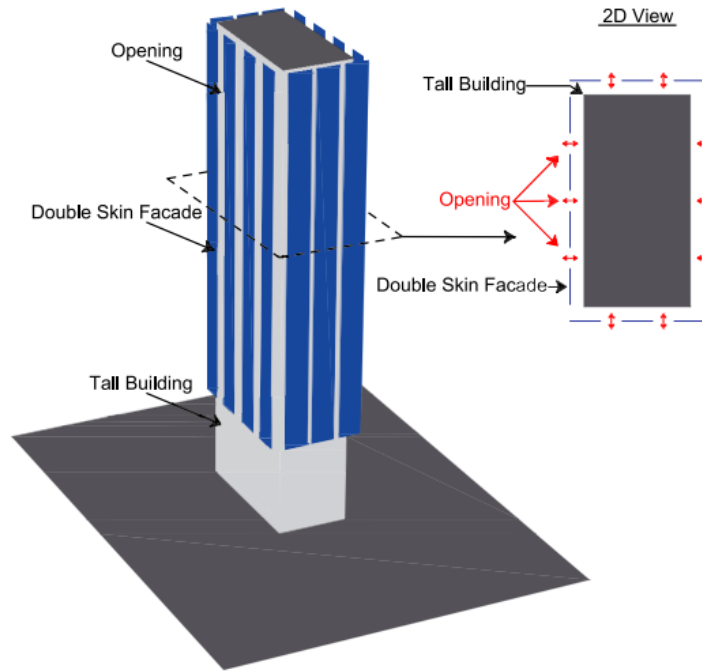


Şekil 5. Paul ve Dalui (2021) Tarafından Optimize Edilen Çıkıntılı Bina Modeli

Qiu, Yu, San ve Li (2022) tarafından yapılan çalışmada geniş açıklıklı çatı yapıları için AŞO uygulaması sunulmuştur. Rüzgâr etkilerinin belirlenmesi için HAD simülasyonlarına dayalı bir vekil model kullanılmıştır. Vaka çalışması olarak geniş açıklıklı kömür hangarları seçilmiştir. Tasarım değişkenleri yapının geometrisini karakterize eden iki parametreden oluşmaktadır. Amaç fonksiyonu rüzgâr yönüne bağlı maksimum düşey yer değiştirmedir. Optimizasyon için GA kullanılmıştır. Uygulanan vekil model destekli optimizasyon stratejisinin rüzgâr etkilerini büyük oranda azaltarak başarı sağladığı belirtilmiştir.

AŞO alanındaki yeni yaklaşımlardan birisi de cephe sistemleri ile rüzgâr etkilerinin azaltılmaya

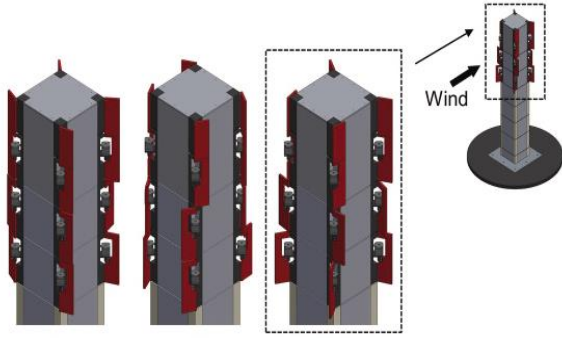
çalışılmasıdır. Bu yaklaşım hem mevcut binalara uygulanabilirliği hem de mimari tasarımlarda majör değişikliklere yol açmadan adapte edilebilir olması ile çeşitli avantajlar sunmaktadır. Jafari ve Alipour (2021) tarafından yapılan çalışmada çift cidarlı cephe sistemlerinin optimum yerleşimi ile AŞO sunulmuştur. Cephe elemanlarından bir kısmı hareketli olarak tasarlanmış, rüzgâr etkileri altında açı değiştirerek aerodinamik etkilere katkı sunmaları hedeflenmiştir. Optimize edilen sistem Şekil 6'da verilmiştir. Optimizasyon için GA kullanılmıştır. Sonuç olarak, önerilen sistemin enerji ve estetik katkılarının yanı sıra rüzgâr yüklerini minimize etmekte de etkili bir araç olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.



Şekil 6. Jafari ve Alipour (2021) Tarafından Optimize Edilen Cephe Sistemi

Aktif fiziksel sistemler ile ilgili deneysel bir çalışma da Whiteman ve diğ. (2021) tarafından sunulmuştur. Çalışmada geleneksel rüzgâr tüneli testleri sayısal optimizasyon teknikleri ile entegre edilerek, yüksek binaların rüzgâra dayanıklı tasarımı için AŞO metodolojisi sunulmuştur. Bu bağlamda siber fiziksel sistemlerin gelen rüzgâr etkilerini azaltmaktaki etkinliği incelenmiştir. Rüzgâr tüneline test edilen numune aktif bir kanatçık sistemine sahiptir. Kanatçıklar modelin dört köşesinde bulunurlar ve üç farklı yükseklik seviyesinde birbirinden bağımsız yapıdadırlar. Rüzgâr kaynaklı tepkinin araştırılması için bir dizi ivmeölçer ve lazer yer değiştirme sensörü kullanılmıştır. Bu donanımlar vasıtasıyla her bir aday tasarımın uygunluğunu, kullanıcı konforu ve yapısal dinamik parametreler ile ilgili performans kriterlerine göre değerlendiren bir optimizasyon süreci yürütülmüştür.

Optimizasyon için değiştirilmiş bir PSO algoritması kullanılmıştır. İvme ve yer değiştirme değerlerinin iki farklı rüzgâr açısı için minimize edilmesi amaçlanmıştır. Deney sırasında sensörler ile veri toplanmış, veriler PSO ile değerlendirilerek optimizasyon yapılmış, optimizasyon sonuçları modele uygulanarak canlı, otomatik ve deneysel bir süreç oluşturulmuştur. Önerilen sistem Şekil 7'de gösterilmiştir. Optimizasyon sonuçlarından hareketle yöntemin, numunenin tepkisini (yatay ivmeler ve yer değiştirme) minimize ederek optimum çözümü başarılı bir şekilde elde edebileceği belirtilmiştir.



Şekil 7. Önerilen Siber Fiziksel Sistem (Whiteman ve diğ., 2021)

Aktif sistemler ile ilgili bir diğer çalışma da Abdelaziz, Alipour ve Hobeck (2021) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada şekil değiştirebilen cephe sistemleri ile rüzgâra bağlı titreşimin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Rüzgâr etkilerinin binada oluşturduğu tepkilerin simülasyonu için iki boyutlu akışkan-yapı etkileşim modeli kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda GA ile cephenin alabileceği çeşitli şekiller karşısında oluşan rüzgâr yükleri taranarak optimizasyon yapılmıştır. Vekil model işlevi gören iki adet YSA oluşturulmuştur. Bunlardan ilki sistem dinamiklerini tahmin eden bir regresyon modelidir. Bu model sayesinde her bir rüzgâr olayı için simülasyon yapma ihtiyacı ortadan kaldırılarak rüzgârın oluşturacağı etki için bir tahmin sağlanacağı bildirilmiştir. Diğer YSA modelinin ise cephenin farklı rüzgâr koşulları altında hangi konfigürasyonu alacağını hızlı şekilde belirlediği ifade edilmiştir. Bu sayede cephe sisteminin her bir eylemi için GA çalıştırılması ihtiyacının önüne geçilerek hem hesaplama maliyetinin düşürüldüğü hem de daha hızlı aksiyon alındığı belirtilmiştir. Ayrıca sistemin kurulundan sonra da binadaki sensörler vasıtasıyla öğrenme faaliyetlerine devam ettiği bildirilmiştir. Bu sayede sistemin binada yapılacak değişikliklere de uyum sağlayabildiği ifade edilmiştir. Sonuç olarak önerilen akıllı cephe sisteminin etkinleştirilmesinden sonra rüzgâra bağlı titreşim genliklerinde %94'e varan azalma olduğu rapor edilmiştir.

3.1 Tartışma

AŞO alanındaki çalışmalar incelendiğinde, temel zorluğun yapı şeklindeki değişimle birlikte yapıda oluşan rüzgâr etkilerinin hesaplanmasında yaşandığı anlaşılmaktadır. Rüzgâr etkilerinin belirlenmesi için temel yöntem rüzgâr tüneli analizleri iken ilgili

analizlerin optimizasyon süreçlerine entegre edilmesi oldukça güçtür. HAD yöntemlerinin gelişimi ile rüzgâr etkilerinin belirlenmesi sürecinin, AŞO uygulamalarına entegre edilmesinin önündeki en büyük engel aşılmıştır. Burada HAD simülasyonları sanal bir rüzgâr tüneli vazifesi görerek optimizasyon algoritmalarının amaç fonksiyonlarında kullanılabilir hale gelmektedir. Bu kolaylığa rağmen HAD simülasyonlarının hesaplama maliyetlerinin çok yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Daha az hesaplama gücü gerektirmesine karşın lokal ekstremum noktalarında takılma riskleri çok yüksek olan gradyan tabanlı algoritmaların tercih edilmesi de büyük ölçüde hesaplama maliyetinden kaynaklanmaktadır.

Optimizasyon literatürü için oldukça ilkel yöntemler olan gradyan tabanlı algoritmalar her ne kadar denemeyanılma yönteminden daha efektif olsalar da güncel gerekleri karşılamaktan uzaktır. Bu durumun araştırmacıları keşif (exploration) yeteneği daha yüksek olan gradyan bilgisine ihtiyaç duymayan algoritmalara yönlendirmektedir. İlgili algoritmalar çok daha üstün bir keşif yeteneğine sahip olsalar da optimuma ulaşmak için yaptıkları deneme sayısı ve dolayısıyla hesaplama maliyetleri önemli ölçüde yüksektir. Bu maliyetin üzerine HAD simülasyonlarının hesaplama maliyetleri de eklendiğinde mevcut bilgisayar donanımları ile çözümü oldukça zor problemler ortaya çıkmaktadır. Araştırmacıların bu problemin üstesinden gelmek için vekil modeller kullandığı hatta incelenen çalışmaların bir kısmında temel amacın doğruluğu yüksek, hesaplama maliyeti düşük vekil modeller geliştirmek olduğu görülmüştür.

İncelenen çalışmalarda plan ve düşey doğrultuda şekil modifikasyonları, cephe sistemleri ve siber fiziksel sistemler gibi pek çok farklı yöntemle AŞO süreci yürütüldüğü görülmektedir. Optimizasyon algoritmalarının rüzgâr etkilerini azaltmakta başarılı sonuçlara ulaşarak AŞO'dan beklenen faydayı maksimize ettiği anlaşılmaktadır. Hesaplama maliyetleri gibi temel problemlerin de çözülmesi ile AŞO'nun kullanımının yaygınlaşacağı düşünülmektedir.

AŞO için kullanılan metasezgisel algoritmalar gradyan tabanlı algoritmalarından daha yenilikçi ve başarılı olsalar da günümüz optimizasyon metodolojisinin gerisinde kalan eski yöntemlerdir. AŞO stratejileri için parametre ayarlamasına ihtiyaç duymayan, modern metasezgisel yöntemlerle yapılacak çalışmalarda gerek hesaplama maliyeti gerekse global optimuma yakınsama bakımından başarımın artabileceği düşünülmektedir. Tablo 2'de bu bölümde incelenen çalışmaların özetleri sunulmuştur.

Tablo 2

İncelenen AŞO Çalışmaları

Yazar ve Yıl	Amaç	Konu	Vekil Model	Optimizasyon	Amaç Fonksiyonu
Bernardini ve diğ. (2015)	Evrimsel algoritmalar ile AŞO	Plan optimizasyonu	Basit Krigleme	NSGA-II	Sürüklenme katsayısı Kaldırma katsayısı St. Sapması
Elshaer ve diğ. (2015)	Köşe modifikasyonu ile AŞO	Köşe optimizasyonu	YSA	GA	Sürüklenme katsayısı
Elshaer ve diğ. (2016)	Helisel bükülme ile AŞO	Düşey Doğrultu boyunca optimizasyon	YSA	GA	Moment katsayısı
Mooneghi ve Kargarmokhar (2016)	Literatür incelemesi	-	-	-	-
Ding ve Kareem (2018)	Yüksek doğrulukta vekil model elde etmek	Plan optimizasyonu	Yüksek doğruluklu ortak Krigleme	NSGA-II	Sürüklenme katsayısı Kaldırma katsayısı St. Sapması
Jaouadi ve diğ. (2020)	Köprü tabliyeleri için AŞO	Tabliye en kesit optimizasyonu	Krigleme	PSO	Sürüklenme, kaldırma ve moment etkilerine sebep olan olarak üç farklı statik rüzgâr katsayısı
Zhang ve diğ. (2020)	Farklı simülasyon ve algoritmalarla AŞO	Düşey Doğrultu boyunca optimizasyon	-	RBF0pt CMA-ES	Maksimum yer değiştirme
Li ve diğ. (2021)	DPÖ ile AŞO	Plan optimizasyonu	RANS bazlı model	Gradient Descent PSO DPÖ	Sürüklenme katsayısı
Paul ve Dalui (2021)	Planda çıkıntılar ile AŞO	Plan optimizasyonu	Yanıt Yüzey Yöntemi	GA	Yüzey basınç katsayısı
Qiu ve diğ. (2022)	Geniş açıklıklı çatı yapıları için AŞO	Hangar en kesit optimizasyonu	Krigleme	GA	Düşey yer değiştirme
Jafari ve Alipour (2021)	Cephe sistemleri ile AŞO	Optimum cephe konfigürasyonu	-	GA	Sürüklenme katsayısı
Whiteman ve diğ. (2021)	Siber fiziksel sistemler ile AŞO	Optimum kanatçık konfigürasyonu	-	PSO	İvme ve yer değiştirme
Abdelaziz ve diğ. (2021)	Akıllı cephe sistemleri ile AŞO	Optimum cephe konfigürasyonu	YSA	GA	Titreşim genliği

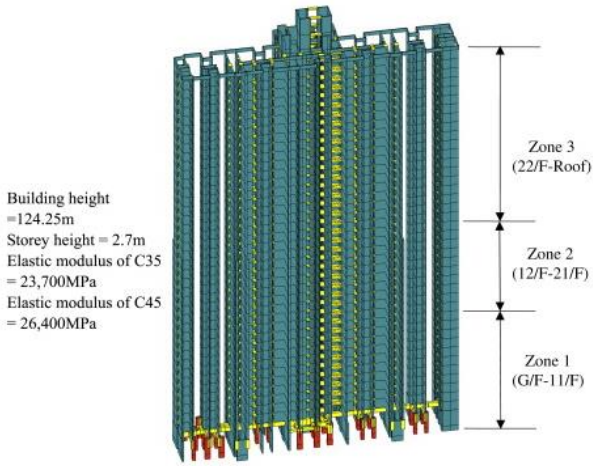
4. Rüzgâr Etkisi Altında Yapısal Optimizasyon (REAYO)

REAYO, AŞO'dan oldukça farklıdır. Öyle ki AŞO için amaç gelen rüzgâr yüklerini minimize etmek iken REAYO'da rüzgâr yükleri genellikle sabit kabul edilerek optimum yapısal tasarım aranmaktadır. Bu bağlamda genellikle kısıtları sağlayan en uygun maliyetli yanal rijitlik dağılımının bulunması hedeflenmektedir.

Chan ve Huang (2010) tarafından yapılan çalışmada performans bazlı rüzgâra dayanıklı yüksek bina optimizasyonu için bir çerçeve sunulmuştur. Optimizasyon için Optimality Criteria (OC) yöntemi tercih edilmiştir. Kısıtlar mukavemet (can güvenliği), ötelenme (hasar), ivme (kullanıcı konforu) olarak ele alınmıştır. Her bir kısıt durumu için performans bazlı yaklaşımın gereği olarak farklı dönüş periyotlu rüzgârlar tercih edilmiştir. Kısıtlar değerlendirilirken çeşitli standartlarından faydalanılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak malzeme maliyeti seçilmiştir. Yöntemin etkinliğini gösterme amacıyla 40 katlı bina üzerinde uygulama yapılmıştır. Rüzgâr etkilerini belirlemek için 1:400 ölçekli model üzerinde rüzgâr tüneli testleri gerçekleştirilmiştir. Sunulan yöntemin

yanal rijitliği başarıyla dağıtıp kabul edilebilir bir maliyet optimizasyonu sağladığı raporlanmıştır.

Chan, Huang ve Kwok (2010) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr tüneli analizleriyle elde edilen veriler eşdeğer statik rüzgâr yüklerine (ESRY) çevrilerek optimizasyon sürecine dahil edilmiştir. Yapısal sistemdeki değişen periyot ile birlikte ESR'ler de güncellenerek her bir iterasyonda uygulanmıştır. Optimizasyon için OC algoritması kullanılmıştır. Sunulan yöntemin etkinliğinin gösterilmesi amacıyla literatürde bulunan 40 katlı binanın optimizasyonu yapılmıştır. İlgili yapı Şekil 8'de sunulmuştur. İlgili bina için rüzgâr yükleri hem Hong-Kong Rüzgâr Yönetmeliği'ne göre hem de rüzgâr tüneli testlerine göre elde edilmiş, iki yöntem arasında ciddi farklar olduğu raporlanmıştır. Sonuç olarak, optimizasyon neticesinde yapının maliyetinin %9.9 azaldığı ve daha rijit bir davranış elde edildiği, rüzgâr kaynaklı burulma etkisinde de önemli ölçüde azalma olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca modern rüzgâr yönetmeliklerinin düzensiz şekilli binalar ve bina çevresindeki nesnelere neden olduğu parazit etkilerini belirlemede yetersiz kaldığı vurgulanmıştır.



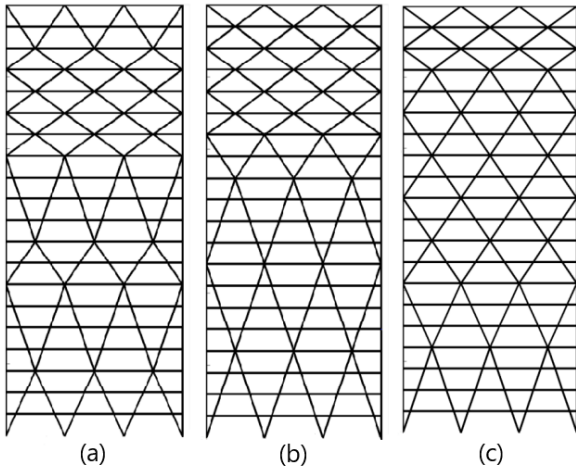
Şekil 8. Chan ve diğ. (2010) Tarafından Optimize Edilen Yapı

Li, Zou, Wu, ve Wang (2011) tarafından yapılan çalışmada dikdörtgen formlu yüksek çelik binaların rüzgâr yükleri etkisinde yanal ötelenme, kullanıcı konforu ve servis verebilirlik gibi kriterler altında minimum maliyetli tasarımı için bir optimizasyon süreci yürütülmüştür. Çözülen problemde AISC profil listelerinden seçilecek profillerin taşıyıcı sistemdeki beş kolon ve beş kiriş grubuna optimal ataması aranmaktadır. Amaç fonksiyonu malzeme maliyetidir. Optimizasyon algoritması olarak genetik algoritmanın daha küçük arama uzaylarında daha performanslı çalıştığı bilinen varyantı olan micro-GA kullanılmıştır. Rüzgâr yükü, rüzgâr tüneli testlerine dayalı ampirik formüllerle elde edilmiştir. Sonuç olarak; ampirik formüller ile hesaplanmış rüzgâr kaynaklı tepkilerin başarılı bulunduğu, geliştirilen entegre optimizasyon tekniğinin ise rüzgâr kaynaklı servis verebilirlik, yanal ötelenme ve kullanıcı konforu gibi tasarım kriterlerini aynı anda karşılayabilmek için kesitleri başarılı bir şekilde güncellediği belirtilmiştir. Sunulan yöntemin yanal rijitlik optimizasyonuna dair başka problemler için de kullanılabilir olduğu bildirilmiştir.

Huang, Chan, ve Lou (2012) tarafından yapılan çalışmada yüksek binaların rüzgâra dayalı tasarımı için performans odaklı bir optimizasyon süreci yürütülmüştür. Üç farklı tekrarlanma periyodu için farklı performans hedefleri sunulmuştur. Bunlar sık görülen 1 yıllık periyotlu rüzgâr için kullanıcı konforu, nadir görülen 50 yıllık periyotlu rüzgâr için ötelenme kısıtlarının sağlanması ve çok nadir görülen 475 yıllık periyotlu rüzgâr için onarılabılır hasardır. Optimizasyon için OC algoritması tercih edilmiştir. Maliyet amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Sunulan modelin etkinliğini açıklamak amacıyla 60 katlı dikdörtgen plana sahip kompozit bir yapının optimizasyonu yapılmıştır. Binanın çelik çerçevesi için

AISC profil listesinden optimum profillerin seçilmesi amaçlanmıştır. Binaya etkiyen rüzgâr yüklerinin tespiti amacıyla 1:400 ölçekli model üzerinde rüzgâr tüneli testleri yapılmıştır. Sonuç olarak; önerilen yöntemin performans tasarım kısıtlarını sağlamada başarılı olduğu, yüksek bina tasarımı için yanal rijitlik dağılımını maliyet ekseninde başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği bildirilmiştir.

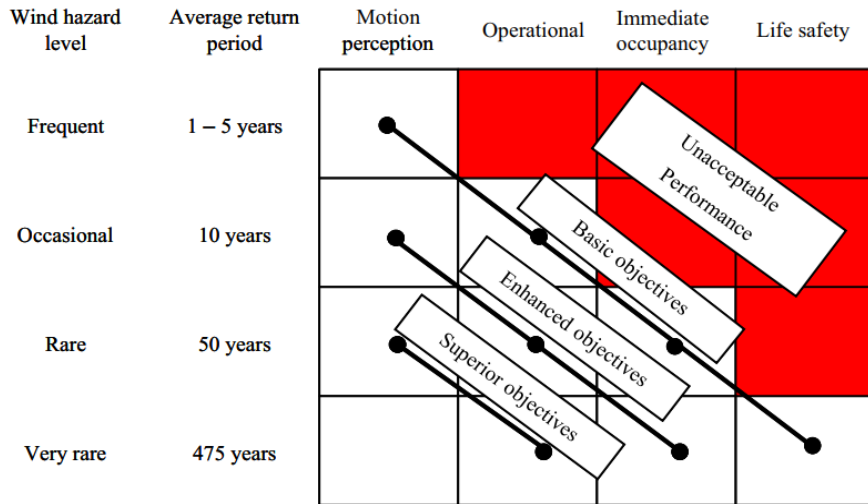
Shahrouzi, Meshkat-Dini ve Azizi (2015) tarafından yapılan çalışmada PSO, HSA (Harmony Search Algorithm) ve MBO (Mine Blast Optimization) ile yüksek çelik binaların rüzgâr etkisi altındaki optimum tasarımı araştırılmıştır. Çalışmada iki adet problem sunulmuştur. Birinci problemde İran Ulusal Bina Yönetmeliği'nden elde edilmiş gerilme ve ötelenme kısıtları ve rüzgâr yükleri altında boyut optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon için 10, 20 ve 30 katlı aynı planına sahip örnek binalar rijit ve esnek diyafram kabulleri için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Farklı senaryolar altında çok sayıda optimizasyon gerçekleştirilmesinin sebebi yüksek binalarda rüzgâra bağlı optimizasyonun duyarlı olduğu parametrelerin incelenmesi adına veri elde etmektir. İkinci problemde ise 20 katlı bir binada diagridler (binayı dıştan saran çapraz ızgara sistem) için geometri ve boyut optimizasyonu yapılmıştır. Bina için yükler literatürle benzer şekilde seçilmiştir. Kiriş, kolon ve diyagonal elemanlar için 10 adet simetrik gruplama yapılmıştır. Sonuç olarak; ilk problem incelendiğinde esnek döşemeli sistemin rijit döşemeli sisteme göre daha fazla malzeme talebinin olduğu, yüksek binalar için ötelenme kısıtı etkinken daha az yüksek binalar için gerilme limitlerinin kritik olduğu, MBO algoritmasının diğer algoritmalara oranla daha düşük ağırlıklar bulurken hesaplama maliyetinin ise diğerlerinden yüksek olduğu belirtilmiştir. İkinci problem incelendiğinde ise yüksek yer değiştirmeyi telefi etmek amacıyla diyagonal modüllerin boyutlarının çatı seviyesine yaklaştıkça algoritmalarca azaltıldığı belirtilmiştir. PSO global aramadaki yeteneği sayesinde diğer algoritmalarından daha başarılı sonuçlar üretirken MBO rijitliği diagrid elemanların yüksekliği boyunca yeniden dağıtarak daha az kritik olan üst katlara iletmede daha başarılı bulunmuştur. Hesaplama maliyeti bakımından ise en başarısız algoritma olduğu raporlanmıştır. İkinci probleme ait optimizasyon sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Diagridler İçin Optimum Tasarım Sonuçları a) PSO, b) HSA, c) MBO (Shahrouzi ve diğ., 2015)

Huang ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada yüksek binaların rüzgâra bağlı performans tasarımı için bir optimizasyon metodolojisi geliştirilmiştir. Yüksek binaların 475 yıllık geri dönüş periyodu olan rüzgâr tehlikeleri gibi çok nadir olaylar karşısındaki lineer olmayan davranışının değerlendirilmesi amacıyla lineer olmayan itme analizi önerilmiştir. Çalışmada yüksek binalar için dört seviyeli bir rüzgâr mühendisliği tasarım çerçevesi sunulmuştur. Performans bazlı deprem analizlerine benzer şekilde hareket algılama, operasyonel (kullanıma devam etme), hemen kullanım ve can güvenliği olmak üzere dört performans hedefi

vardır. İlgili performans hedefleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Hareket algılama hedefi için kullanıcı binanın hafif hareketlerini muhtemelen algılayacak ancak rahatsız olmayacaktır. Operasyonel hedef için orta seviyeli rüzgâr olayları için güvenlik veya yaralanma tehdidi oluşmaması beklenir. Hemen kullanım hedefi için ise yapısal olmayan elemanlardaki bazı hasarlara müsaade edilse de yapısal elemanlar için hasar istenmez. Can güvenliği performans seviyesinde çok nadir görülen rüzgâr yükleri altında yapısal hasarlar oluşabileceği kabul edilip yanıl rijitlik kaybı da hesaplara dahil edilir. Önerilen metodoloji daha sonra detaylandırılarak Huang (2017) tarafından sunulmuştur. Rüzgâr kaynaklı kuvvetlerin belirlenmesi için rüzgâr tüneli testleri yapılarak ortaya çıkan etkilerin eşdeğer statik rüzgâr yüklerine dönüşümü sağlanmıştır. Optimizasyon için hesaplama maliyetinin düşük olması sebebiyle OC yöntemi tercih edilmiştir. Uygulanan yöntem gradyan bilgisiyile çalıştığı için iyi bir başlangıç noktası seçimi gerektiği aksi takdirde kötü sonuçlar alınabileceği ve bu durumun ciddi bir dezavantaj yaratabileceği vurgulanmıştır. Optimizasyon sürecinde çift fazlı bir prosedür izlenmiş olup önce elastik analiz daha sonra plastik analiz gerçekleştirilmiştir. Önerilen metodolojinin kabiliyetlerini gösterebilmek için 40 katlı 122 metre yüksekliğinde bir binanın optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Sonuç olarak önerilen yöntemin rüzgâr uyarılarına maruz binaların mühendislik tasarımını ele alabilen güçlü bir bilgisayar destekli araç olduğu belirtilmiştir.



Şekil 10. Huang ve diğ. (2015) Tarafından Sunulan Performans Bazlı Tasarım

Li ve Li (2016) tarafından yapılan çalışmada öncelikle rüzgâr etkisi altındaki yüksek binaların optimum tasarımı için bir metodoloji önerilmiş olup daha sonra ilgili metodoloji düzensiz forma sahip binalar üzerinde

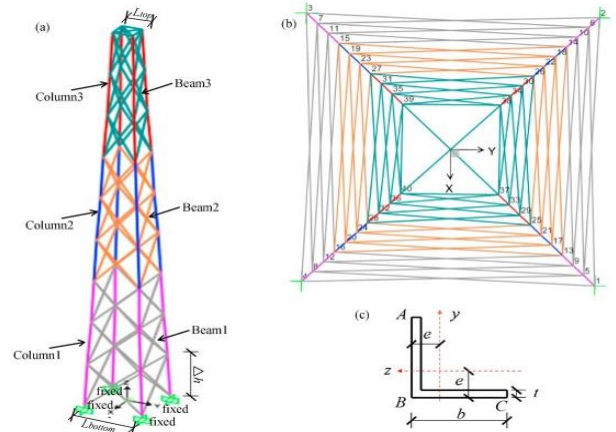
uygulanmıştır. Amaç fonksiyonu olarak toplam ağırlık, tasarım değişkenleri olarak yapısal elemanların kesitlerinin karakterize ettiği parametreler, kısıtlar olarak ise rüzgâr kaynaklı tepkiler olan görelî kat

ötelemeleri ve son kat ivmesi seçilmiştir. Kısıtların limitleri Çin Yapısal Tasarım Yönetmeliği'ndeki (JGJ3-2010) sınırlar vasıtası ile oluşturulmuştur. Optimizasyon için OC yönteminin özinelemeli bir algoritma ile birleştirildiği bir metodoloji önerilmiştir. Rüzgâr yüklerinin belirlenebilmesi ve çıkan sonuçların doğrulanması için rüzgâr tüneli testleri yapılmıştır. Sunulan yöntemin kabiliyetlerini göstermek için 60 katlı L formlu bir bina üzerinde optimizasyon yapılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak; ele alınan L formlu binanın toplam ağırlığının %18.1 azaltıldığı, buradan hareketle maliyetlerin büyük ölçüde düşürüldüğü; mod frekans değerlerinin %10 ila %15 arasında yükseldiği (yapının rijiteleştiği), rüzgâr kaynaklı ivmelerin azaldığı, tasarım optimizasyonundan sonra ESRV'lerin önemli ölçüde azaldığı ve bunlardan hareketle önerilen optimizasyon yönteminin rüzgâra dayanıklı yapı tasarımı için başarılı ve kullanılabilir bulunduğuna ifade edilmiştir.

Fu ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmada rüzgâra dayanıklı yapısal optimizasyonda kullanıcı konforunu da dikkate alan bir tasarım prosedürü önerilmiştir. Literatürde daha önceden de kullanıcı konforu ile ilgili yapılmış çalışmalara rastlamak mümkündür. Bu çalışma kullanıcı konforunun, binanın kat ivmelerinin tepe değerleri ile alakalı olduğu ve rüzgâr hızının tekrarlanma periyodu ile ilişkisi olmadığı fikriyle öne çıkmaktadır. Buradan hareketle yüksek binaların rüzgâra dayalı optimizasyonu ivme kısıtları açısından değerlendirmektedir. Bu bağlamda kullanıcı konforu odaklı olarak en büyük modal yatay ivmeyi hesaba katan yeni bir prosedür sunulmaktadır. Modal ivmenin güvenilirlik bazlı tasarımda tercih edildiği çalışmalarda kriter olarak ivme tepkilerinin değerleri kullanılmaktadır. Bu durumun farklı ülkeler için farklı kısıtlamaları da beraberinde getirerek evrensel olarak kullanılamayacak bir metodolojiyi ortaya çıkardığı, modal ivmelerin yarattığı tepki ivmeleri yerine kullanıcı konforu açısından değerlendiriliyor olmasının evrensel bir metodoloji oluşturulmasına katkı sağlayacağı ifade edilmiştir. Rüzgâr yükü belirlenirken meteorolojik kayıtlar kullanılmıştır. İlgili kayıtlar Gumbel dağılım modeli ile analiz edilip 10 ve 50 yıllık periyotlar için hangi yönün kritik olduğu ve bu yönden gelebilecek uç rüzgâr hızının ne kadar olduğuna dair tahminde bulunulmuştur. Oluşturulan yöntem CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) tarafından sunulan 60 katlı yüksek bina için uygulanmıştır. Amaç fonksiyonu olarak toplam ağırlık, tasarım değişkenleri olarak 6 gruba ayrılmış kolon ve kiriş kesit boyutları, kısıtlar olarak yer değiştirme, görelî kat ötelenmesi ve frekans, yapısal tasarım yönetmeliği olarak Çin Yapısal Tasarım Yönetmeliği (JGJ3-2010) optimizasyon algoritması olarak ise OC algoritması tercih edilmiştir. Sonuç olarak, yapının güvenliği sağlanırken toplam ağırlığın ciddi oranda azaldığı bildirilmiştir. Bu çalışma Athanasiou, Stathopoulos ve Tirca (2020) tarafından bazı hususlarda eleştirilmiştir.

Kullanıcı konforu kısıtlarının yönetmeliklerce zorunlu kılınan dayanım kısıtlarını devre dışı bırakmadığı dolayısıyla sunulan yöntemin evrenselliğinden bahsedilemeyeceği, çalışmada yapılan bazı kabullerin açıkça belirtilmediği, bazı tasarım değişkenlerinin alt sınırlarda sonuç verdiği ve bu durumun irdelenmediği ve önerilen yöntemin sistem özelinde olabileceği ifade edilmiştir.

Fu ve diğ. (2018b) tarafından yapılan çalışmada kafes sistemlerin hafif ve ince; ayrıca yüksek esneklik ve düşük sönümlenme oranına sahip oldukları için rüzgâr yüklerine karşı hassas olduklarının altı çizilmiştir. Çalışmanın ana motivasyonu buradan hareketle kafes sistemlere etkiyen rüzgâr yükünü minimize edecek otomatik bir optimizasyon akışı ortaya koymaktır. Kafes sistemlerin tasarımını otomatikleştiren pek çok çalışma yapıyorken literatürde dinamik rüzgâr hareketleri altında doğrusal olmayan kafesler için bir optimizasyon sürecine rastlanmadığı ifade edilmiştir. Optimizasyon için OC yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinde kısıt olarak; eşdeğer statik rüzgâr yükleri altındaki düğüm yer değiştirmeleri, eleman gerilmeleri ve doğrusal olmayan kritik yük faktörü seçilmiştir. Çalışmada önerilen otomatik optimizasyon tekniğinin etkinliğini göstermek için üç boyutlu bir sistemin optimizasyonu da sunulmuştur. Optimize edilecek sistem Şekil 11'de gösterilmiştir. Sonuç olarak; en etkin kısıtın yatay yer değiştirme olduğu, yatay yer değiştirmenin ön tasarım olarak sınırlandırıldığı durumlarda doğrusal olmayan kritik yük faktörünün en etkin parametreye dönüştüğü belirtilmiştir. Doğrusal olmayan geometrik yapının malzeme ihtiyacını arttırdığı kaydedilmiştir.



Şekil 11. Fu ve diğ. (2018b) Tarafından Optimize Edilen Sistem

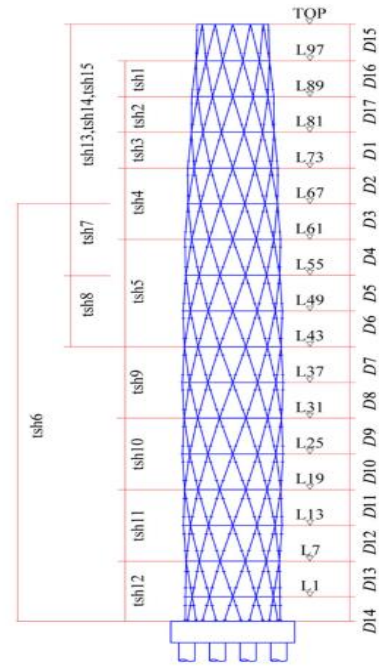
Fu, Wu, Xu, Wu ve Pi (2018c) tarafından yapılan çalışmada yüksek binalar için rüzgâra dayanıklı tasarımda bir yöntem olarak kullanılan frekans kısıtlı yaklaşıma dair bazı geliştirmeler önerilmiştir. Literatürde frekans kısıtlama fonksiyonları elde edilirken problemin matematiksel olarak modellendiği

ve OC metoduna göre çözüldüğü belirtilmiştir. Bu modelleme yapılırken gerinim enerjisi yönteminin kullanıldığı ifade edilerek bunun bazı dezavantajlarından bahsedilmiştir. Çalışmada bu problemlere çözüm olarak gerinim enerjisi yöntemi yerine bir özdeğer yaklaşımı, langrange çarpanlarını hesaplamak için ise Gauss-Seidel yöntemi yerine ikinci derece programlama yaklaşımı önerilmiştir. Sonuç olarak, önerilen yöntemin yüksek binalar için rüzgâra dayanıklı yapısal optimizasyon için daha etkili olduğu ve iterasyonların daha hızlı ve istikrarlı ilerlediği ifade edilmiştir.

Li, Duan, Li, Li ve Huang (2020) tarafından yapılan çalışmada yüksek binaların rüzgâr etkilerine karşı optimum tasarımı ele alınmıştır. Rüzgâr yükleri Çin Bina Yük Yönetmeliği'ndeki (GB50009-2012) girdiler kullanılarak eşdeğer statik rüzgâr yükleri yöntemi ile bulunmuştur. Optimizasyon algoritması için gelişmiş GA tercih edilmiştir. MATLAB dili ile programlanan optimizasyon algoritması ile ANSYS sonlu elemanlar çözücüsü ortak çalıştırılmıştır. Yöntemi test etmek amacıyla CAARC tarafından sunulan 60 katlı dikdörtgen formu betonarme bir yüksek bina üzerinde optimizasyon yapılmıştır. Sonuç olarak; önerilen metodolojinin binanın yanal rijitliğini yeniden dağıtarak maksimum ötelenme, görelî ötelenme ve maksimum ivme gibi kısıtları sağladığı belirtilmiştir.

Xu ve Zhao (2020) tarafından yapılan çalışmada karmaşık yapısal sisteme sahip çok yüksek binalarda rüzgâra dayanıklı tasarım için bir optimizasyon süreci önerilmiştir. Önerilen yöntemin etkilerinin görülmesi için mevcut bir bina olan Guangzhou West Tower üzerinde analizler yapılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak toplam malzeme maliyeti seçilmiş olup kısıtlar yanal ötelenme ve ivmedir. Sofistike bir yapı olan Guangzhou West Tower için tam anlamıyla bir optimizasyon yapılmamış, sistem basitleştirilerek ele alınmıştır. Optimize edilen yapının modeli Şekil 12'de gösterilmiştir. Bu bağlamda optimize edilmek için yalnızca sistemdeki beton dolgulu çelik tüpler ve perde duvarlar seçilmiştir. Çelik tüplerin geometrisini ifade eden çap ve çelik cidarın çapa oranı değerleri ile perde duvarları karakterize eden kalınlık değerlerinden oluşan toplamda 49 adet tasarım değişkeni bulunmaktadır. Optimizasyon için MATLAB ortamındaki fmincon araç kutusu kullanılmıştır. Çeşitli optimizasyon algoritmalarına sahip olan bu araç kutusundan büyük ölçekli doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinde başarılı bulunan NITRO (Nonlinear Interior Point Trust Region Optimizer) algoritması tercih edilmiştir. Optimizasyon sonucunda toplam malzeme maliyetinin %20.56 oranında azaltıldığı; yer değiştirme tepkisi, görelî kat ötelenmesi ve ivme tepkisi gibi rüzgâra bağlı büyüklüklerin düştüğü belirtilmiştir. Belirli katlarda görelî kat ötelenmesi değerlerinin sınıra oldukça yakın bulunduğu belirtilmiştir.

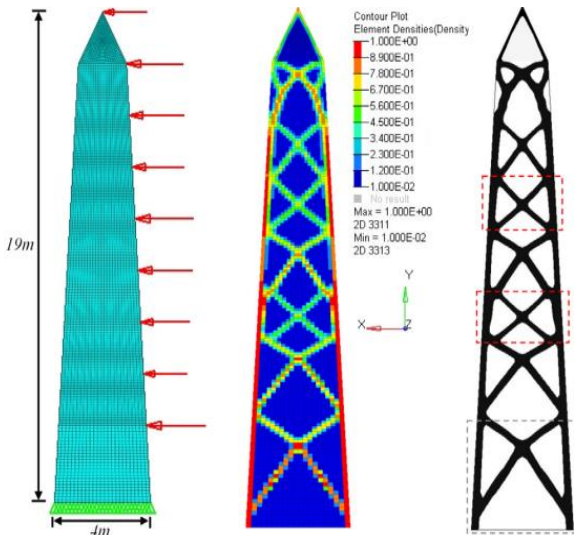
olup buradan hareketle incelenen bina için baskın faktörün görelî kat ötelenmesi olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 12. Xu ve Zhao (2020) Tarafından Optimize Edilen Yapısal Sistem

Kim, Tse, Chen ve Park (2020) tarafından yapılan çalışmada bağlantılı yüksek binaların (BYB) rüzgâr etkileri altında minimum yer değiştirme ve minimum ivme tepkisi için optimum bağlantı özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada binalar arasındaki boşluk mesafesinin değişken olduğu iki binalı tipik bir BYB sistemi ele alınmıştır. Rüzgâr yükü bileşenlerinin belirlenmesi için rüzgâr tüneli testleri yapılmıştır. Optimizasyon için GA kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak yer değiştirme ve ivme tepkileri, tasarım değişkenleri olarak ise bağlantı yapısını karakterize edecek bazı oranlar (bağlantı/bina kütle oranı, bağlantının yüksekliği/toplam yükseklik, bağlantının eksenel rijitliği/bağlanan binaların eşdeğer rijitliği ve bağlantının eğilme rijitliği/bağlanan binaların eşdeğer burulma rijitliği) seçilmiştir. Sonuç olarak; bağlantı ek kütesinin yer değiştirme yanıtını artırma eğilimindeyken ivme tepkisini azalttığı, bağlantı yüksekliğinin bina yüksekliğine oranı arttıkça ivme tepkisi azalırken yer değiştirme tepkisinin arttığı, bağlantı rijitliğinin genel olarak her iki parametreyi de azalttığı ancak genel olarak rijitliğe olan duyarlılığın düşük olduğu, rüzgâr kaynaklı tepkilerin iki bina arasındaki boşluk oranına göre değiştiği ve bu etkinin karmaşık olduğu bildirilmiştir. Ayrıca çalışmanın sonuçlarının BYB tasarımı için pratik tavsiyeler içerdiği ve gelecek araştırmalar için rehberlik edebileceği belirtilmiştir.

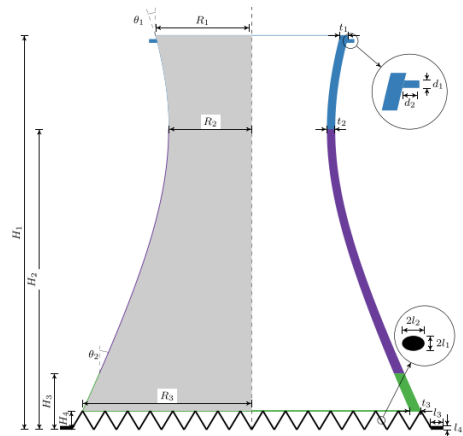
Tsavdaridis, Nicolaou, Mistry ve Efthymiou (2020) tarafından yapılan çalışmada kafes tipi telekomünikasyon kule yapıları için rüzgâr ve kar yükleri altında topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Telekomünikasyon kulelerinin hafif, uzun ve esnek yapılar olduğu ve genellikle yüksek irtifalı sahalarda hizmet verdikleri, bu nedenle rüzgâr kuvvetlerinin tasarımlarında kritik olduğu vurgulanmıştır. Topoloji optimizasyonu için oluşturulan tasarım alanları (konik, kısmen konik ve düz) Yunanistan'da kullanılan bir telekomünikasyon kulesinin dış hatlarını baz almaktadır. Optimizasyon için SIMP (Solid Isotropic Material with Penalisation) algoritmasını kullanan Altair OptiStruct 2016 paket programı tercih edilmiştir. Yükler ve sınır koşulları oluşturulurken Avrupa yönetmeliklerinden (BS EN 1991-1-4, DIN 4131, BS EN 1993-3-1, DIN 1991, Eurocode-3) faydalanılmıştır. Statik rüzgâr yükü belirlenirken analizi yapılacak kulenin Birleşik Krallık'ta meydana gelebilecek en kritik rüzgâr yüküne maruz kalacağı varsayılmıştır. Rüzgâr yükleri referans kule üzerinden hesaplanıp tüm tasarımlar için sabit kabul edilmiştir. Topolojiyi netleştirmek adına yükler analizler sırasında büyütülmüştür. Kısıt olarak kulelerin taban köşelerinin sabit olduğu ve bir takım simetri koşulları olduğu varsayılmıştır. Elde edilen model başlangıçtaki referans kule ile modal analiz yapılarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak daha az malzeme kullanılarak çok daha rijit bir sisteme ulaşıldığı raporlanmıştır. Daha estetik, daha ekonomik ve daha güvenli bir telekomünikasyon kulesi elde edildiği bildirilmiştir. Yapılan optimizasyon Şekil 13'te özetlenmektedir.



Şekil 13. Tsavdaridis ve diğ. (2020) Tarafından Optimize Edilen Sistem

Zhao ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada soğutma kulelerinin rüzgâra bağlı optimum tasarımının yapılması amaçlanmıştır. Rüzgâr yükünü belirlemek amacıyla 1:200 ölçeğinde modeller kullanılmıştır.

Kulelerin birbiri ile etkileşimini de sürece dahil etmek amacıyla altı adet kulenin farklı yerleşimleri için de rüzgâr tüneli analizleri yapılmıştır. Grup halinde bulunmalarının koruma etkisine neden olup gelen yükü azaltabildiği ya da hunileme etkisiyle yükü arttırabildiği bildirilmiştir. Rüzgâr tüneli testleri ile elde edilen basınç katsayılarının özellikle tek konumlandırılmış kule için Çin Soğutma Kulesi Tasarım Yönetmeliği ile örtüştüğü belirtilmiştir. Amaç fonksiyonu toplam malzeme maliyeti olarak seçilmiştir. Yükseklikler ve çaplar termal mühendisliğin gereklerini karşılamak için değiştirilemediğinden dolayı kabuk kalınlığı ve taban halkasını karakterize eden 13 adet tasarım değişkeni seçilmiştir. Optimizasyon probleminin genel yapısı Şekil 14'de gösterildiği gibidir. Kısıtlar termal mühendislik kısıtlamaları ve ilgili yönetmeliğin gereklerini sağlayacak şekilde seçilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak ızgara araması ile birleştirilmiş gradyan tabanlı bir metodoloji kullanılmıştır. Sonuç olarak soğutma kulesi yerleşiminin bazı etkileri sunularak bu etkilerden korunmak için birtakım önerilerde bulunulmuş, yapısal optimizasyon ile hem güvenlik hem de ekonomik verimlilik sağlanabileceğinin altı çizilmiştir.



Şekil 14. Zhao ve diğ. (2020) Tarafından Optimize Edilen Soğutma Kulesi

Xu, Lin, Fu ve Sun (2021) tarafından yapılan çalışmada yüksek binalara gelen rüzgâr etkilerini belirlemede sıklıkla kullanılmasına rağmen optimizasyon süreçlerinde yeterince dikkate alınmadığı ifade edilen HFFB (High-Frequency Force Balance) rüzgâr tüneli analizleri ile optimizasyon süreci yürütülmüştür. Testler CAARC tarafından sunulan binanın 1:300'lük bir modeli aracılığı ile yapılmıştır. Sunulan metodoloji sayesinde tüm kısıtlar tek tip bir frekans kısıtına dönüştürerek hesaplama maliyetinin oldukça düşürülebileceği ileri sürülmüştür. Amaç fonksiyonu olarak toplam malzeme maliyeti, tasarım değişkenleri olarak ise beş grupta ifade edilen kiriş ve kolon boyutları seçilmiştir. Üst kat yer değiştirmesi, ivme ve katlar arası

yanal kayma kısıtlamalarının limitleri için üç adet frekans hesaplanmış olup bunların en büyüğü dolayısıyla en kritik olanı tek kısıtmış gibi optimizasyon sürecine dahil edilmiştir. Bu kabul ile yapılan optimizasyon ve konvansiyonel optimizasyondan elde edilen sonuçlar arasındaki fark %0.7 olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, çalışmada önerilen kısıtları tek bir frekans parametresi ile ifade etmeye yönelik metodolojinin kabul edilebilir bir kayıpla başarılı çalıştığı ve gelecekteki analizler için de kullanılabilir olduğu ve yapısal maliyetin temel rüzgâr basıncındaki artışla üstel olarak arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca rüzgâra dayanıklı yapı tasarımının en önemli parametresi temel rüzgâr basıncı yönetmeliklerde çok geniş bölgeler için aynı basıncın kullanıldığı ve bunun gerçekçi olmadığı belirtilmiştir.

Spence ve Giofrè (2012) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr iklimi etkileri ve aerodinamiğin yönsel özelliklerini de içeren bir optimizasyon çerçevesi önerilmiştir. Rüzgâr etkileri altında tasarım için popülerleşmeye başlayan performans odaklı yaklaşıma bazı eleştiriler getirilmiştir. İlgili yöntemin deprem mühendisliğinde gösterdiği başarıdan dolayı rüzgâr mühendisliğine adapte edilmeye çalışıldığı ancak doğrudan rüzgâr mühendisliğine uygulanmasının türbülans, bağımsız akış ve girdap kopması gibi etkiler yüzünden imkânsız olduğu belirtilmiştir. Bu durumun yol açtığı belirsizliklerin en iyi ihtimalle optimizasyonun amacını engelleyebileceği, daha da kötü bir senaryoda güvensiz binalara neden olabileceği ileri sürülmüştür. Çalışmada önerilen optimizasyon modeli deterministik olmayıp bazı olasılıksal parametreler içermektedir. Amaç fonksiyonu olarak yapı ağırlığı, tasarım değişkenleri olarak da AISC profil listelerinden uygun elemanları seçtirecek ayrık uzay değişkenleri tanımlanmıştır. Çalışmanın sonucunda yaygın yöntemler kullanılarak yapılan optimizasyonlar ile rüzgâr iklimi ve aerodinamiğin olasılıksal olarak etkilediği yaklaşım arasında kesit elemanları bazında %30'lara varabilen farkların oluşabileceği belirtilmiştir. Gomez, Spencer ve Carrion (2021) tarafından da deterministik yöntemlere benzer eleştiriler getirilerek yüksek binaların yapısal sistemlerinin stokastik rüzgâr yükleri altında topoloji optimizasyonu için metodoloji sunulmuştur. Optimizasyon için gradyan tabanlı bir algoritma tercih edilmiştir. Rüzgâr yüklerinin stokastik olarak modellendiği bir diğer optimizasyon çalışması da Subgranon ve Spence (2021) tarafından yapılmıştır. Modifiye edilmiş bir GA türevi kullanılarak az katlı bir bina ve yüksek bir bina için vaka çalışmaları sunulmuştur.

Deng, Fu, Zheng, Wu ve Pi (2019) tarafından yapılan çalışmada performansa dayalı rüzgâra dayanıklı yapı optimizasyonu için bir tasarım çerçevesi sunulmuştur. Yerel meteoroloji istasyonlarından elde edilen rüzgâr hızı ve rüzgâr yönüne ilişkin veriler ile rüzgâr tüneli

testlerinden elde edilen rüzgâr yükleri esas alınmıştır. Rüzgâr etkisindeki yüksek binaların performansının araştırılması için rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, doğal frekans ve sönüm oranının olasılıksal dağılımından faydalanılmıştır. Optimizasyon için OC algoritması tercih edilmiş olup sunulan yöntemin yeteneklerini gösterebilmek için CAARC tarafından sunulan 60 katlı binanın optimizasyonu yapılmıştır. Yapısal elemanların kesit boyutları tasarım değişkenlerini oluştururken amaç fonksiyonu için toplam yapı ağırlığı seçilmiştir. Girdi parametrelerinde olasılıksal ve rastgele ifadeler bulunduğu için rüzgâr kaynaklı tepkide de bir miktar rastlantısallık bulunmaktadır. Dolayısıyla kısıtlar için deterministik tanımlamalar yapılmamış, onun yerine başarısızlık olasılıkları dikkate alınmıştır. Sayısal örneğin çözümünde sadece yer değiştirme kısıtları ile %44.4, ivme ve yer değiştirme kısıtları ile %42.8 ağırlık azaltıldığı raporlanmıştır. Sonuç olarak, tanımlanan rastlantısal parametrelerin gerçeği yakınsamak konusunda daha makul olduğu ve önerilen yöntemin rüzgâra dayanıklı tasarımda pratik olarak kullanılabilirliği belirtilmiştir.

4.1 Tartışma

Rüzgâra bağlı yapısal optimizasyon çalışmaları incelendiğinde, optimizasyon kısmının herhangi bir yük altında yapılan optimizasyon çalışmaları ile paralel ilerlediği görülmüştür. Çalışmalarda temel farklılığı rüzgâr yükünün nasıl belirleneceği ve değerlendirileceği konusundaki görüş farklılıkları oluşturmaktadır. Bu bağlamda deprem mühendisliği için benimsenmiş performans odaklı tasarımın uyarlamasına ilişkin pek çok çalışma bulunduğu gözlenmiştir. Performans odaklı yaklaşım için belirlenecek hedeflerde de çeşitli görüşler bulunmaktadır. Bunun aksine performans odaklı tasarımın rüzgârın doğasından kaynaklanan bazı etkiler nedeniyle uygulanamaz olduğunu savunan, rüzgâr yüklerinin ve etkilerinin stokastik olarak modellenmesi gerektiğini ifade eden karşıt bir görüş de bulunmaktadır.

Rüzgâr yüklerinin belirlenmesi için AŞO'daki gibi vekil modelleme ihtiyacının bulunmadığı görülmüştür. Bu durum rüzgâra bağlı yapısal optimizasyon çalışmalarında yapı şeklinin genellikle korunarak yalnızca taşıyıcı sistem üzerinde değişikliklere gidilmesinden kaynaklanmaktadır. Buradan hareketle, REAYO çalışmalarının AŞO'ya göre, rüzgâr yüklerinin belirlenmesi bakımından, hesaplama maliyetinin düşük olduğu söylenebilir. Bu durum araştırmacılara, HAD simülasyonları ya da HAD simülasyonları ile oluşturulmuş vekil modellere ihtiyaç duymaksızın rüzgâr tüneli analizlerini de yaygın olarak kullanabilecekleri geniş bir çalışma alanı sağlamıştır. Bazı çalışmalarda rüzgâr tüneli analizleri ile bazı rüzgâr yükü yönetmeliklerinin de kıyaslandığı görülmüştür.

Kimi çalışmalarda rüzgâr yükü yönetmelikleri ile rüzgâr tüneli analizleri neticesinde elde edilen yükler birbirine oldukça yakın bulunurken (Zhao ve diğ., 2020) kimi çalışmalarda ise modern rüzgâr yükü yönetmeliklerinin güncel gerekleri sağlamadığı noktasında ciddi eleştirilerde bulunulmuştur (Xu ve diğ., 2021).

Kullanılan optimizasyon algoritmaları incelendiğinde, yerel ekstremum noktalarında takılma olasılıklarının görece yüksek olmasına rağmen gradyan tabanlı

algoritmaların yaygın olarak tercih edildiği, gradyan bilgisine ihtiyaç duymayan görece modern algoritmalar ise GA, PSO ve HSA gibi algoritmaların az sayıda çalışmada kullanıldığı gözlenmiştir. REAYO problemlerinin AŞO gibi yüksek hesaplama maliyetli HAD simülasyonlarına ihtiyaç duymadığı için metasezgisel algoritmalar ile de rahatlıkla ele alınabileceği, modern yöntemlerin kullanımı ile başarımın da artırılabilirliği düşünülmektedir. Bu bölümde incelenen çalışmalar Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3

İncelenen REAYO Çalışmaları

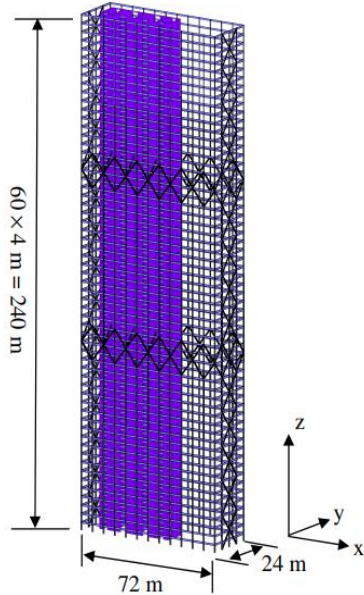
Yazar ve Yıl	Amaç	Uygulama	Rüzgâr Yükü	Optimizasyon	Amaç Değeri
Chan ve Huang (2010)	Yüksek binaların RDOYT için performans bazlı tasarım çerçevesi sunmak	40 katlı bina	Rüzgâr tüneli	OC	Maliyet
Chan ve diğ. (2010)	Yüksek binaların eşdeğer statik rüzgâr yükleri altında yanal rijitlik dağılımı optimizasyonu	40 katlı bina	Rüzgâr tüneli	OC	Maliyet
Li ve diğ. (2011)	Mikro GA kullanarak rüzgâr kaynaklı tepki analizi ve minimum maliyet optimizasyonu	30 katlı bina	Ampirik formül	Micro-GA	Maliyet
Huang ve diğ. (2012)	Yüksek binalarda performansına dayalı RDOYT	60 katlı CAARC binası	İstatistiksel yöntemler	OC	Maliyet
Spence ve Goffrè (2012)	Olasılıksal etkilerle RDOYT	74 katlı bina	Rüzgâr tüneli ve Stokastik yöntem	OC	Ağırlık
Shahrouzi ve diğ. (2015)	Yüksek çelik binaların yerçekimi ve rüzgâr yükleri etkisinde ağırlık minimizasyonu	10, 20 ve 30 katlı çelik binalar	İran Rüzgâr Yükü Yönetmeliği	PSO HSA MBO	Ağırlık
Huang ve diğ. (2015)	Elastik ötesi davranışları ile birlikte performans odaklı optimum tasarım	40 katlı bina	Rüzgâr tüneli	Augmented OC	Maliyet
Huang (2017)	Rüzgâr etkisi altında performans bazlı optimum tasarım	40 katlı bina	Rüzgâr tüneli	Augmented OC	Maliyet
Li ve Li (2016)	Düzensiz forma sahip yüksek binalarda rüzgâr etkileri altında optimizasyonu	60 katlı L formulu bina	Rüzgâr tüneli	Özyinelemeli OC	Ağırlık
Fu ve diğ. (2018a)	Kullanıcı konforunu da dikkate alacak bir RDOYT yöntemi sunmak	60 katlı CAARC binası	İstatistiksel yöntem	OC	Ağırlık
Fu ve diğ. (2018b)	Doğrusal ve doğrusal olmayan kafes yapıların rüzgâra dayanıklı optimizasyonunu	Kule tipi kafes sistem	Literatürden	OC	Ağırlık
Fu ve diğ. (2018c)	Rüzgâr etkisi altındaki yüksek binaların frekans kısıtlı optimizasyonu	60 katlı CAARC binası	Rüzgâr tüneli	Modifiye OC	Ağırlık
Deng ve diğ. (2019)	Stokastik parametreler ile elde edilen rüzgâr etkileri ile performans bazlı optimizasyon	60 katlı CAARC binası	Meteorolojik veriler ve rüzgâr tüneli	OC	Ağırlık
Athanasios ve diğ. (2020)	Fu ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmaya eleştirir	-	-	-	-
Li ve diğ. (2020)	Yüksek binaların rüzgâr etkisi altında ağırlık minimizasyonu	60 katlı CAARC binası	Eşdeğer statik rüzgâr yükü	GA	Ağırlık
Xu ve Zhao (2020)	Sofistike yapısal sistemler için rüzgâr altında optimum tasarım	Guangzhou West Tower	Rüzgâr tüneli ve Çin Bina Yük Yönetmeliği (GB50009-2012)	NITRO	Maliyet
Kim ve diğ. (2020)	Bağlantılı yüksek binalar için rüzgâra dayanıklı optimum tasarım	Dikdörtgen kesitli bağlantılı yüksek bina	Rüzgâr tüneli	GA	Yer değiştirme ve ivme
Tsavidaridis ve diğ. (2020)	Kafes tipi telekomünikasyon direkleri için rüzgâr ve kar yükü altında optimum tasarım	Telekomünikasyon kulesi	Avrupa yönetmelikleri (BS EN 1991-1-4, DIN 4131, BS EN 1993-3-1, DIN 1991)	SIMP	Ağırlık
Zhao ve diğ. (2020)	Soğutma kulelerinin rüzgâra bağlı optimum tasarımı	Soğutma kulesi	Rüzgâr tüneli	Izgara arama + gradyan tabanlı algoritma	Maliyet
Xu ve diğ. (2021)	HFFB deneylerine dayalı olarak yüksek binaların yapısal optimizasyonunu	46 katlı basitleştirilmiş CAARC binası	Rüzgâr tüneli	MATLAB fmincon	Malzeme maliyeti
Gomez ve diğ. (2021)	Stokastik rüzgâr yükleri ile topoloji optimizasyonu	76 katlı bina	Stokastik yöntem	SIMP	Muhtelif
Subgranon ve Spence (2021)	Stokastik simülasyon tabanlı optimizasyon yaklaşımı geliştirmek	2 ve 37 katlı binalar	Stokastik yöntem	Modifiye GA	Malzeme hacmi

5. Sönümleyici Sistemler ile Rüzgâra Dayanıklı Optimum Tasarım (SSRDOT)

Sönümleyici sistemler, özellikle deprem etkileri gibi kritik yükler karşısında gelen enerjiyi soğurarak yapı davranışını doğrusallaştırma noktasında ciddi katkılar sundukları için yaygın olarak tercih edilirler. Bu nedenle rüzgâra dayanıklı yapı tasarımı için de umut verici

çözümler olarak düşünülmektedirler. Bazı çalışmalarda sönümleyici sistemler de REAYO başlığının altında değerlendirilirken bu çalışmada ayrı bir başlıkta incelenmeleri uygun görülmüştür. Bunun nedeni SSRDOT yöntemlerinin gerek optimizasyon hedeflerini oluşturan amaç fonksiyonları gerekse kısıtlamalar bakımından REAYO ile önemli farklılıklar içermesidir.

Huang, Tse, Chan ve Lou (2011) tarafından yapılan çalışmada rüzgâra dayanıklı binaların tasarımı için yapısal optimizasyon ve vibrasyon kontrol sistemlerinin birlikte kullanımı entegre edilmeye çalışılmıştır. Sönümleyici olarak STMD (Smart Tuned Mass Damper) tercih edilmiştir. Amaç fonksiyonunda malzeme maliyetinin yanına sönümleyici sistemlerin kurulum ve işletme maliyetleri de dâhil edilmiştir. Kısıt olarak eleman gerilmeleri, göreceli kat ötelenmeleri ve ivme değerleri seçilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak OC algoritması tercih edilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için 60 katlı dikdörtgen planlı ve 240m yüksekliğe sahip bir bina üzerinde uygulama yapılmıştır. Rüzgâr etkilerinin anlaşılması amacıyla binanın 1:400 ölçekli modeli üzerinde rüzgâr tüneli testleri yapılmıştır. Yapısal optimizasyon, titreşim kontrolü ve ikisinin birlikte kullanıldığı entegre yöntem için üç farklı analiz yapılmıştır. Yapısal optimizasyon ve titreşim kontrolü kısıtlarının ayrı ayrı sağlanması için bina maliyeti %10 civarında artarken entegre yöntemde %3.6 artış olduğu raporlanmıştır. Buradan hareketle entegre yöntemin daha umut verici olduğu bildirilmiştir. Optimizasyon problemine ilişkin bir görsel Şekil 15'te sunulmuştur. Ayrıca, pasif titreşim kontrol sistemlerinin belirli bir koşul için tasarlandıkları, yapısal dinamik özelliklerindeki bazı belirsizlikler ve rastgele uyarım ile devreye girmeleri nedeni ile optimizasyonu için çok fazla seçenek olmadığı, aktif sistemlerin ise maliyetlerinin fazla olduğu vurgulanarak yarı aktif titreşim kontrol sistemlerinin optimizasyon çalışmaları için daha elverişli olduğu belirtilmiştir.

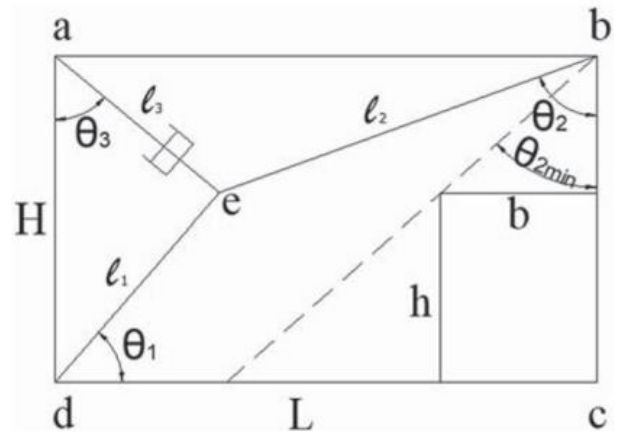


Şekil 15. Huang ve diğ. (2011) Tarafından Optimize Edilen Sistem

Venanzi, Ubertini ve Materazzi (2012) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr kaynaklı titreşimlere maruz

yüksek binalar için hibrit kontrol sistemlerinin parametreleri optimize edilmiştir. Sistem aktif ayarlı kütle sönümleyicilerden oluşmaktadır. Amaç fonksiyonu olarak eğilme ve burulma kaynaklı tepkiler seçilmiştir. Rüzgâr yükünü temsil eden fonksiyonlar rüzgâr tüneli analizleri vasıtasıyla elde edilmiştir. Aktif sisteme yapıda bulunan ivmeölçerler ile geri beslemeler yapılmıştır. Aşamalı bir optimizasyon süreci yürütülerek öncelikle sönümleyici sayısı ve konumları ele alınmış ardından ivmeölçerlerin optimum konumları bulunmuştur. 60 katlı yüksek bir binaya uygulanan vaka çalışması neticesinde önerilen tasarım prosedürünün sistemin optimal davranışını elde etmekte başarılı olduğu ifade edilmiştir.

Zhao, Guo, Ma ve Ding (2020) tarafından yapılan çalışmada yüksek binaların rüzgâra dayanıklı optimum tasarımı için mafsallı sönümleyici sistemlerinin kullanımı incelenmiştir. SQP (Sequential Quadratic Programming) ve çok dereceli kısıtlı optimizasyon yöntemlerinin entegrasyonu ile elde edilen yöntem kullanılmıştır. Sönümleyici yerleşimi, sayısı ve sönüm oranı optimize edilerek rüzgâra dayanıklı bir sistem oluşturulması amaçlanmıştır. Sönümleyici parametrelerine ilişkin optimizasyon çerçevesi Şekil 16'da sunulmuştur. Çalışmada sıralı bir optimizasyon metodolojisi izlenmiştir. İlk olarak sönümleyici sayısı, bağlantı şekli ve sönümleyici niteliklerine ilişkin parametreler optimize edilmiş ardından taşıyıcı sistem optimizasyonu yapılmıştır. Kısıt olarak yanal ötelenme kullanılmıştır. Maliyet analizinin neticesinde incelenen yapı için %2 ilave sönüm oranı sağlayan sistem optimal olarak tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak; optimal sönümleyici dağılımı ile rüzgâra dayanıklı bina tasarımı için oldukça başarılı sonuçlara ulaşıldığı, optimize edilmiş sönümleyicilerle sağlanan ilave sönüm oranı ile yapı davranışının iyileştirildiği bununla birlikte toplam maliyetin de azaldığı belirtilmiştir.



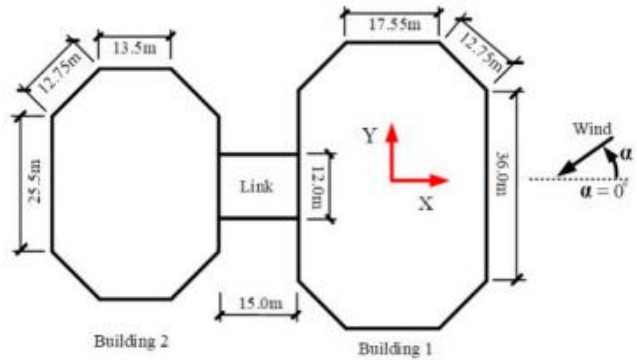
Şekil 16. Zhao ve diğ. (2020) Tarafından Optimize Edilen Sönümleyici Parametreleri

Kaveh, Javadi ve Moghanni (2020) tarafından yapılan çalışmada pasif ve ayarlı kütle sönümleyicilerin

optimum parametre ayarlamaları, yeni bir metasezgisel algoritma olan Kaotik Optimizasyon Algoritması (KOA) ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çözülen iki optimizasyon probleminden birisi rüzgâr yükleri altındaki yapının ayarlı kütle sönümleyiciler ile optimum tasarımıdır. Çözülen 76 katlı yapı ve rüzgâr etkilerinin hesaplandığı ampirik formül literatürdeki bir karşılaştırma probleminden elde edilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak katlar arasındaki maksimum ortalama karekök yer değiştirme seçilmiştir. Sonuç olarak öteleme ve ivmelerde önemli ölçüde azalma olduğu, önerilen metodolojinin yüksek binaların tasarımı için uygulanabileceği ifade edilmiştir.

Zhu, Lei, Wang, Tiwari ve Hazra (2020) tarafından yapılan çalışmada bağlantılı yüksek binaların (BYB) rüzgâr karşısındaki davranışlarının iyileştirilmesi için optimum durağanlaştırıcı ayarlı kütle sönümleyici (Tuned Mass Damper Inerter - TDMI) parametreleri araştırılmıştır. Rüzgâr yüklerinin belirlenmesi için rüzgâr tüneli analizleri yapılmıştır. Oluşturulan model

ve plan görünümü Şekil 17’de sunulmuştur. Optimizasyon problemi gelişmiş bir genetik algoritma türü olan NSGA-II ile çözülmüştür. Çok amaçlı bir optimizasyon süreci yürütülerek bağlantılı iki yapıdaki en büyük ivmelerin minimize edilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile konvansiyonel ayarlı kütle sönümleyicili (TMD) bina ve sönümleyici içermeyen binanın davranışları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak parametreleri optimize edilmiş TMDI sistemin üçte bir ağırlığına rağmen TMD sistemden ve sönümleyicisiz binadan daha başarılı bulunduğu raporlanmıştır. Aynı yapısal sistem Wang, Tian, Qiao, Tiwari ve Wang (2021) tarafından yeni bir pasif kontrol sistemi olan durağanlaştırıcı ayarlı sıvı kolon sönümleyici (Tuned Liquid Column Damper Inerter) ile de optimize edilmiştir. İvmelerin ve bağlantılı binalardan birisinin yer değiştirmelerinin standart sapmaları amaç fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Optimizasyon için MATLAB araç kutusundan çok amaç fonksiyonlu GA kullanılmıştır. Optimize edilmiş sistemin yapı davranışını ciddi oranda iyileştirdiği ifade edilmiştir.



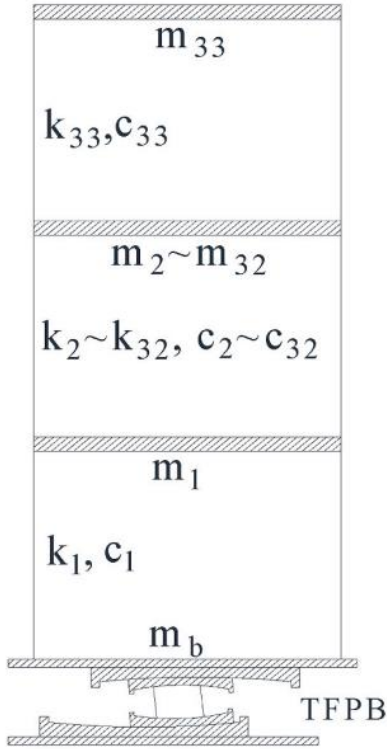
Şekil 17. Zhu ve diğ. (2020) ve Wang ve diğ. (2021) Tarafından Optimize Edilen BYB Modeli

Suthar ve Jangid (2021) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr etkisi altındaki yapıların titreşim kontrolü için ayarlı sıvı çalkantı sönümleyicilerinin (Tuned Liquid Sloshing Damper - TLSD) parametreleri optimize edilmiştir. Optimize edilen yapı ve rüzgâr yükleri literatürden elde edilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak üst kat pik ivmesi seçilmiştir. Optimizasyon MATLAB’ın fmincon araç kutusu vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Önerilen TLSD optimizasyon prosedürünün yüksek binaların rüzgâr etkilerine dayanıklı tasarımında

oldukça faydalı bulunduğu, TLSD’lerin pratik tasarımı için de kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Xu, Becker ve Guo (2021) tarafından yapılan çalışmada bir taban yalıtım elemanı olan üçlü sürtünmeli sarkaç sistemlerin parametrelerinin rüzgâr ve deprem yüklerine karşı optimize edilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle deprem ve rüzgâr yükleri için ayrı optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonlar neticesinde deprem etkisi için elde edilecek optimum taban yalıtımının rüzgâr etkisi için elde edilecek sistemle çeliştiği ifade edilmiştir. Daha rijit sistemler

rüzgâr etkisi altında başarıyla daha esnek sistemlerin deprem etkisi altında daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Buradan hareketle rüzgâr etkilerinin üstesinden gelebilecek en esnek sistem parametreleri bir genetik algoritma türevi olan NSGA-II ile araştırılmıştır. Optimize edilen yapı Şekil 18'de sunulmuştur. İvme ve ötelenmeler amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Rüzgâr yükleri Çin Rüzgâra Dayanıklı Tasarım Yönetmeliği (JTG/T D-60-01-2004) ile belirlenmiştir. Sonuç olarak, rüzgâr etkilerine dayanan etkili bir sismik izolasyon sistemine ulaşıldığı raporlanmıştır.



Şekil 18. Xu ve diğ. (2021) Tarafından Optimize Edilen Yapısal Sistem

Sönümleyici sistemler ile rüzgâra dayanıklı optimum tasarım konusunda açık deniz rüzgâr türbini yapıları üzerinde önemli sayıda çalışma olduğu gözlenmiştir. Rüzgâr kapasitesi bakımından avantajlı olduğu için açık denizlere konumlandırılan rüzgâr türbinleri aynı etki altında oluşan yapısal tepkiler karşısında da dayanıklı olmak zorundadır. Her ne kadar daha çok makine mühendisliğinin çalışma alanında bulunsun da konunun bu inceleme çalışması kapsamında da kısaca ele alınması uygun görülmüştür. He, Hu ve Zhang (2017) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr türbinleri için ayarlı kütle sönümleyicilerin parametre optimizasyonları GA ile gerçekleştirilmiştir. Jin ve diğ. (2018) tarafından yapılan benzer bir çalışmada yüzen rüzgâr türbini yapıları için Yapay Balık Sürüşü Algoritması (YBSA) ile ayarlı kütle sönümleyicisi optimizasyonu sunulmuştur. Alkmim, Fabro ve de

Morais (2018) tarafından yapılan çalışmada stokastik rüzgâr yükleri altındaki rüzgâr türbinlerinde, ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerin parametreleri Genelleştirilmiş Patern Arama Algoritması (GPAA) ile optimize edilmiştir. Park, Glade ve Lackner (2020) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr tribünleri için NSGA-II ile ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerin parametre optimizasyonları yapılmıştır. Liu, Wang, Hua, Zhu ve Zhu (2021) tarafından yapılan çalışmada ayarlı kütle sönümleyiciler ile rüzgâr türbinlerinin optimum tasarımı sunulmuştur. Çalışmada GPU teknolojisi sayesinde hesaplama maliyeti düşürülmüş makine öğrenmesi teknikleri ve GA kullanılmıştır.

5.1 Tartışma

SSRDOT alanındaki çalışmalar incelendiğinde, optimizasyon metodolojilerinin sönümleyicilerden beklenen faydayı maksimize etmek noktasında ciddi katkılar sağladığı anlaşılmıştır. Çalışmaların büyük ölçüde deprem etkisi altındaki optimizasyon çalışmaları ile paralel şekilde yürütüldüğü; tasarım değişkenlerinin benzer şekilde sönümleyici sayısı, yerleşimi ve parametreleri üzerinden; yapı tepkilerini minimize edecek şekilde temellendirildiği görülmüştür.

REAYO çalışmaları ile SSRDOT arasında amaç fonksiyonlarının belirlenmesi açısından dikkat çekici farklar olduğu gözlenmiştir. Yapısal optimizasyon çalışmaları daha çok yapının maliyetinin ya da ağırlığının azaltılması ile ilgilenirken, sönümleyici sistemler ile yapılan optimizasyon çalışmalarında amaç fonksiyonlarının genellikle doğrudan rüzgâr kaynaklı yapısal tepkiler olarak seçildiği görülmüştür. Sönümleyici sistemlerle yapı davranışını doğrusallaştırma hedefi için optimum sistem araştırılırken, "yer değiştirme standart sapmaları" ya da "maksimum ortalama karekök yer değiştirme" gibi oldukça farklı amaç fonksiyonlarının seçilmesi dikkat çekici bulunmuştur. Yapısal optimizasyon ve sönümleyici optimizasyonunun entegre şekilde ele alındığı az sayıda çalışmada ise iki optimizasyon sürecinin maliyet ekseninde birleştirilerek değerlendirildiği görülmüştür.

Tercih edilen optimizasyon yöntemleri incelendiğinde, AŞO ve REAYO alanındaki çalışmaların aksine gradyan tabanlı algoritmaların çok az sayıda çalışmada kullanıldığı, daha yenilikçi ve global optimuma yakınsama konusunda daha başarılı bulunan ve gradyan bilgisine ihtiyaç duymayan popülasyon tabanlı metasegisel algoritmaların yaygın olarak tercih edildiği görülmüştür. Bu bağlamda SSRDOT çalışmalarının AŞO ve REAYO'ya kıyasla optimizasyon metodolojisi bakımından daha ileride olduğu ifade edilebilir. Bu bölümde incelenen çalışmalar Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4

İncelenen SSRDOT Çalışmaları

Yazar ve Yıl	Amaç	Uygulama	Cihaz	Rüzgâr Yükü	Optimizasyon	Amaç Değeri
Huang ve diğ. (2011)	Rüzgâra dayanıklı yapısal tasarım (RDYT) için yapısal optimizasyon ve vibrasyon kontrol sistemlerinin birlikte kullanımı	60 katlı bina	Akıllı ayarlı kütle sönümleyici	Rüzgâr tüneli	OC	Maliyet
Venanzi ve diğ. (2012)	Hibrit kontrol sistemleri ile RDYT için bir optimizasyon prosedürü sunmak	60 katlı bina	Aktif ayarlı kütle sönümleyici	Rüzgâr tüneli	GA	Eğilme ve burulma kaynaklı tepkiler
He ve diğ. (2017)	Rüzgâr türbinleri için ayarlı kütle sönümleyici parametre optimizasyonu	Rüzgâr türbini	Ayarlı kütle sönümleyici	Simülasyon	GA	Yorulma etkisi
Jin ve diğ. (2018)	Rüzgâr türbinleri için ayarlı kütle sönümleyici parametre optimizasyonu	Rüzgâr türbini	Ayarlı kütle sönümleyici	Simülasyon	YBSA	Yer değiştirmedeki standart sapma
Alkım ve diğ. (2018)	Stokastik rüzgâr yükleri altında rüzgâr türbinlerinin ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerinin parametre optimizasyonu	Rüzgâr türbini	Ayarlı sıvı kolon sönümleyici	Stokastik	GPAA	Ortalama karekök tepki
Park ve diğ. (2020)	Rüzgâr türbinlerinin ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerinin parametre optimizasyonu	Rüzgâr türbini	Ayarlı sıvı kolon sönümleyici	Simülasyon	NSGA-II	Taban eğilme momentlerinin farklı yönler için eşdeğerleri
Zhao ve diğ. (2020)	Yüksek binaların deprem ve RDYT için sönümleyici sayısı, yerleşimi ve parametre optimizasyonu	70 katlı bina	Mafsallı sönümleyici (Toggle-Brace)	Rüzgâr tüneli	SQC	Maliyet
Kaveh ve diğ. (2020)	Pasif ve ayarlı kütle sönümleyici parametrelerinin yeni bir optimizasyon algoritması ile ayarlanması	Literatürdeki 76 katlı bina	Pasif ve ayarlı kütle sönümleyiciler	Ampirik formül	KOA	Katlar arasındaki maksimum ortalama karekök yer değiştirme
Zhu ve diğ. (2020)	Bağlantılı yüksek binaların rüzgâr davranışının optimum durağanlaştırıcı kütle sönümleyicilerle iyileştirilmesi	59 ve 55 katlı bağlantılı yüksek binalar	Durağanlaştırıcı ayarlı kütle sönümleyici	Rüzgâr tüneli	NSGA-II	Pik ivme
Liu ve diğ. (2021)	Rüzgâr türbinleri için ayarlı kütle sönümleyici parametre optimizasyonu	Rüzgâr türbini	Ayarlı kütle sönümleyici	Geçek rüzgâr dağılımları	GA ve Makine öğrenmesi	Eşdeğer yorulma yükü
Wang ve diğ. (2021)	Bağlantılı yüksek binaların rüzgâr davranışının optimum durağanlaştırıcı ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerle iyileştirilmesi	59 ve 55 katlı bağlantılı yüksek binalar	Durağanlaştırıcı ayarlı sıvı kolon sönümleyici	Rüzgâr tüneli	MATLAB gamultiobj	Pik ivme ve yer değiştirme standart sapması
Suthar ve Jangid (2021)	RDYT için titreşim kontrolünde ayarlı sıvı çalkantı sönümleyicileri için parametre optimizasyonu	Literatürdeki 76 katlı yüksek bina	Ayarlı sıvı çalkantı sönümleyicilerinin	Literatürden	MATLAB fmincon	Pik ivme
Xu ve diğ. (2021)	Üçlü sürtümlü sarkaç sistemlerin optimum tasarımı ile hem depreme hem de rüzgâra dayanıklı tasarım	33 katlı bina	Üçlü sürtümlü sarkaç	Çin Rüzgâra Dayanıklı Tasarım Yönetmeliği (JTG/T D60-01-2004)	NSGA-II	İvme ve yer değiştirme

6. Sonuçlar

Bu çalışmada literatürde bulunan rüzgâr etkileri altında optimum yapı tasarımı konulu çalışmaların incelenmesi amaçlanmıştır. Kaynak taraması neticesinde konunun aerodinamik şekil optimizasyonu, rüzgâr etkisi altında yapısal optimizasyon ve sönümleyici sistemler ile rüzgâra dayanıklı optimum tasarım adı altında üç ana başlıkta incelenmesi uygun görülmüştür. Yapılan incelemeler neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Rüzgâr etkileri altında yapı tasarımı süreçlerinin karmaşık ve elle çözümü oldukça zor optimizasyon problemleri ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Öyle ki çözümü için özellikle HAD simülasyonlarına ihtiyaç duyulan bazı problemler için modern bilgisayarların sunduğu hesaplama gücünün dahi yetersiz kaldığı açıktır. Buradan hareketle pratikte yaygın olarak kullanılan deneme-yanılma gibi yöntemlerle optimuma yaklaşmanın oldukça güç olduğu görülmüştür. Bu bağlamda güncel optimizasyon metodolojilerinin, rüzgâra dayanıklı yapı tasarımı alanında kullanılan

stratejilerin başarımlarını maksimize etmek için alternatifsiz yaklaşımlar olduğu anlaşılmaktadır.

- Literatürdeki çalışmalarda; rüzgâr etkileri altında optimum yapı tasarımının, belirtilen alt başlıklar için münferit olarak ele alındığı görülmüştür. Faydanın maksimize edilebilmesi adına sürecin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesinin daha uygun olacağı düşünülmektedir. Bunun için AŞO, REAYO ve SSRDOT metodolojilerinin entegre bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bu bağlamda mimarlık, yapı mühendisliği, rüzgâr mühendisliği ve optimizasyon gibi alanların çok disiplinli çalışmalarına ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır.

- Rüzgâr yüklerinin belirlenmesinde rüzgâr tüneli analizleri, istatistiksel yöntemler, vekil modelleme, rüzgâr yükü yönetmelikleri, stokastik yöntemler gibi pek çok farklı metodolojinin kullanıldığı görülmektedir. Optimizasyonun temel girdisinin belirlenmesindeki çeşitlilik sonuçlar üzerinde de ciddi etkiler doğurmaktadır. Öyle ki uygulanan bazı yöntemlerin güvensiz olabileceği, bunlarla belirlenen rüzgâr yükleri

ile yürütülen optimizasyonların sonuçlarının da "emniyetsiz" tasarımlara neden olabileceği gibi eleştiriler bulunmaktadır. Bu bağlamda optimizasyon algoritmalarına kolayca entegre edilebilir, hesaplama maliyeti düşük, doğruluğu yüksek ve güvenilir yaklaşımlara ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın birinci yazarı YÖK 100/2000 projesi kapsamında doktora bursuyla desteklenmektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Yazar1, Literatür araştırması, makalenin yazımı, düzeltmelerin yapılması ve yayına hazırlık; Yazar2, Araştırma sürecinin takibi, yönlendirilmesi, kontrolü, sonuçların değerlendirilmesi ve yayına hazırlık; Yazar3, Araştırma sürecinin takibi, yönlendirilmesi, kontrolü, sonuçların değerlendirilmesi, inceleme ve düzeltme konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Abdelaziz, K. M., Alipour, A., & Hobeck, J. D. (2021). A smart façade system controller for optimized wind-induced vibration mitigation in tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 212, 104601. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104601>

Academia. Erişim Adresi: www.academia.edu, ET: 10.12.2021

Alkım, M. H., Fabro, A. T., & de Moraes, M. V. (2018). Optimization of a tuned liquid column damper subject to an arbitrary stochastic wind. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 511. doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1471-3>

Athanasiou, A., Stathopoulos, T., & Tirca, L. (2020). Discussion of "Performance-Based Wind-Resistant Optimization Design for Tall Building Structures" by Ting Deng, Jiyang Fu, Qingxing Zheng, Jiurong Wu, and Yonglin Pi. *Journal of Structural Engineering*, 146(8), 07020009. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002754](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002754)

Bernardini, E., Spence, S. M., Wei, D., & Kareem, A. (2015). Aerodynamic shape optimization of civil structures: A CFD-enabled Kriging-based approach. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144, 154-164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.011>

Chan, C. M., & Huang, M. F. (2010). *Optimal wind resistant performance-based design of tall buildings*. Paper presented at the Structures Congress 2010: 19th Analysis and Computation Specialty Conference, Orlando, Florida.

Chan, C. M., Huang, M. F., & Kwok, K. C. (2010). Integrated wind load analysis and stiffness optimization of tall buildings with 3D modes. *Engineering Structures*, 32(5), 1252-1261. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.01.001>

Deng, T., Fu, J., Zheng, Q., Wu, J., & Pi, Y. (2019). Performance-based wind-resistant optimization design for tall building structures. *Journal of Structural Engineering*, 145(10), 04019103. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002383](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002383)

Ding, F., & Kareem, A. (2018). A multi-fidelity shape optimization via surrogate modeling for civil structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 178, 49-56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.022>

Elshaer, A., Bitsuamlak, G. T., & El Damatty, A. (2016). *Aerodynamic shape optimization of tall buildings using twisting and corner modifications*. Paper presented at the 8th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, Boston, Massachusetts.

Elshaer, A., Bitsuamlak, G., & El Damatty, A. (2015). *Aerodynamic shape optimization for corners of tall buildings using CFD*. Paper presented at the 14th International conference on wind engineering, Porto Alegre, Brazil.

Foley, C.M. (2002). *Recent advances in optimal structural design: Optimized performance-based design for buildings*. Washington, DC: ASCE.

Fu, J. Y., Wu, B. G., Wu, J. R., Deng, T., Pi, Y. L., & Xie, Z. N. (2018b). Wind resistant size optimization of geometrically nonlinear lattice structures using a modified optimality criterion method. *Engineering Structures*, 173, 573-588. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.017>

Fu, J. Y., Wu, B. G., Xu, A., Wu, J. R., & Pi, Y. L. (2018c). A new method for frequency constrained structural optimization of tall buildings under wind loads. *The Structural Design of Tall and Special*

- Buildings*, 27(18), e1549. doi: <https://doi.org/10.1002/tal.1549>
- Fu, J., Zheng, Q., Huang, Y., Wu, J., Pi, Y., & Liu, Q. (2018a). Design optimization on high-rise buildings considering occupant comfort reliability and joint distribution of wind speed and direction. *Engineering Structures*, 156, 460-471. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.041>
- Gomez, F., Spencer Jr, B. F., & Carrion, J. (2021). Topology optimization of buildings subjected to stochastic wind loads. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 64, 103127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2021.103127>
- Google Scholar. Erişim Adresi: scholar.google.com, ET: 10.12.2021
- He, E. M., Hu, Y. Q., & Zhang, Y. (2017). Optimization design of tuned mass damper for vibration suppression of a barge-type offshore floating wind turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 231(1), 302-315. doi: <https://doi.org/10.1177/1475090216642466>
- Huang, M. (2017). *High-rise buildings under multi-hazard environment: Performance-based design optimization of wind-excited tall buildings*. Singapore: Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-1744-5_7
- Huang, M. F., Chan, C. M., & Lou, W. J. (2012). Optimal performance-based design of wind sensitive tall buildings considering uncertainties. *Computers & Structures*, 98, 7-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.01.012>
- Huang, M. F., Li, Q., Chan, C. M., Lou, W. J., Kwok, K. C., & Li, G. (2015). Performance-based design optimization of tall concrete framed structures subject to wind excitations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, 70-81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.005>
- Huang, M. F., Tse, K. T., Chan, C. M., & Lou, W. J. (2011). Integrated structural optimization and vibration control for improving wind-induced dynamic performance of tall buildings. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 11(06), 1139-1161. doi: <https://doi.org/10.1142/S021945541100452X>
- Jafari, M., & Alipour, A. (2021). Aerodynamic shape optimization of rectangular and elliptical double-skin façades to mitigate wind-induced effects on tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 213, 104586. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104586>
- Jaouadi, Z., Abbas, T., Morgenthal, G., & Lahmer, T. (2020). Single and multi-objective shape optimization of streamlined bridge decks. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 61(4), 1495-1514. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02431-3>
- Jin, X., Xie, S., He, J., Lin, Y., Wang, Y., & Wang, N. (2018). Optimization of tuned mass damper parameters for floating wind turbines by using the artificial fish swarm algorithm. *Ocean Engineering*, 167, 130-141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.031>
- Kaveh, A., Javadi, S. M., & Moghanni, R. M. (2020). Optimal structural control of tall buildings using tuned mass dampers via chaotic optimization algorithm. *Structures*, 28, 2704-2713. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.002>
- Kim, B., Tse, K. T., Chen, Z., & Park, H. S. (2020). Multi-objective optimization of a structural link for a linked tall building system. *Journal of Building Engineering*, 31, 101382. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101382>
- Li, Q. S., Zou, X. K., Wu, J. R., & Wang, Q. (2011). Integrated wind-induced response analysis and design optimization of tall steel buildings using Micro-GA. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(8), 951-971. doi: <https://doi.org/10.1002/tal.569>
- Li, S., Snaiki, R., & Wu, T. (2021). A knowledge-enhanced deep reinforcement learning-based shape optimizer for aerodynamic mitigation of wind-sensitive structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(6), 733-746. doi: <https://doi.org/10.1111/mice.12655>
- Li, Y., & Li, Q. S. (2016). Wind-induced response based optimal design of irregular shaped tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 155, 197-207. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.06.001>
- Li, Y., Duan, R. B., Li, Q. S., Li, Y. G., & Huang, X. (2020). Wind-resistant optimal design of tall buildings based on improved genetic algorithm. *Structures*, 27, 2182-2191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.036>
- Liu, Z., Wang, Y., Hua, X., Zhu, H., & Zhu, Z. (2021). Optimization of wind turbine TMD under real wind distribution countering wake effects using GPU acceleration and machine learning technologies. *Journal of Wind Engineering and*

- Industrial Aerodynamics*, 208, 104436. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104436>
- Momtaz, A.A., Abdollahian, M.A., & Farshidianfar, A. (2017). Study of wind-induced vibrations in tall buildings with tuned mass dampers taking into account vortices effects. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 9(4), 385–395. doi: <https://doi.org/10.1007/s40091-017-0174-9>
- Mooneghi, M. A., & Kargarmoakhar, R. (2016). Aerodynamic mitigation and shape optimization of buildings. *Journal Of Building Engineering*, 6, 225-235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.01.009>
- Park, S., Glade, M., & Lackner, M. A. (2020). Multi-objective optimization of orthogonal TLCs for reducing fatigue and extreme loads of a floating offshore wind turbine. *Engineering Structures*, 209, 110260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110260>
- Paul, R., & Dalui, S. (2021). Shape optimization to reduce wind pressure on the surfaces of a rectangular building with horizontal limbs. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(1), 134-149. doi: <https://doi.org/10.3311/PPci.16888>
- Qiu, Y., Yu, R., San, B., & Li, J. (2022). Aerodynamic shape optimization of large-span coal sheds for wind-induced effect mitigation using surrogate models. *Engineering Structures*, 253, 113818. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113818>
- Researchgate. Erişim Adresi: www.researchgate.net, ET: 10.12.2021
- ScienceDirect. Erişim Adresi: www.sciencedirect.com, ET: 10.12.2021
- Shahrouzi, M., Meshkat-Dini, A., & Azizi, A. (2015). Optimal wind resistant design of tall buildings utilizing mine blast algorithm. *International Journal Of Optimization in Civil Engineering*, 5(2), 137-150. Erişim Adresi: <http://ijoce.iust.ac.ir/article-1-204-en.html>
- Spence, S. M.J., & Giofrè, M. (2012). Large scale reliability-based design optimization of wind excited tall buildings. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 28, 206-215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2011.08.001>
- Subgranon, A., & Spence, S. M. (2021). Performance-based Bi-objective optimization of structural systems subject to stochastic wind excitation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 160, 107893. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107893>
- Suthar, S. J., & Jangid, R. S. (2021). Design of tuned liquid sloshing dampers using nonlinear constraint optimization for across-wind response control of benchmark tall building. *Structures*, 33, 2675-2688. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.059>
- Tsavdaridis, K. D., Nicolaou, A., Mistry, A. D., & Efthymiou, E. (2020). Topology optimisation of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads. *Structures*, 27, 2379-2399. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.010>
- Venanzi, I., Ubertini, F., & Materazzi, A. L. (2012). Optimal design of an array of active tuned mass dampers for wind-exposed high-rise buildings. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(6), 903-917. doi: <https://doi.org/10.1002/stc.1502>
- Wang, Q., Tian, H., Qiao, H., Tiwari, N. D., & Wang, Q. (2021). Wind-induced vibration control and parametric optimization of connected high-rise buildings with tuned liquid-column-damper-inerter. *Engineering Structures*, 226, 111352. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111352>
- Web of Science. Erişim Adresi: www.webofscience.com, ET: 10.12.2021
- Whiteman, M. L., Fernández-Cabán, P. L., Phillips, B. M., Masters, F. J., Davis, J. R., & Bridge, J. A. (2021). Cyber-physical aerodynamic shape optimization of a tall building in a wind tunnel using an active fin system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104835. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104835>
- Xie, J. (2014). Aerodynamic optimization of super-tall buildings and its effectiveness assessment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 130, 88-98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.04.004>
- Xu, A., & Zhao, R. H. (2020). Wind-resistant structural optimization of a supertall building with complex structural system. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 62(6), 3493-3506. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02652-x>
- Xu, A., Lin, H., Fu, J., & Sun, W. (2021). Wind-resistant structural optimization of supertall buildings based on high-frequency force balance wind tunnel experiment. *Engineering Structures*, 248, 113247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113247>

- Xu, Y., Becker, T. C., & Guo, T. (2021). Design optimization of triple friction pendulums for high-rise buildings considering both seismic and wind loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 142, 106568. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106568>
- Zhang, R., Waibel, C., & Wortmann, T. (2020). Aerodynamic shape optimization for high-rise conceptual design-integrating and validating parametric design, (fast) fluid dynamics, structural analysis and optimization. *Design and Computation of Urban and Local Systems*, 1, 37-45. doi: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2020.1.037>
- Zhao, L., Cui, W., Zhan, Y., Wang, Z., Liang, Y., & Ge, Y. (2020). Optimal structural design searching algorithm for cooling towers based on typical adverse wind load patterns. *Thin-Walled Structures*, 151, 106740. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106740>
- Zhao, X., Guo, J., Ma, H., & Ding, K. (2020). Integrated optimal wind-resistant design of super-tall structures with toggle-brace damper systems. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 29(16), e1799. doi: <https://doi.org/10.1002/tal.1799>
- Zhu, Z., Lei, W., Wang, Q., Tiwari, N., & Hazra, B. (2020). Study on wind-induced vibration control of linked high-rise buildings by using TMDI. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 205, 104306. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104306>