

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MİMARLIK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GÖRSEL VE TERMAL KONFORU İYİLEŞTİRMEYE YÖNELİK
ORİGAMİ TABANLI DUYARLI CEPHE MODELİ**

BETÜL KAHRAMANOĞLU

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MİMARLIK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖRSEL VE TERMAL KONFORU İYİLEŞTİRMeye YÖNELİK
ORİGAMİ TABANLI DUYARLI CEPHE MODELİ

BETÜL KAHRAMANOĞLU

Doç.Dr. Neşe Çakıcı Alp
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Doç.Dr. Mehtap Özbayraktar
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Doç.Dr. Mehmet İnceoğlu
Jüri Üyesi, Eskişehir Teknik Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 26.01.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Betül KAHRAMANOĞLU

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan “*Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Betül KAHRAMANOĞLU

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bana olan inancı ile her daim destek olan, bilgisi ve deneyimleriyle beni yönlendiren, araştırma ve çalışmalarımda her zaman yol gösteren değerli tez danışmanım Doç. Dr. Neşe Çakıcı Alp'e teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca anlayışları, sabırları ve destekleri ile hep yanımda olan çok değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık - 2022

Betül KAHRAMANOĞLU



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLOLAR DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanımı.....	2
1.2. Amaç ve Yöntem.....	3
1.3. Kapsam ve İçerik.....	4
2. UYARLANABİLİR DUYARLI CEPHELER.....	7
2.1. Uyarlanabilir (Adaptive) Cephe Tanımı ve Özellikleri.....	7
2.2. Duyarlı (Responsive) Cephe Tanımı.....	9
2.3. Duyarlı Cephenin Gelişimi ve İlerleyişi.....	9
2.4. Duyarlı Cephe Sistemlerinin İşleyişi.....	15
2.5. Duyarlı Cephe Sistemlerine Etki Eden Etmenler.....	18
2.6. Parametrik Tasarım.....	18
3. ORİGAMİ.....	22
3.1. Origami ve Özellikleri.....	22
3.2. Origami Terimleri.....	29
3.3. Origami Katlama Desenleri.....	30
3.3.1. Miura-ori Deseni.....	30
3.3.2. Waterbomb Deseni.....	31
3.3.3. Yoshimura Deseni.....	33
3.3.4. Diagonal Desen.....	33
3.4. Yaygın Katlama Türleri.....	34
3.4.1. Ters Katlama (Reverse Fold).....	35
3.4.2. Tavşan Kulağı Katlama (Rabbit-ear Fold).....	35
3.4.3. Pilise Katlama (Pleat Fold).....	36
3.4.4. Taç Yapağı Katlama (Petal Fold).....	36
3.4.5. Kabak Katlama (Squash Fold).....	36
3.4.6. Kıvrımlı Katlama (Crimp Fold).....	37
3.4.7. Açık Çöküntü Katlama (Open Sink Fold).....	38
3.5. Origamiden Esinlenen Duyarlı Cephe Örnekleri.....	38
4. ORİGAMİDEN ESİNLENEN DUYARLI CEPHENİN MODELLENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	47
4.1. Metodoloji.....	47
4.2. Vaka Çalışması.....	48
4.3. Simülasyon Modeli.....	48
4.3.1. Boyutsal ve Geometrik Özellikler.....	49
4.3.2. Konum ve İklim Özellikleri.....	50
4.3.3. İç Mekân Özellikleri.....	51
4.3.4. Kullanıcı Konumları.....	52

4.3.5. ORF Tiplerine İlişkin Özellikler.....	53
4.3.5.1. ORF-1 Modül Özellikleri.....	55
4.3.5.2. ORF-2 Modül Özellikleri.....	55
4.3.5.3. ORF-3 Modül Özellikleri.....	56
4.3.5.4. ORF-4 Modül Özellikleri.....	56
4.4. Cephe Modüllerinin Dijital Üretimi.....	57
4.5. Değerlendirme Ölçütleri.....	63
4.5.1. Görsel performans değerlendirme ölçütleri.....	63
4.5.2. Enerji performansı değerlendirme ölçütleri.....	66
4.6. Simülasyon Süreci.....	67
4.6.1. Görsel performansının Değerlendirilmesi.....	67
4.6.1.1. Temel Durum için Simülasyon Sonuçları.....	69
4.6.1.2. ORF-1 Modülü için Simülasyon Sonuçları.....	74
4.6.1.3. ORF-2 Modülü için Simülasyon Sonuçları.....	75
4.6.1.4. ORF-3 Modülü için Simülasyon Sonuçları.....	81
4.6.1.5. ORF-4 Modülü için Simülasyon Sonuçları.....	82
4.6.2. Enerji Performansının Değerlendirilmesi	88
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR.....	106
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	116
ÖZGEÇMİŞ.....	117

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Çalışmaya ait akış şeması.....	6
Şekil 2.1.	Güneş kontrol elemanlarının kullanıldığı Paris Arap Enstitüsü Bina Cephesi.....	11
Şekil 2.2.	(a) Bir grup mashrabiya diyaframının çalışır durumdaki görünümü (b) Büyük diyaframın detayı (c) Orta büyüklükteki diyaframın detayı (d) Küçük diyaframın detayı.....	12
Şekil 2.3.	Paris Arap Enstitüsü binası mashrabiyaaların açık olma durumunda iç mekân görünümü.....	12
Şekil 2.4.	MEDYA-TIC binası A) Cephe görünüşü, B) Sistem detayı, C) İç mekân görünümü.....	14
Şekil 2.5.	A. Tematik Üst Örtü, Expo 2012, Yeosu Kore; B. (a) Cennet Kuşu çiçeği; (b) temel Flectofin prensibi; (c) Flectofin panjurlarının projelendirilmesi; ve (d) Lamella cephesi - kapalıdan 60 ° açıklığa hareketi.....	15
Şekil 2.6.	Dinamik cephelerin tipolojileri ve örnekleri.....	17
Şekil 3.1.	Origamiden esinlenen disiplinler.....	23
Şekil 3.2.	A) Yokohama Uluslararası Yolcu Terminali ve B) İç mekân etkisi.....	24
Şekil 3.3.	A) Pleats Binası ve B) Cephenin iç mekâna etkisi.....	24
Şekil 3.4.	Packaged.....	25
Şekil 3.5.	A) Folded Hut ve B) İç mekân görünümü.....	26
Şekil 3.6.	Recover Shelter.....	26
Şekil 3.7.	A) Xile ve B) İç mekân görünümü.....	27
Şekil 3.8.	Auxetic Origami'nin katlanma aşamaları.....	27
Şekil 3.9.	Lotus Dome.....	27
Şekil 3.10.	Versus.....	28
Şekil 3.11.	Origami'nin temel kavramlarını gösteren kırıxıklık deseni.....	30
Şekil 3.12.	A) Miura-ori kırıxıklık deseni ve B) Miura-ori'nin bükölme hareketi.....	31
Şekil 3.13.	Miura-ori'nin sert katlanma hareketi.....	31
Şekil 3.14.	İki Waterbomb tabanı ve kırıxıklık desenleri; A) Sekiz kıvrımlı Waterbomb kırıxıklık deseni; B) Resch modelini oluşturan kırıxıklık desenlerinden biri; C) Kısmen katlanmış Resch modeli; D) Altı kıvrımlı Waterbomb kırıxıklık deseni, E) Katlanmamış ve katlanmış halde altı kıvrımlı model ve F) Desenin tüp olarak katlanmış modeli.....	32
Şekil 3.15.	A) Altı kıvrımlı Waterbomb deseninin temel birimi; B) Temel birimlerin kombinasyonu ve C) Waterbomb deseninden yapılan silindir.....	33
Şekil 3.16.	A) Yoshimura Kırıxıklık Deseni ve B) Yoshimura Deseni.....	34
Şekil 3.17.	A) Diagonal Kırıxıklık Deseni ve B) Diagonal Desen.....	34
Şekil 3.18.	İç ters katlama kırıxıklık deseni aşamaları.....	35
Şekil 3.19.	Dış ters katlama kırıxıklık deseni aşamaları.....	35
Şekil 3.20.	Tavşan kulağı kırıxıklık deseni aşamaları.....	35
Şekil 3.21.	Pilise katlama kırıxıklık deseni aşamaları.....	36
Şekil 3.22.	Taç yaprağı katlama kırıxıklık deseni aşamaları.....	37
Şekil 3.23.	Kabak katlama kırıxıklık deseni aşamaları.....	37
Şekil 3.24.	Kıvrımlı katlama kırıxıklık deseni aşamaları.....	38

Şekil 3.25.	Kıvrımlı katlama kırışıklık deseni aşamaları	38
Şekil 4.1.	Referans odaya ait; (A) Kısmi plan, (B) Kesit.....	49
Şekil 4.2.	Türkiye İklim bölgesi haritası.....	50
Şekil 4.3.	Cephe elemanlarının değerlendirme yüzeyini etkilemesine izin veren etkilenen alanın oluşum diyagramı.....	53
Şekil 4.4.	Katlanmış kâğıt maket incelemeleri.....	54
Şekil 4.5.	a) ORF-1 modül deseninin dağ ve vadi kıvrımları, b) ORF-1 modül deseni plan düzleminde görünümü ve eklem noktalarının konumları.....	55
Şekil 4.6.	a) ORF-2 modül deseninin dağ ve vadi kıvrımları, b) ORF-2 modül deseni plan düzleminde görünümü ve eklem noktalarının konumları.....	56
Şekil 4.7.	a) ORF-3 modül deseninin dağ ve vadi kıvrımları, b) ORF-3 modül deseni plan düzleminde görünümü ve eklem noktalarının konumları.....	56
Şekil 4.8.	a) ORF-4 modül deseninin dağ ve vadi kıvrımları, b) ORF-4 modül deseni plan düzleminde görünümü ve eklem noktalarının konumları.....	57
Şekil 4.9.	Tüm adımlarda ORF-1 ve 2 modül desenlerinin planı (üstten görünümü), perspektif ve önden görünümü.....	58
Şekil 4.10.	Tüm adımlarda ORF-3 ve 4 modül desenlerinin planı (üstten görünümü), perspektif ve önden görünümü.....	59
Şekil 4.11.	Dijital model eylemlerinin şematik gösterimi.....	60
Şekil 4.12.	Kare modül cephe modeli oluşturma'nın 7 ana adımı – Grasshopper senaryosu.....	60
Şekil 4.13.	Grasshopper senaryosu adım detayları.....	61
Şekil 4.14.	Climate Studio'da analiz gridine ait değerlerin belirlenmesi.....	63
Şekil 4.15.	Referans odaya yerleştirilen ızgara, tefriş düzeni ve kullanıcıların bakış doğrultuları.....	66
Şekil 4.16.	Simülasyona ait akış şeması.....	68
Şekil 4.17.	Temel durum için yıllık iklim tabanlı gün ışığı ölçümleri ızgara değerlendirmesi.....	70
Şekil 4.18.	Kullanıcıların yıl boyunca sahip oldukları aydınlık düzeyleri.....	71
Şekil 4.19.	Kullanıcıların yıl boyunca sahip oldukları gün ışığı performansı değerleri.....	72
Şekil 4.20.	ORF-1 modülüne ait çalışma düzlemindeki gün ışığı performansı düzeyleri.....	76
Şekil 4.21.	ORF-2 modülüne ait çalışma düzlemindeki gün ışığı performansı düzeyleri.....	79
Şekil 4.22.	ORF-3 modülüne ait çalışma düzlemindeki gün ışığı performansı düzeyleri.....	83
Şekil 4.23.	ORF-4 modülüne ait çalışma düzlemindeki gün ışığı performansı düzeyleri.....	86
Şekil 4.24.	Temel durum için soğutma yüklerinin yıl boyunca dağılımı.....	88
Şekil 4.25.	Temel durum için ısıtma yüklerinin yıl boyunca dağılımı.....	88
Şekil 4.26.	Temel durum ve ORF modüllerinin soğutma yüklerinin karşılaştırılması.....	89
Şekil 4.27.	Temel durum ve ORF modüllerinin soğutma yüklerinin ve UDI aydınlık düzeyi yüzdelerinin karşılaştırılması.....	89
Şekil 5.1.	Temel durum, ORF-1, ORF-2, ORF-3 ve ORF-4 modüllerinin UDI yüzdeleri arasındaki ilişki.....	96

Şekil 5.2.	Temel durum, ORF-1, ORF-2, OR -3 ve ORF-4 modüllerinin UDI yüzdeleri arasındaki ve kullanıcı 1'in kamaşma değerleri arasındaki ilişki.....	96
Şekil 5.3.	Temel durum, ORF-1, ORF-2, OR -3 ve ORF-4 modüllerinin UDI yüzdeleri arasındaki ve kullanıcı 2'nin kamaşma değerleri arasındaki ilişki.....	97
Şekil 5.4.	Temel durum, ORF-1, ORF-2, OR -3 ve ORF-4 modüllerinin UDI yüzdeleri arasındaki ve kullanıcı 3'ün kamaşma değerleri arasındaki ilişki.....	97
Şekil 5.5.	Temel durum, ORF-1, ORF-2, OR -3 ve ORF-4 modüllerinin UDI yüzdeleri arasındaki ve kullanıcı 4'ün kamaşma değerleri arasındaki ilişki.....	98



TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1.	Origami tabanlı cephelerin modelleme araçlarına, karakteristik unsurlarına, detayına, hareket çeşitlerine ve işlevlerine göre sınıflandırılması.....	44
Tablo 4.1.	Araştırma sınırları.....	49
Tablo 4.2.	İstanbul'a ait iklim verileri.....	51
Tablo 4.3.	Ortak malzeme yüzeylerinin optik özellikleri.....	52
Tablo 4.4.	Parlama indeksi ve gün ışığını değerlendirmek için bazı parametreler.....	64
Tablo 4.5.	Temel durum için aydınlık düzeyi yüzdeleri.....	73
Tablo 4.6.	Temel durum için gün ışığı performansı değerleri.....	73
Tablo 4.7.	ORF-1 modülü için aydınlık düzeyi yüzdeleri.....	74
Tablo 4.8.	ORF-1 modülü için gün ışığı performansı değerleri.....	75
Tablo 4.9.	ORF-1 modülü için gün ışığı performansı değerleri.....	77
Tablo 4.10.	ORF-2 modülü için aydınlık düzeyi yüzdeleri.....	78
Tablo 4.11.	ORF-2 için gün ışığı performansı değerleri.....	78
Tablo 4.12.	ORF-2 için gün ışığı performansı değerleri.....	80
Tablo 4.13.	ORF-3 modülü için aydınlık düzeyi yüzdeleri.....	81
Tablo 4.14.	ORF-3 için gün ışığı performansı değerleri.....	82
Tablo 4.15.	ORF-3 modülü için gün ışığı performansı değerleri.....	84
Tablo 4.16.	ORF-4 modülü için aydınlık düzeyi yüzdeleri.....	85
Tablo 4.17.	ORF-4 modülü için gün ışığı performansı değerleri.....	85
Tablo 4.18.	ORF-4 modülü için gün ışığı performansı değerleri.....	87
Tablo 5.1.	21 Mart tarihinde tüm durumlar için ofis odasının kamaşma düzeyi dağılımları.....	99
Tablo 5.2.	21 Haziran tarihinde tüm durumlar için ofis odasının kamaşma düzeyi dağılımları.....	100
Tablo 5.3.	21 Aralık tarihinde tüm durumlar için ofis odasının kamaşma düzeyi dağılımları.....	101
Tablo 5.4.	21 Mart tarihinde tüm durumlar için ofis odasının aydınlık düzeyi dağılımları.....	102
Tablo 5.5.	21 Haziran tarihinde tüm durumlar için ofis odasının aydınlık düzeyi dağılımları.....	103
Tablo 5.6.	21 Aralık tarihinde tüm durumlar için ofis odasının aydınlık düzeyi dağılımları.....	104

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

AF	: Adaptive Facade (Uyarlanabilir Cephe)
ASE	: Annual Sunlight Exposure (Yıllık Güneşe Maruz Kalma)
BCMO	: Balancing Composite Moton Optimization (Bileşik Hareket Optimizasyonunu Dengeleme)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar destekli tasarım)
CAM	: Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar destekli üretim)
DA	: Daylight Autonomy (Günüşığı Özerkliği)
DGI	: Daylight Glare Index (Gün Işığı Parlama İndeksi)
DGP	: Daylight Glare Probability (Gün Işığında Parlama Olasılığı)
ETFE	: Etilen Tetra Floro Etilen
EUDI	: Exceed Useful Daylight Illuminance (Faydalı Gün ışığı Aydınlığı Aşma Değeri)
FUDI	: Failing Useful Daylight Illuminance (Yetersiz Gün Işığı Aydınlığı)
HVAC	: Heating, ventilation, and air conditioning (Isıtma, havalandırma, klima sistemleri)
IAQ	: İç mekân hava kalitesi.
LEED	: Leadership in Energy and Environmental Design (Enerji ve Çevre Tasarımında Liderlik)
ORF	: Origami-based Responsive Facade (Origami Tabanlı Duyarlı Cephe)
sDA	: Spatial Daylight Autonomy (Mekansal Gün ışığı Özerkliği)
SGHC	: Solar Heat Gain Coefficient (Güneş Enerjisi Toplam Geçirgenlik)
SMA	: Shape Memory Alloys (Şekil Hafızalı Alaşımlar)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
UDI	: Useful Daylight Illuminance (Faydalı Gün ışığı Aydınlığı)

GÖRSEL VE TERMAL KONFORU İYİLEŞTİRMEYE YÖNELİK ORIGAMI TABANLI DUYARLI CEPHE MODELİ

ÖZET

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte yapılardan beklenen, sürekli değişen çevresel koşullara cevap veren ve kendini değiştirme potansiyeline sahip uyarlanabilir cephelere sahip olmasıdır. Cephenin uyum göstermesi yalnızca iklime duyarlı olmayı değil kullanıcı, nesne gibi farklı etkenler karşısında ve farklı ölçeklerde değişkenlik gösterebilme durumudur. Uyarlanabilir cepheler ve gölgeleme teknolojileri, cephe sisteminin, dış ortam iklimi, gün ışığı talepleri ve güneş açılarına göre tepki vermesine ve değiştirmesine izin vererek, ışık, hava ve güneş enerjisinin yönetilmesini sağlayan, aynı zamanda kullanıcı konforunu ve enerji tasarrufunu en üst düzeye çıkaran gelişmiş sistemler olarak görülmektedir.

Yapılan literatür taramalarında araştırmaların çoğunun gün ışığı performansına ve yapay ışık tüketimini azaltmaya odaklandığı görülmektedir. Bununla birlikte dış görüş memnuniyeti için araştırma ve çalışmalar yetersizdir. Önceki çalışmaların boşlukları ve potansiyelleri dikkate alınarak, tezde kullanıcıların görsel konforunda (yani iç mekân aydınlatma seviyelerinde ve dış çevre görünürlüğünde) minimum azalma ile güneş ısı kazancını ve dolayısıyla binanın enerji tüketimini azaltan origami tabanlı, duyarlı (responsive) bir cephe önerisi sunmak amaçlandı.

Bu kapsamda, origaminin temel özellikleri ve origamiden ilham alan duyarlı cephelerin performans değerlendirmesinin nasıl yapıldığı literatür üzerinden araştırmalar yaparak incelendi. Kullanılan yazılımlar ve araçlar incelenerek amaçlanan çalışmayı yapmak için Rhino ve eklentileri ile simülasyon modeli oluşturuldu. Mevcut örneklerden yararlanılarak görsel konforu değerlendirmek için çalışmada, Gün Işığı Özerkliği, Gün Işığı Parlama Olasılığı, Faydalı Gün Işığı Aydınlatması, Faydalı Gün Işığı Aydınlatmasını Aşma ve görsel performans kriterleri dahil olmak üzere temel gün ışığı performans ölçümlerini dikkate alan bir simülasyon modeli ile simülasyonlar gerçekleştirildi. Çalışma sonunda, simülasyon sonuçlarını ele alarak genel bir değerlendirme yapıldı. Sonuçlar, gün ışığı performansını iyileştirmek için ORF-4 modülünün çalışmada tasarlanan diğer modüllere kıyasla en iyi performansı sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Duyarlı Cephe, Gün Işığı Performansı, Gün Işığı ve Kullanıcı Konumları, Miura-ori, Origami Tabanlı Cephe.

ORIGAMI-BASED RESPONSIVE FACADE MODEL TO IMPROVE VISUAL AND THERMAL COMFORT

ABSTRACT

With the advancement of technology, buildings are expected to have responsive facades that respond to ever-changing environmental conditions and have the potential to change themselves. The responsive facade is not only being sensitive to the climate but also being able to show variability in the face of different factors such as the occupant and the object and at different scales. Responsive facades and shading technologies are advanced systems that allow the facade system to respond and change according to the outdoor climate, daylight demands and sun angles, allowing the management of light, air, and solar energy while maximising occupant comfort and energy savings.

In the literature reviews, it is seen that most of the research focuses on daylight performance and reducing artificial light consumption. However, research and studies are insufficient for external view satisfaction. This research aims to present the comfort conditions and external view satisfaction in an integrated manner in the design process, considering the locations of the building occupants and the lacks and potentials of previous studies.

In this context, the aim of the thesis is to present an origami-based responsive façade that reduces the solar heat gain and therefore the energy consumption of the building, with minimal reduction in the visual comfort of the users (i.e. indoor lighting levels and external environmental visibility). Since the study aims to investigate daylight homogeneity in origami-based responsive facade design, the basic properties of origami and how to evaluate the performance of origami-inspired responsive facades were examined by conducting a literature review. By examining the software and tools used, a simulation model was created with Rhino and its plugins to carry out the intended study. Evaluation criteria were determined by using existing examples and visual performance results were examined. At the end of the study, a general evaluation was made by considering the simulation results. The results demonstrate the high performance of origami-based modules to improve daylight performance.

Keywords: Responsive Facade, Daylight Performance, Daylight and Occupant Locations, Miura-ori, Origami-Based Facade.

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki hızlı artışın bir sonucu olarak doğal çevrenin ve kaynakların artık insanların ihtiyaçlarını karşılayamaz hale gelmesi, her alanda birtakım önlemlerin alınması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bugüne kadar yapılan istatistiksel çalışmalar, binalarda enerji tüketiminin %30 oranlarında olduğunu göstermektedir. Gelişmiş ülkelerde yapılan son araştırmalara göre insanların vakitlerinin %90'ını kapalı mekanlarda geçirmesi bunun nedeni olarak gösterilebilir (Öner, 2019). Aynı zamanda Maldegem Fizik Enstitüsü' ne göre, bina cepheleri, kışın ısı kaybının %40'ından fazlasından ve yazın aşırı ısınmadan sorumludur (Barozzi, 2016). Yapı sektörü enerji tüketiminde en önemli paya sahip sektörlerden biri olduğu için bu alanda enerjinin etkin bir şekilde kullanımını sağlayan önlemlerin alınması gereklidir. Bina tasarımındaki ekolojik hedef, bina konfor sistemlerini gerçekleştirmek, yenilenebilir enerji kaynaklarını, doğal ısı kazançlarını ve konfor koşullarını korumak için minimum düzeyde enerji kullanımı ile başlangıçtaki toplam enerji ihtiyacını minimuma ve hatta sıfıra indirmek için çabalamak olmalıdır (Erturan, 2010).

Teknolojinin gelişmesi, bilgi birikiminin artması ve enerji etkin tasarım ve sürdürülebilirlik gibi konuların da önem kazanmasıyla birlikte ısı ve enerji akışının oldukça yoğun olduğu yapı kabukları üzerinde araştırmalar ve çalışmalar artış göstermektedir. Ancak bu cepheler tasarlanırken amaçlanan performansın sonuç üründe elde edilmesinin sağlanabilmesi için doğru tasarım çözümlerinin uygulanması gerekmektedir.

Günümüzde sosyal ve kentsel değişimin gerçekleşmesiyle birlikte sürdürülebilirlik konularının daha fazla önem kazanmasıyla, interaktif mimari çözümlere olan talebin arttığı görülmektedir (Velasco ve diğ., 2015). Mimari ihtiyaç bağlamında, çağdaş toplumda değişen ihtiyaçlara uyum sağlama özelliği çok önemlidir. Japon geleneğinin eski bir sanatı olan Origami, düz tabakaları karmaşık üç boyutlu şekilleri sonsuz olasılıklarda katlayabilmektedir. Ayrıca kendi kendilerine organize olma, yeniden yapılandırma ve üretim karmaşıklığını azaltma gibi yeteneklerine sahip olması nedeniyle uyum sağlama özelliğine cevap verebilecek niteliktedir. Günümüzde origaminin çağdaş kullanımının örneklerini ağırlıklı olarak kinetik yapılarda, birçok mühendislik, medikal

ve robotik uygulamaları da dahil olmak üzere mühendislik ve tıp gibi farklı disiplinlerde de görmek mümkündür.

Bu tezde; kullanıcıların görsel konforunda (yani iç mekân aydınlatma seviyelerinde ve dış görüş memnuniyetinde) minimum azalma ile güneş ısı kazancını artıran ve dolayısıyla binaların enerji tüketimini azaltan origami tabalı duyarlı (responsive) bir cephe önerisi sunmak amaçlanmıştır. Uyarlanabilir ve duyarlı cephe özellikleri, origami özellikleri ve origamiden esinlenen duyarlı cephe uygulamaları; tasarlanan cephe modülleri ve simülasyon sonuçları tezin ilerleyen aşamalarında tartışılacaktır.

1.1. Problemin Tanımı

Sensörler ve aktüatörler yardımı ile gerçek zamanlı şekil değişiklikleri yapabilen duyarlı cephe sistemleri, kullanıcı konforunu arttırmak ve ortamla morfolojik olarak etkileşimde bulunmak için, dış ortam iklimi, gün ışığı talepleri ve güneş açılarına göre cephede değişime izin vermektedir. Böylece ışık, hava, güneş enerjisinin yönetilmesini sağlayarak enerji tasarrufunu en üst düzeye çıkarabilmektedirler (Elzeyadi, 2017; Hosseini ve diğ., 2019b). Etkileşimli uyarlanabilir cephe tasarımlarına ait önceki araştırmaların çoğunun gün ışığı performansına ve yapay ışık tüketimini azaltmaya odaklandığı görülmektedir. Çalışmaların çoğunda parametrik optimizasyon sürecinde, görsel ve termal konforun aynı anda dikkate alınmadığı ve cephe elemanlarının mekanik dönüşümleriyle ilgili bilgilerin de verilmediği görülmüştür (Rizi, 2021; Sheikh ve Asghar, 2019). Aynı zamanda literatürde, bina kabuğu tasarım sürecinde, kullanıcı etkileşiminin değerlendirildiği duyarlı cephe çalışmaları yapıldığı fakat origami ile gerçekleştirilen cephe çalışmalarında kullanıcı katılımının değerlendirilmediği belirlenmiştir. Duyarlı cephe çalışmalarında kullanıcı etkileşimlerine ilişkin net bir yaklaşım hala eksiktir (Tabadkani, 2021; Bakker ve diğ., 2014). Bununla birlikte dış görünüş memnuniyeti için yeterli araştırma bulunmadığı da belirtilmiştir (Hosseini ve diğ., 2019a, Valitabar ve diğ., 2018). Genel olarak binalar, gün ışığı ve dış ortam manzaraları ile görsel konfor sunmaktadırlar. Örneğin sıcak ve nemli ortamlarda bulunan binaların güneş ısı kazanımını azaltması amaçlanırken, genel olarak statik cepheler güneşi tamamen engelleyecek şekilde tasarlanırlar. Bu durumda, dış ortamın görünürlüğü büyük ölçüde engellendiği için kullanıcıların, görsel konforu yok olmaktadır (Sheikh ve Asghar, 2019). Bu nedenle, duyarlı cephelerde, kaynak tüketimini optimize etmek, kullanıcı konumlarına göre görsel

ve termal konforu eş zamanlı olarak sağlayabilmek gibi birçok faktörün aynı anda göz önünde bulundurulması önerilmektedir (Pujadas-Gispert ve diğ., 2020; Bakker ve diğ., 2014; Charpentier ve diğ., 2020). Çeşitli faktörleri açıklayan entegre bir yaklaşım, bina sakinleri için görsel konforu artırma potansiyeline sahiptir.

1.2. Amaç ve Yöntem

Problemin tanımı içerisinde ifade edilen tüm sorunlar incelendiğinde, tez kapsamında literatürdeki eksiklikler ve potansiyeller için bir çözüm önerisi olabileceği öngörüsüyle kullanıcıların görsel konforunda (yani iç mekân aydınlatma seviyelerinde ve dış görüş memnuniyetinde) minimum azalma ile güneş ısı kazancını artıran ve dolayısıyla binaların enerji tüketimini azaltan r origami tabanlı duyarlı cephe (Origami-based Responsive Facade-ORF) modülü tasarlanması amaçlandı. Duyarlı bir cephede dış görünüm memnuniyetini sağlamak sadece güneşi değil, kullanıcı konumunu da cepheyi değiştiren parametrelere dahil ederek ve cephedeki gölgeleme elemanlarında en az mekanik malzeme kullanımının gerçekleştirilmesi ile mümkün olabilir. Bu amaçla çalışmada dış görüş memnuniyetini ve görsel ve termal konfor koşullarını sağlayabilmek için kullanıcı katılımları simülasyon ve analizlere dahil edildi. En az mekanik malzeme kullanımı gerçekleştirilmesi için de cephe gölgeleme elemanı tasarımında origami tekniklerinden faydalandı. Bir origami teknikleri kullanılarak tasarlanan cephe modülleri, tek seferde katlanabilen ve açılabilen kolay bir mekanizmaya sahip olması ve daha az enerji ile çalışması nedeniyle çalışmada tercih edildi.

Origami teknikleri ve kombinasyonları ile gerçekleştirilen form bulma süreci bu araştırma çalışmasının temelini oluşturmaktadır. Tasarımın başında üretken sistemin kurgulanma süreci doğrudan dijital yöntemlerle değil, manuel şekilde origami denemeleriyle geliştirilmiş olup, bu manuel süreçten elde edilen bilgilerle dijital modelin desteklenmesi sağlandı. İlk olarak tasarıma manuel katlama denemeleri ile başlanmış olup; bu denemelerin modüler kullanıma uygunluk, cephe sisteminde istenen özellikleri sağlama durumları incelenerek origami desenleri denendi. Sürecin devamında bu manuel denemeler dijital modele aktarıldı. Simülasyonlar ile tasarımların potansiyelleri araştırılarak tasarım sonlandırıldı. Cephe için uygun gölgeleme elemanını bulma amacıyla, modülün farklı geometrilere sahip olduğu 4 durum oluşturularak çalışma detaylandırıldı. Modüller, sensörler yardımıyla güneş konumu ve kullanıcı konumlarını

algılayarak, uygun tepkiyi üretmek üzere tasarlandılar. Çalışmada belirlenen 4 kullanıcının konumu eş zamanlı olarak simülasyona dahil edildi. ORF modülleri, çevresel koşullara cevap veren, performans odaklı, duyarlı cephe özelliklerine sahip gölgeleme elemanlarıdır. Simülasyon sonuçlarına göre cephenin gölgeleme elemanı olmayan temel durumu ile ORF modülleri arasında kıyaslama yapıldı.

Çalışmada, Kartal/İstanbul'un hava durumu dosyası verileri alınarak simülasyon metodolojisi gerçekleştirildi. Parametrik modelleme aracı olarak Grasshopper kullanıldı (Grasshopper-Algorithmic Modeling for Rhino, 2013). Kangaroo eklentisi origami modülü oluşturmak için kullanıldı. Ladybug ve Honeybee eklentisi iklim analizi için ve Climate Studio eklentisi gün ışığı değerlendirmesi için kullanıldı.

Tezde origami teknikleri ve kombinasyonları ile tasarlanmış olan ORF modülleri, bir origami deseninden elde edilen cephe tasarımının kullanıcı konumlarının dikkate alınması ile duyarlı cephe özelliklerinin birlikte kullanımı ve cepheye entegre edilmesi yönüyle, alanında özgün bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Bu modüllerin dijital ortamda üretilmesi; simülasyonlara tabi tutulması ve modüllerin simülasyon sonuçlarının karşılaştırılarak uygun cephe modülünün seçilmesi gerçekleştirildi. Tüm bu özellikleriyle, tasarlanmış ve simüle edilmiş olan ORF modüllerinin geometrisinin origami tabanlı duyarlı cephe sistemlerine öncü bir çalışma olacağı öngörülmektedir.

1.3. Kapsam ve İçerik

Tez beş ana başlıktan oluşmaktadır. Giriş bölümünde, problem tanımı, tezin amacı, yöntemi, kapsam ve içeriği anlatıldı.

İkinci bölümde, uyarlanabilir cephenin tanımı, türleri ve uyarlanabilir cephe türlerinden olan duyarlı cephe kavramı incelendi. Adaptasyonun neye göre tasarlandığına dair incelemelerde bulunuldu. Duyarlı cephenin gelişimi, işleyişi ve duyarlı cephe sistemlerine etki eden etmenler incelendi.

Üçüncü bölümde çalışmaya öncülük eden origaminin temel özellikleri, terimleri, katlama desenleri ve yaygın katlama türleri araştırılarak modelin anlatıldığı dördüncü bölüm için teorik, teknik ve bilimsel alt yapının hazırlanması amaçlandı. Bu bölümde duyarlı cephe sistemleri ve origami uygulamaları ile binalardaki kullanımları örnek çalışmalar

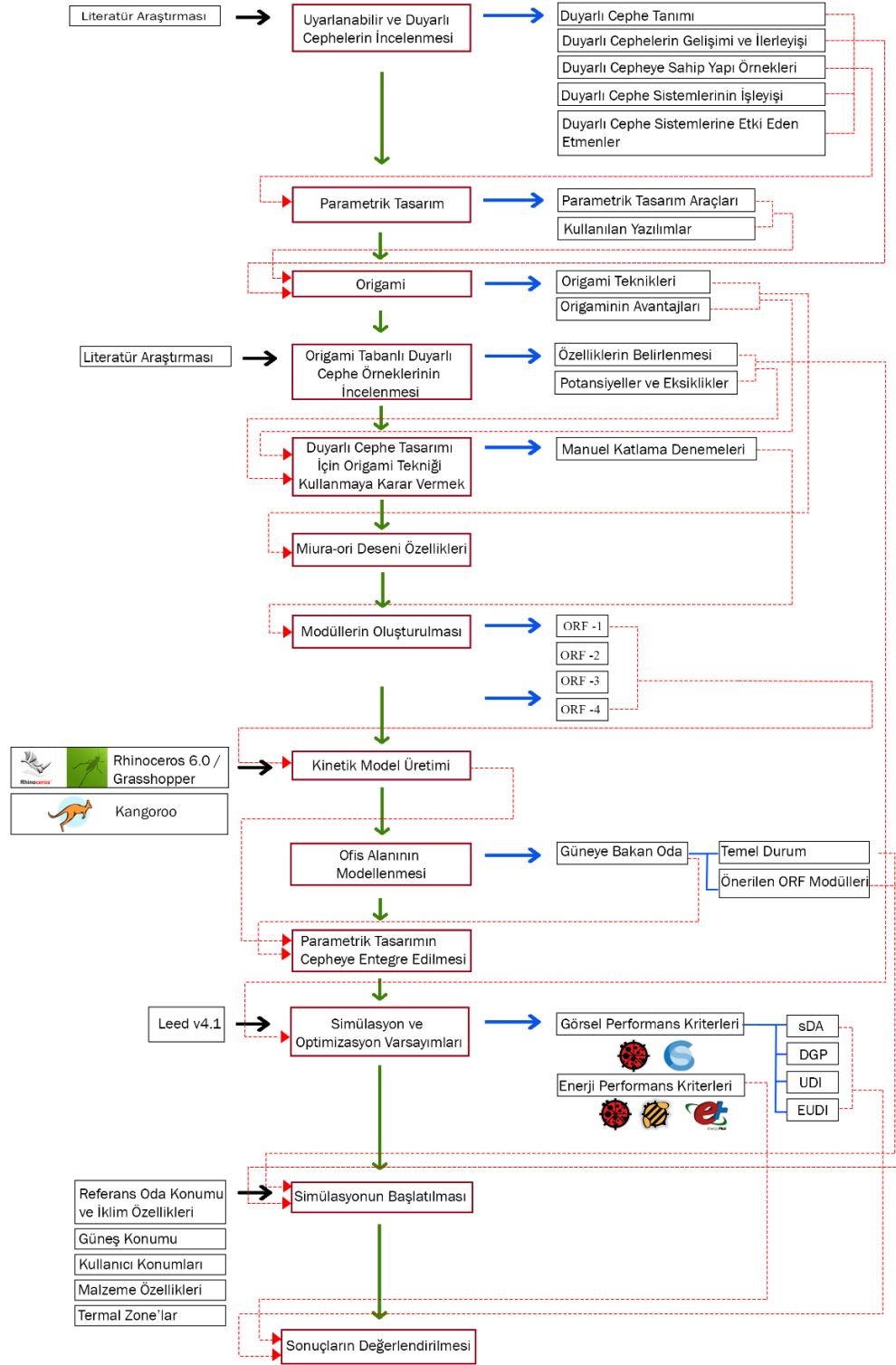
üzerinden sınıflandırma yapılarak karşılaştırılmalı olarak incelendi ve değerlendirildi. Sınıflandırma göstermiştir ki; duyarlı cephelerde en çok gün ışığı performansına ve yapay ışık tüketimini azaltmaya odaklanılmıştır ve kullanıcı konumunu dikkate alan çok az çalışma vardır. Tüm bu ilişkilerin incelenmesi ve literatürdeki çalışmaların irdelenmesi sonucunda ortaya çıkan duyarlı cephelerde tasarım stratejileri sistematik bir biçimde okuyucuya aktarıldı. Ayrıca parametrik tasarımın faydalarından ve parametrik tasarım araçlarından bu bölümde kısaca bahsedildi.

İlk üç bölümde anlatılan, modülün kuramsal altyapısının ve kavramsal çerçevesinin anlaşılabilirliğine ışık tutacak olan bölümler, dördüncü bölümde uygulamalı bir şekilde anlatıldı. Dördüncü bölüm, birbirinin ardışık olan üç aşamayı anlatmaktadır. Bu ardışık süreç; önerilen modül geometrisinin oluşturulması için manuel şekilde sürdürülen form arayışı, oluşturulan modül geometrilerinin dijital modele aktarılması ve modülün simülasyonu ile görsel ve termal performansın doğrulanması işlemlerini sistematik bir şekilde anlatmaktadır.

Dördüncü bölümde, tez kapsamında geliştirilen özgün 4 ORF (Origami-based Responsive Facade) modülü anlatıldı. Önceki bölümlerde yapılan araştırmalar değerlendirilerek karar verilen ORF modülü önerilerinin simülasyonu için parametrik tasarım araçlarından Rhino ve eklentileri (Grasshopper, Climate Studio, Ladybug, Honeybee ve EnergyPlus) ile yazar tarafından bir simülasyon modeli oluşturuldu. Tezin uygulama kısmında, elde edilen bilgiler doğrultusunda ofis olarak kullanılan bir odanın; gölgeleme bileşeni olmadan ve yazar tarafından ortaya konulan 4 adet origami tabanlı modül sistemleri kullanılarak oluşturulan senaryoları 21 Mart, 21 Haziran ve 21 Aralık tarihlerini içeren gündönümü ve ekinoks günlerinde, 09.00, 12.00 ve 15.00 saatlerinde iç ortam aydınlık düzeyleri, kamaşma değerleri ve enerji tüketimleri simüle edilip karşılaştırıldı. Geliştirilen modül tasarımlarının cephe üzerinde işleyişi, avantajları ve dezavantajları değerlendirildi. Dördüncü bölümün sonunda tasarım ve simülasyon sonuçları göz önüne alınarak modülün kısıtları tartışıldı. Aynı zamanda geliştirilme potansiyelleri de bu bölümde tartışıldı.

Tezin sonuç ve tartışma bölümü olan beşinci bölümde, uyarlanabilir ve duyarlı cephe sistemleri, origami ve origamiden esinlenen cephe uygulamaları ile ilişkili kavramlar ve

geliştirilen ORF modüllerinin belirlenen problemleri giderip gidermediği üzerine değerlendirmeler yapıldı. Çalışmaya ait akış şeması Şekil 1.1’de verildi.



Şekil 1.1 Çalışmaya ait akış şeması.

2. UYARLANABİLİR VE DUYARLI CEPHELER

2.1. Uyarlanabilir (Adaptive) Cephe Tanımı ve Özellikleri

Bir binanın işletme aşamasında tüketilen enerji (örneğin aydınlatma, ısıtma ve soğutma), bir binadaki yaşam döngüsü boyunca enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Sun ve diğ. (2018) bir binanın işletme aşaması sırasında aktif ve pasif olmak üzere bazı çözümler önermektedir. Aktif çözümler aydınlatma sistemlerinin, ısıtma, havalandırma, klima (HVAC) sistemlerinin ve diğer servis enerji yoğun sistemlerin iyileştirilmesini içermektedir. Pasif çözümler sistemlerdeki enerji verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Buna karşılık, pasif çözümler son yıllarda cephe sistemlerinin enerji tasarruflu tasarım ile geliştirilmesi bağlamında araştırmacıların dikkatini çekmekte ve enerji tasarrufu potansiyellerine kıyasla aktif sistemlere göre daha düşük maliyet oluşturmaktadırlar (Bui ve diğ., 2020).

Tasarımın erken safhalarında pasif stratejilerin uygulanması, akıllı fonksiyonların kullanılması, güneş radyasyonunun yoğunluğunu kontrol ederek kullanıcıların konforunu artırmaya ve enerji tüketimini azaltmaya yol açmaktadır. Son çalışmalar, cephe tasarımının iç ortam üzerindeki etkisi ve özellikle gölgeleme cihazlarının kullanımı ve konfigürasyonları nedeniyle güneş radyasyonuna ve gün ışığına karşı duyarlılıklarına vurgu yapmaktadır (Shi ve diğ., 2020; Hosseini ve diğ., 2019b). Geçmiş yıllarda araştırmacılar, binalar için ana aydınlatma kaynağı olarak doğal gün ışığını kullanarak, yenilenemeyen enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltmaya çalıştılar. Doğrudan gün ışığının, güneş ısısı kazanımı nedeniyle yapay aydınlatma ve soğutma ihtiyacını azaltarak enerji tasarrufu sağlayabildiği görülmektedir.

Teknolojinin gelişmesi, bilgi birikiminin artması ve enerji etkin tasarım ve sürdürülebilirlik gibi konuların da önem kazanmasıyla birlikte ısı ve enerji akışının oldukça yoğun olduğu yapı kabukları üzerinde araştırmalar ve çalışmalar artış göstermektedir. Bina cephesi, doğrudan güneşe ve rüzgâra en çok maruz kalan yapı bileşeni olmakla birlikte enerji tasarrufu ve alternatif enerji üretiminde en etkili bölgedir. Cephe, binaların iç ve dış çevresi arasında, iklimin şiddetli dalgalanmalarına karşı koruyucu veya düzenleyici bir unsur olarak işlev görebilen karmaşık bir ara yüz olarak görev almaktadır (Hosseini ve diğ., 2019a). Mimaride, bina cephelerinin tasarımında ilk tasarım stratejisi, statik özelliklere sahip barınak ve koruma sağlamaya odaklanan

geleneksel bina cephelerini ifade etmektedir. İkincisi ise, cephenin yapısının veya mekanizmalarının tasarımının güneş ışığı, yağmur suyu ve benzeri çevre koşullarını depolama, yeniden kullanma, yanıtlama ve değiştirmede önemli bir rol oynadığı teknik bina sistemlerini ifade etmektedir (Khosromanesh ve Asefi, 2019). Yapılar bulundukları çevre ile ilişki içerisinde ve kendileri de bir çevre verisi oluşturmaktadır. Bu çevre verileri sürekli değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla cephenin de bu etkiye karşı göstereceği bir tepki olmalıdır. Bu etki ve tepkinin de zamanı bağlı olarak tasarlanıp programlanması gerekmektedir.

Bir binanın enerji tüketimini azaltmak için hava dalgalanmalarına, günlük döngülere veya mevsimsel durumlara yanıt olarak zaman içinde işlevlerini değiştirebilen bina kabukları Uyarlanabilir Cephe (Adaptive Facade-AF) olarak adlandırılmaktadır (Bui ve diğ., 2020). AF'ler bina kullanıcılarının refahını korumak ve genel bina performansını iyileştirmek için sınır koşullarındaki kısa vadeli değişikliklere veya paylaşılan bölgelerdeki kullanıcı tepkilerine bağımsız olarak tepki verebilen sistemin uyarlanabilirliğine dayanmaktadır (Tabadkani, 2021). Uyarlanabilir cephelerin bina enerji kullanımında ve CO₂ emisyonlarında önemli azalmalar için fırsatlar sağladığı bilinmektedir (Ahmed ve diğ., 2016). Entegre uyarlanabilir cephe sistemleri, tanımlanan amaçları nasıl gerçekleştirebildiklerine göre değerlendirilirler. Fakat mevcut AF'lerin türlerini karakterize etmek zordur. Her bir tür birebir aynı değildir ve başka bir kategoriye çakışabilir. Pasif, aktif, akıllı (smart), akılcı (intelligent), etkileşimli, kinetik, duyarlı (responsive), değiştirilebilir, hareketli, biyomimetik gibi terimler mevcut cephe örneklerinde sıkça karşılaşılan terimler arasındadır.

Bina sistemlerinin kullanıcı girdisi ile çalıştığı durumlar “akıllı mimari”; bina sistemleri ve kullanıcı arasında karşılıklı iletişimin var olduğu durumlar “etkileşimli mimari”; bu sistemlerin çevresel şartları değerlendirmesi ve/veya ilgili durumlara göre hareket etmesi “duyarlı mimari”; bu duyarlılığın zaman içerisinde değişen koşullara uyum sağlaması durumu da “uyarlanabilir mimari” olarak adlandırılabilir (Elmokadem ve diğ., 2018). Statik veya sabit olmak yerine dinamik olarak değişebilen, bir binanın yüzeyinde hareketin gerçekleşmesine izin veren cepheleri tanımlamak için de ‘kinetik mimari’ terimi kullanılmaktadır (İbrahim ve Alibaba, 2019). Kategorilerin kullanıldıkları alandaki

bağlama göre ifadelendirildiği gözlemlenmektedir. Duyarlı cepheler ayrı bir başlık altında detaylı bir biçimde incelenecektir.

2.2. Duyarlı (Responsive) Cephe Tanımı

Çalışma kapsamında ele alınacak olan duyarlı cepheler çevresel koşullara ve konuma hızla uyum sağlayabilen ve tepki verebilen karmaşık sistemler olarak tanımlanabilir (Waseef ve Nashaat, 2017). Duyarlı mimari teriminin 1975'te Nicholas Negroponte tarafından tanıtıldığı bilinmektedir (Thun ve Velikov, 2013). Burada duyarlı terimi, kullanıcı konforunu ve konfor gereksinimlerini karşılamak için dış koşullara (güneş, rüzgâr, nem, vb.) tepki verme veya bunlardan faydalanma potansiyelini ifade etmektedir (Tabadkani ve diğ., 2019). Etkileşimli, akıllı (smart) ve akılcı (intelligent) terimleri bu sisteme dahil edilebilir (Ergin, 2019). Duyarlı bir cephe, gerçek zamanlı algı, akıllı malzemeler, kinetik bileşenler, bina otomasyonu ve kullanıcı odaklı işlemler dahil olmak üzere 'akıllı' bir cepheye işlevleri ve benzer performans özellikleri sebebiyle benzemektedir. Ancak aynı zamanda kendi kendine öğrenme yeteneğine sahip olduğu için etkileşimli bir cepheyle de benzer özellikler taşımaktadır.

Duyarlı cephelerin potansiyel olarak ışık seviyesini, kamaşma rahatsızlığını, ışık enerjisi verimliliğini, termal direnç değerini, güneş enerjisi kazanımı katsayısını, ısı enerjisi verimliliğini, güneş ışınlarına tepkiyi, kullanıcı konfor seviyesini ve pasif havalandırmayı kontrol etme, yönetme ve ayarlama yeteneğine sahip olduğu bilinmektedir (Heidairi Matin ve Eydgahi, 2020). Duyarlı cepheler ve gölgeleme teknolojileri cephe sisteminin, iklime, gün ışığı taleplerine ve güneş açılarına göre tepki vermesine ve cepheyi değiştirmesine izin vermektedir. Gölgeleme sistemi tipolojisinin seçiminin, cephenin geometrisi (düzlemsel veya serbest biçimli cephe), tasarım anlayışı, çevre verimliliği, kullanıcıları, teknolojik performansları vb. gibi farklı faktörlerden etkilendiği bilinmektedir.

2.3. Duyarlı Cephelerin Gelişimi ve İlerleyişi

Uyum sağlama ve hareket etme yeteneği Afrika'daki bedevi çadırlarında olduğu gibi iklime uyum sağlamak ve hareketli bir barınak oluşturmak için eski zamanlardan beri insanlık için önemli olan bir konudur. Güneşten yararlanabilme beklentileriyle biçimlenen geleneksel yapı kabuğunun, değişken mevsimsel durumlar karşısında

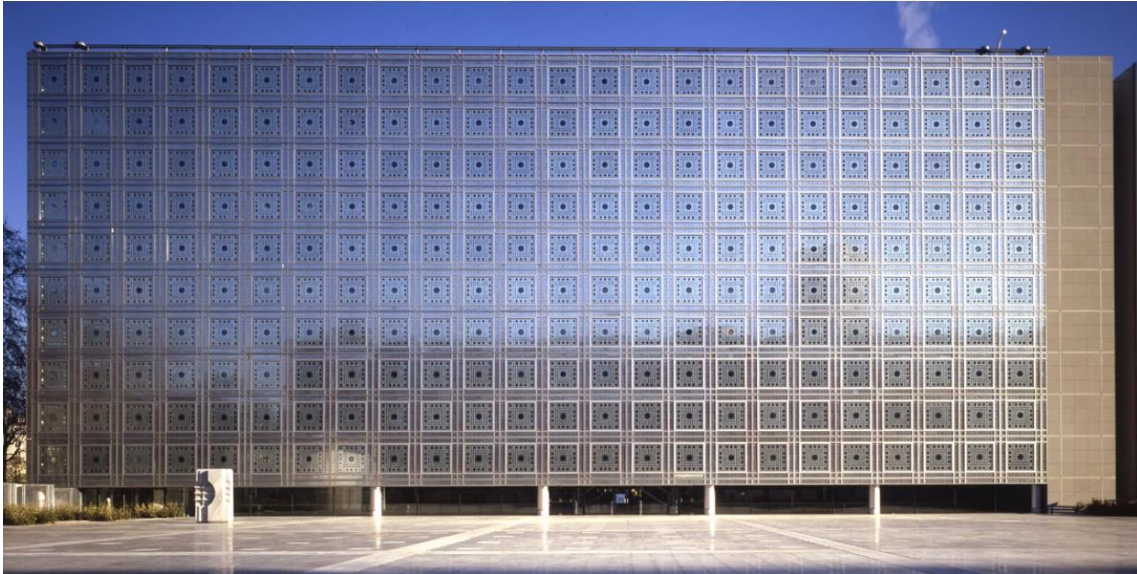
adaptasyon özelliği içeren hareketli bir yapı elemanına dönüşmeye başlaması da mimarlık tarihinin erken dönemlerinden beri görülmektedir. Mimarlıkta hareketli yapı kabuğu fikri pencere kanatları ve kapı gibi elemanlar ile eskiden beri uygulanan ve kabuğu biçimlendiren ilk hareketli öğelerdir (Güncü ve Kurnuç, 2013). Angelo Invernizzi tarafından tam otomatik Girasole Villa'nın yapılması ile cephe karmaşıklığı 1930'lardan sonra artmıştır. Ayçiçeğinden esinlenen bu bina, güneşin yolunu izleyen, camlı avlusu olan mekanik bir parkurda dönmektedir. Bu da değişen çevresel koşullarını tolere ederken iç mekandaki konforu sürdürme yeteneği anlamına gelmektedir.

1970 yılında William Zuk ve Roger H. Clark tarafından "Kinetik Mimari" isimli kitabın yazılması ile sistematik olarak kinetik mimarlıkla ilgili ilk adımlar oluşturulmuştur. Ama etkileşimli, duyarlı ve akıllı mimariye ilgi 1960'larda ve 1970'lerde başlamıştır (Elmokadem ve diğ., 2018).

1960'lar ve 1970'lerdeki teknolojik ilerlemeler, dünya nüfusundaki hızlı artış, doğal çevrenin ve kaynakların artık insanların ihtiyaçlarını karşılayamaz hale gelmesi, çevresel konular hakkında artan bir kamuoyu bilinci oluşturulmuş ve her alanda birtakım önlemlerin alınmasını zorunlu hale getirmiştir. Duyarlı cephe sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi, son yetmiş yıl boyunca kademeli olarak çok aşamalı süreçlerde gerçekleşmiştir. Araştırma sonuçlarından elde edilen bulgular, duyarlı cephelerin tasarım ve gelişiminin, on dokuzuncu yüzyılın sonlarından bu yana sanat, teknoloji ve bina yapımındaki değişikliklerden kaynaklanan sosyokültürel, teknolojik, politik/ekonomik ve çevresel faktörlerden etkilendiğini göstermektedir (Haidari Matin ve Eydgahi, 2020). Bu faktörlerin cephe sistemlerinin tasarımında ve geliştirilmesinde kullanılan tasarım konseptleri üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Sosyo-kültürel faktörlere bakıldığında; İzlenimcilik, fütürizm, konstrüktivizm, dadaizm, modernizm ve post-modernizm gibi sanatsal ve toplumsal akımlar, duyarlı cephe sistemlerinin form ve geometri hareketini etkilemektedir. Tasarımcıları tasarım, malzeme seçimi ve yapısal sistemlerde sürdürülebilir stratejiler uygulamaya teşvik eden savaşlar, devrimler, yaptırımlar ve enerji krizleri gibi eko-politik faktörlerin, duyarlı cephe sistemlerinde enerji verimliliğini ve optimizasyon stratejilerini etkilediği görülmektedir. 20. yüzyılın çevre felaketlerinden sonra zorunlu hale gelen farklı çevre düzenlemeleri ve eylemleri, afetler, ekolojik dengeler, kamusal yeşil kültür ve sürdürülebilir strateji planlaması gibi

önemli çevresel konular hakkında farkındalığı artırdığı görülmektedir (Haidari Matin ve Eydgahi, 2020). Sibernetik, bilgi teknolojisi, kontrol sistemleri, malzeme bilimi, bilim ve teknolojilerdeki gelişmeler, duyarlı cephe tasarımlarında hareketleri, kontrolleri, etkileşimleri, malzeme ve yapı seçimlerini etkilemektedir.

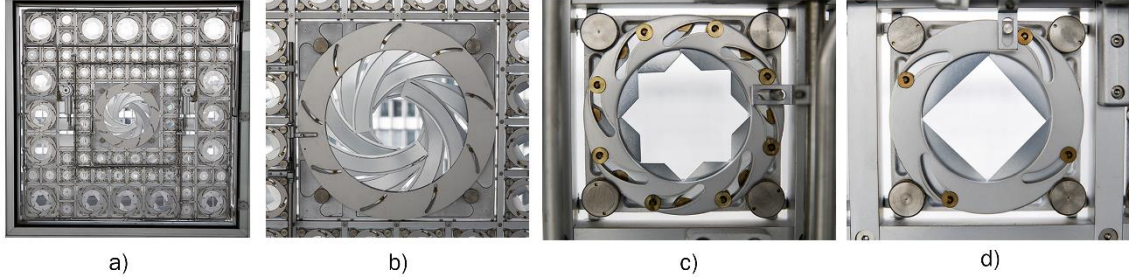
Jean Nouvel'in Paris'te 1987 yılında inşası tamamlanan Arap Kültür Enstitüsü binası yapı kabuğunda hareketli sistemlerin kullanıldığı önemli duyarlı cephe örneklerinden biridir (Şekil 2.1). Sensörler, aktüatörler ve bir dizi mekanik diyaframla donatılmış Nouvel'in binasının güney cephesi, güneş ışığının yoğunluğundaki değişikliklere yanıt olarak ayarlanabilecek bir model önerisidir. Güney cephesinde kullanılan geometrik düzen Orta Doğu'da yüzyıllarca kullanılmış olan Arap mimari unsuru "mashrabiyya" 'dan ilham almış olup, 240 mashrabiyya ünitesinden oluşmaktadır. Bu sistem, cephe dış tarafındaki çift cam ünite ile iç tarafındaki tek cam arasında düzenlenmiştir. Sistem, 27.000 adet diyafram prensibi ile çalışan ayarlanabilir alüminyum güneş kontrol elemanından oluşmaktadır (URL-1).



Şekil 2.1. Güneş kontrol elemanlarının kullanıldığı Paris Arap Enstitüsü bina cephesi (URL-1).

Cephe sisteminin güneşi izlemesi, kapalı döngülü bir sistem olan ışığa duyarlı sensörler tarafından sağlanmaktadır. Güneş kontrol elemanlarını oluşturan mashrabiyya üniteleri, gün ışığı koşullarına göre bir elektropnömatik mekanizma sayesinde genişleyebilmekte veya daralabilmektedir (Şekil 2.2) (URL-2). İç mekanların aydınlık düzeyinin artırılması

istenildiğinde genişleyerek gün ışığı geçişine daha fazla izin vermektedir. Daraldığında ise yapıyı ısı etkilerinden korumaktadır (Kızıltaş, 2019). Bu güneş ışığına göre metal gözelerin açılıp kapanma hareketi iç mekanların doğal olarak aydınlatılmasını mümkün kılmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.2. (a) Bir grup mashrabiya diyaframının çalışır durumdaki görünümü (b) Büyük diyaframın detayı (c) Orta büyüklükteki diyaframın detayı (d) Küçük diyaframın detayı (URL-3).



Şekil 2.3. Paris Arap Enstitüsü binası mashrabiyaaların açık olma durumunda iç mekân görünümü (URL-2).

Bir kamera deklanşörünün diyaframları olarak işlev gören mashrabiyya üniteleri, güneş ışığını camlı yüzeyden süzerek ışığın %10 ila %30'unun tutulmasını sağlamaktadır (Fouad, 2012). Bu cephe sisteminin vaat ettiği şey, dış çevredeki değişime tepki verirken iç ortamdaki koşulların da buna karşılık modülasyonlarını değiştirmesine dayalı bir

mimari oluşturması olarak belirtilebilmektedir. İ avlunun yarı saydam panelleri de dahil olmak üzere binanın cephelerinin her biri, gnşığı için farklı bir yöntem ve doğal ışığın değişkenliğine farklı bir yaklaşım önermektedir (Meagher, 2015).

Sistemdeki mekanizmalar ve elemanlar dışarıdan görülebilir ve erişilebilir şekildedir. Bu durum mekanizmalarının bakımının kolay bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır. Bu cephe sisteminde mekanik diyaframlar ve sensörleri iki cam ünite arasında olup, atmosferik koşullara maruz kalmadığı için sensör yüzeyleri kirlilik sorunu ile karşılaşmamakta ve bu da sistemin bakım maliyetlerini olumsuz yönde etkilememektedir (Kılıçarslan, 2019).

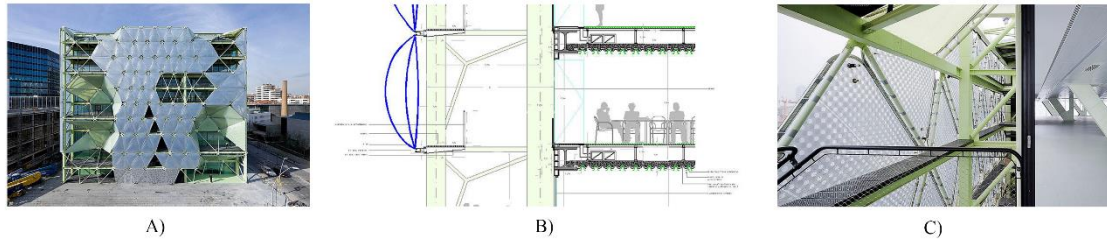
1987'den beri farklı duyarlı cephe sistemleri görülmektedir ve son yıllarda sensör ağları, yapılı çevrenin çeşitli yönlerini izlemek ve kontrol etmek için binalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sensör ağları geometri, mekanizma, ışık, sıcaklık ve dokunma sensörleri gibi algılama teknolojisi ve motor tabanlı, pnömatik ve hidrolik aktüatörler gibi aktüatör teknolojisi bakımından farklılık göstermektedirler (Haidari Matin ve Eydgahi, 2020). Bu araçsal rollere ek olarak, cephelerin bu otomatikleştirilmiş unsurları estetik roller için de kullanılmaktadır. Arap Kültür Enstitüsü binasının otomatik diyaframları, tasarım sürecinin başlangıcından itibaren önemli bir mimari yapıtın ayrılmaz bir parçası olarak tasarlanan dinamik bir yapı elemanının bir örneğini sunmaktadır (Meagher, 2015).

Duyarlı cephelerin önceki tasarımlarında, kontrol amaçlı anahtarlar kullanılmaktayken yeni ve daha gelişmiş tasarımlarda en güvenilir teknoloji olarak görülen merkezi bilgisayarlı kontrol sistemleri kullanılmaktadır (Haidari Matin ve Eydgahi, 2020). 2007 yılında Showroom Kiefer Technic ve Media TIC Binası, 2010 yılında Q1 Genel Merkez Binası, 2012 yılında Al-Bahar Towers, 2012 yılında Thematic Pavillion ve 2012 yılında One Ocean Pavilion gibi tanınmış binaların duyarlı cephelerinde merkezi kontrol sistemi kullanıldığı görülmektedir (Haidari Matin ve diğ., 2017).

2007 yılında Ernst Giselbrecht tarafından tasarlanan Kiefer Technic Showroom'un dinamik güney cephesi, poligonal camdan yapılmış statik ve önünde bulunan dinamik cephe olmak üzere cephe iki katmandan oluşmaktadır. Dinamik cephenin alüminyum panelleri, karmaşık bir menteşe sistemi, kılavuz raylar ve elektrik motorları aracılığıyla hareket ettirilmektedir. Kiefer Technic Showroom'un güney cephesinin tamamına

hareketli bir kaplama yerleştirerek odalardaki mahremiyeti korurken dış görüş memnuniyetinin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır (Fouad, 2012).

Enric Ruiz-Geli (Cloud-9) tarafından 2007 yılında tasarlanan, güneş ışığına göre kasılma ve şişirme kullanan Media ICT Binası hem aktif hem de duyarlı bir cephe örneğidir. Yarı saydam Etilen Tetra Floro Etilen (ETFE) tabakası, güneş ışığının varlığına dayanan ısı ölçer sensörleri ile pnömatik mekanizmalar tarafından tetiklenmekte ve hava odalarında şişirme ve deflasyon ekipmanını otomatik olarak ve bağımsız olarak harekete geçirmektedir. Üç katmandan oluşmakta olan cephe kaplaması sensörler kullanılarak şişirilmektedir (Şekil 2.4). Sistem, havanın cepheden girişini enerji verimliliği açısından uygun hedeflerle ayarlayabilmektedir (Shahin, 2019). Gölgeleme sistemi iç mekân konforunda % 13,3 ile % 26,9 arasında önemli bir artış sağlayarak ısıyı ve UV ışınlarını % 85 oranında filtrelemektedir (Grobman ve diğ., 2016).



Şekil 2.4. MEDYA-TIC binası A) Cephe görünüşü, B) Sistem detayı, C) İç mekân görünümü (URL-4).

2012 yılında Aedas Architects tarafından tasarlanan Al Bahar Kuleleri kinetik ve duyarlı cephe özelliklerini taşımaktadır. Cephe deseninin mangrove çiçek hareketinden etkilendiği görülmektedir. Güneş ışınları sensörlerine çarptığı anda gölgeleme elemanları bir şemsiye gibi açılmakta ve akşam güneş battığında kapanmaktadır. Her bir gölgeleme cihazı, doğrudan güneş ısımasını önlemek için günde sadece bir kez açılmakta ve kapanmaktadır. Önceden programlanmış doğrusal aktüatörler, tamamen açıktan tamamen kapalıya kadar beş farklı çalışma konfigürasyonuna izin veren elemanları etkinleştirmektedir. Sistem soğutma yüklerini %25'e kadar azaltmaktadır (Barozzi ve diğ., 2016). Bu çalışmada binanın güneş ısı kazanımı ve soğutma yükü azaltılırken iç mekandaki görünürlük ve gün ışığı kalitesinden ödün verildiği görülmektedir. Bu da çalışma kapsamında dikkate alınan sorunlardan biridir.

Yeosu Kore'de Expo 2012'de sergilenen Tematik Üst Örtü'nün, cephede gün ışığı koşullarını kontrol etmek ve aydınlatma etkilerinin estetik yönlerini göstermek için cennet kuşu çiçeğindeki kinetik sistemin elastik deformasyonundan esinlendiği görülmektedir (Şekil 2.5). Sistem duyarlı ve biyomimetik cephe özelliklerini beraber göstermektedir. Sistemin aktivasyon gücü, deforme olmuş panjurlarda depolanan elastik enerjiye dönüştürülmekte ve kapatma sırasında servo motorları elektrik jeneratörleri olarak kullanarak kısmen elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu sayede sistem enerji tasarrufu sağlamaktadır. Panjurların açılma açısı uzunluklarıyla ilgilidir. Lamel ne kadar uzun olursa aydınlatılmış alan o kadar büyük olmaktadır (Barozzi ve diğ., 2016).



Şekil 2.5. A. Tematik Üst Örtü, Expo 2012, Yeosu Kore (Barozzi ve diğ., 2016), B. (a) Cennet Kuşu çiçeği, (b) temel Flectofin prensibi, (c) Flectofin panjurlarının projelendirilmesi ve (d) Lamella cephesi-kapalıdan 60 ° açıklığa hareket (Megahed, 2016).

Yukarıda verilen örneklerde görüldüğü gibi duyarlı bina cephelerinin 21. yüzyıldaki tasarım evrimi, cephe mühendisliği ve bina bilimindeki ilerlemelerin yanı sıra; malzeme mühendisliği, bilgisayar mühendisliği, sibernetik ve yapay zekâdaki gelişmeler ile paralellik göstermiştir (Ergin, 2019). Duyarlı cephe sistemlerinde güncel yaklaşımlar ilerleyen bölümlerde incelenecektir.

2.4. Duyarlı Cephe Sistemlerin İşleyişi

Duyarlı cepheler belirli bir hareketin olduğu, değişken geometrinin tüm parçalarından birine veya hepsine yayılan uyarlamaya sahip olduğu teknolojik sistemlerdir. Bina yapısına zarar vermeden, cephenin fiziksel yapısını veya malzeme özelliklerini değiştirerek adaptasyon gerçekleşmektedir. Uyarlamanın gerçekleşmesi için bir tetikleyici olan etki ve bu etkiye bir cevap olan çevreye veya nesneye verilen tepki

gereklidir. Ayrıca bu tepkiler saniye, dakika, saat, gün, yıl veya mevsimler gibi farklı zaman dilimlerinde gerçekleşebilir. Verilen tepkiye göre değişim bina, sistem, bileşen veya malzeme ölçeğinde gerçekleşebilir. En küçük ölçekte, değişiklik yapı malzemesinin moleküler yapısına göre gerçekleşir ve bu da optik veya termofiziksel özelliklerin değişmesine neden olur. Bina ölçeğinde durum incelendiğinde yapı bileşenlerinin hareketi bütünsel olarak binayı etkiler, tüm görünüm etkilenir (Öner, 2019). Bu sistem konfigürasyonlarının yapı kabuğunda bulunma şekli veya nasıl yer aldığı da değişebilmektedir. Gömülü, entegre ve eklenmiş olarak üzere 3 kola ayrılabilir. Ayrıca adaptasyon makro ve mikro olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilir (Loonen ve diğ., 2013; Ergin, 2019, Tabadkani, 2021):

- Makro ölçek: Hareketin hareketli parçalar aracılığıyla gözlemlenebildiği, katlama, genişleme, döndürme, germe ve şişirme gibi makro düzeyde adaptasyonun sağlandığı dönüşümlerdir. Hareketin gerçekleştirildiği dört yaygın tipoloji ve bazı dinamik cephe uygulamaları Şekil 5'te gösterilmiştir. Genellikle kinetik, aktif, hareketli, duyarlı ve biyomimetik cephelerde gözlenen değişimler bu kategoriye girmektedir.
- Mikro ölçek: Doğrudan materyale veya moleküler yapıya ve onun deformasyonlarına bağlı olan dönüşümlerdir. Özellikle optik ya da termo-fiziksel özelliklerdeki değişiklikler veya değiştirilebilir, medya ve akıllı cephelerde kullanılan enerji dönüşümleri yoluyla ortaya çıkmaktadır.

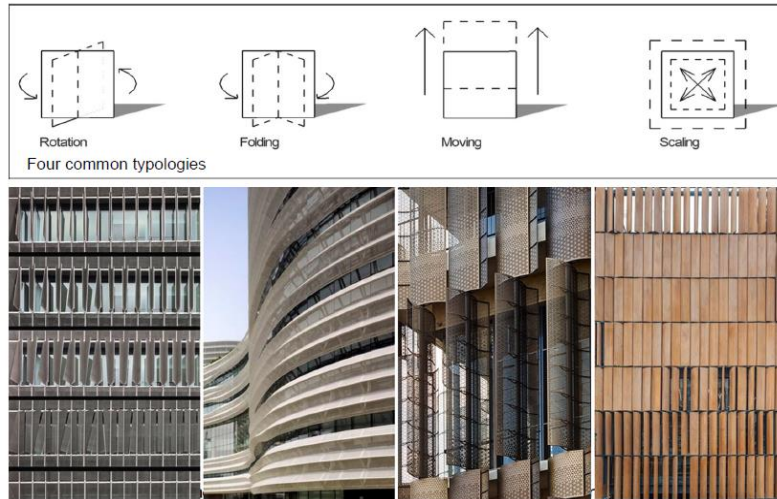
Duyarlı cephelerde adaptasyon, hareket enerjisinin (momentum) dönüşümüne dayanmaktadır ve manuel veya otomatik bir harekete geçirme kuvvetine ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden verilen tepki genelde makro ölçek sınıfına girmektedir. Bu cephelerdeki en önemli unsurlardan biri de kontroldür. Kontrol dışsal ve içsel olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Loonen ve diğ., 2013; Ergin, 2019):

- Dışsal kontrol: Geri bildirimden yararlanma yeteneğidir. Sensör, işlemci ve aktüatörlere dayanmakta gerektiğinde kullanıcı kontrolü devreye girebilmektedir. Kontrol, tüm yapı üzerinde kontrolü dağıtan merkezi sistemler üzerinden yapılmaktadır. Kontrolün gerçekleşebilmesi için elektriğe veya yakıta ihtiyaç duyulmamaktadır. Bileşenlerin sayısı sınırlıdır. Başlıca dezavantajı, sistemin uyarılma özellikleri ve değişkenlerin ayarlamasının beklenen şartlar aralığında

yapılmasıdır; beklenmeyen farklı koşullar ortaya çıkarsa sistem, bu koşullara uyum sağlayamayacaktır.

- İçsel Kontrol: Sistem; kontrol için, iç karar verme bileşenlerini kullanmaktadır. Sistemin kullanıcı kontrolü olmadan; sıcaklık, rüzgâr, güneş radyasyonu gibi çevresel girdilere otomatik olarak uyum sağlayabilmesini sağlamaktadır. Değişim, çevresel etkiler dönüştürülerek doğrudan kontrole dayanmaktadır. Sistem tetikleyicileri ve algılayıcılar entegre edilmiştir.

Duyarlı cephelerde genellikle dışsal bir kontrol sistemi ile uyarlama gerçekleştirilmektedir (Ergin, 2019). Duyarlı cepheler yüksek teknoloji ve tekniklerine bağlıdır. Çevresel değişkenleri okuyan sensörler, toplanan verileri işleyen ve bir yanıt oluşturan mantıksal birim, çevresel koşullara yanıt veren aktüatörler ve tüm bileşenler aracılığıyla bilgi aktaran kablolu veya kablosuz iletişim sistemi olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır (Waseef ve Nashaat, 2017). Bina kabuğunun değişen koşullara tepki verebilmesi ve istenen performans hedeflerinin sağlanması için, yapı elemanının harekete geçirilmesi, yani hareket ettirilmesi, döndürülmesi, genişletilmesi, küçültülmesi veya bükülmesi beklenmektedir. Nesnenin uzayda yöneliminin, koordinat eksenlerinin etrafında döndürülerek değiştirildiği, dönme, belirlenen kıvrım çizgileri boyunca gerçekleştirilen katlama, koordinat eksenlerine paralel doğrusal taşıma ve birim büyüklüğünün artması veya azalması olan ölçeklendirme olarak 4 ana hareket tanımlanabilmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Dinamik cephelerin tipolojileri ve örnekleri (Shi ve diğ., 2020).

2.5. Duyarlı Cephe Sistemlerine Etki Eden Etmenler

Duyarlı cephelerde uyarılama amacı genellikle termal konfor, enerji performansı, iç mekân hava kalitesi (IAQ), kullanıcı kontrolü, görsel ve akustik performanstır (Ergin, 2019). Duyarlı cephe, güneş radyasyonu, havalandırma, sıcaklık gibi çevresel koşullardan yararlanarak iç mekâna etki edebilen bir sistemdir (Muhammedova, 2019). Adaptasyonu sağlamak için gereken dış etmenler aşağıdaki başlıklar halinde incelenmiştir (Kızıldaş, 2019):

- Güneş ışıınımı: Doğal gün ışığı kullanımı hem kullanıcı iç mekân konforu hem de yapay ışık gereksinimini azaltma açısından önemlidir. Yaz ve kış aylarında yapı içerisine alınması gereken güneş ışıınımı miktarı değişeceğinden cephede uygulanacak gölgeleme elemanları tasarımında güneş enerji stratejisi düşünülmelidir. Güneş ışıınımı kontrolünde gölgeleme elemanlarının etkisi, gün ışığından faydalanma düzeyi ve kullanıcıların görsel konforu sistemin hangi yönde, hangi cephe konfigürasyonlarında tasarlandığı ve güneşi izleme sisteminin niteliği ile ilişkili olmaktadır. Ayrıca cephe modül geometrisi bu etmende çok önemlidir. Fazla gün ışığından kaçınmak için cepheyi tamamen kapatan modül seçimleri kullanıcıların dış görüş memnuniyetinde sorunlara neden olmaktadır.
- Dış ortam sıcaklığı ve nem: Gün ve yıl boyunca sürekli değişiklik gösteren bu parametreler bina ısıtma ve soğutma tasarımda önemli faktörlerdendir.
- Rüzgâr ve yağış: Doğal havalandırma sağlayarak kullanıcı konforunu pasif olarak arttırmaktadır.
- Gürültü: Cephe formunda ses tasarımı ve akustik performans gibi etkenler ile ilişkilendirilmektedir.

2.6. Parametrik Tasarım

Kinetik mimari terimi, hareketle üretilen binaların tasarımını ifade etmektedir. Birçok tanıma sahip olan kinetik mimari, değişken hareketlilik, konum ve/veya geometriye sahip binalar ve/veya yapı bileşenleri ya da dönüşen ortamlar, duyarlı bina öğeleri veya etkileşimli kamusal alanlar olarak tanımlanabilmektedir (Fouad, 2012).

Duyarlı kinetik cepheler, değişen performans gereksinimlerine ve değişken sınır koşullarına yanıt olarak zaman içinde bazı işlevlerini, özelliklerini veya davranışlarını tekrar tekrar ve geri dönüşümlü olarak değiştirme yeteneğine sahip olanlardır ve bunu genel bina performansını iyileştirmek amacıyla yapmaktadırlar (Juaristi ve diğ., 2020). Parametrik tasarım yöntemleri ve uygun algoritmalar yardımıyla, teknoloji doğrusal olmayan tasarım sistemine getirilmekte ve karmaşık geometriye sahip tasarım birden çok amaç için gerçekleştirilebilmektedir. Burada önemli olan çalışma prensiplerine uygun matematiksel bir çözüme ulaşmaktır. Hesaplama sistemleri her biri basit bir kurallar dizisine göre çalışan, önceki aşamasının sonuçlarını alarak ve bir işleve uygun olarak bir sonraki aşamaya dönüştürerek bilgileri ayrı bir adım dizisi aracılığıyla işleyen sistemlerdir (Chu, 2006).

Türk Dil Kurumu Sözlüğü'nde parametre, cebirde bir denklemin katsayılarına giren değişken nicelik olarak tanımlanmaktadır. Bilgisayar biliminde parametre, bir dizi komutun sisteme girilen çeşitli veriler üzerinde işlem yapmasıyla ilgili bir terimdir. Parametrik tasarım yöntemi, CAD/CAM sistemlerinde kısıtlılık (constraint) kavramı ile uygulanmaktadır. Kısıtlılık, bir nesne veya nesneler grubunun davranışını sınırlandıran bağlantılardır. Çizgilerin paralel veya dik olmaları, bir çizginin bir eğriye teğet olması, dairelerin eş merkezli olmaları, bir boyutun bir başka boyutun belirli bir katı olma zorunluluğu kısıtlılığa örnek olarak gösterilebilmektedir (Terzi, 2019).

Singh ve Gu (2012) birçok bilgisayar destekli tasarım yönteminin geliştirildiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, tasarımda yaratıcılık açısından, birkaç tasarım yaklaşımının birlikte kullanılması daha verimli olmakta ve daha çeşitli ve yenilikçi sonuçlar vermektedir. Bilgisayar destekli tasarım yöntemleri mimari tasarım sürecinin yönünü değiştirebilmekte, alternatif kombinasyonlar ve yenilikler getirebilmektedir. Eltaweel ve Su'ya (2017) göre mimaride parametrik tasarım yaratıcı çözümler üretebilmekte, karmaşık ilişkilerle başa çıkabilmekte ve bunları parametrik olarak kontrol edebilmektedir.

Duyarlı cepheler bölüm 2.5'te bahsedilen etkilere yalnız birine veya birkaçına tepki verebilme potansiyeline sahiptir. Çok fonksiyonlu olan duyarlı cephe kavramları doğa, teknoloji ve mimariye göre tasarım problemlerini multidisipliner strateji ile çözmeyi amaçlayan karmaşık sistemlerdir. Parametrelere dayalı oldukları için tasarım sürecinde

tasarım geometrisi üzerinde hesaplamalı kontrol sunmakta ve cephe fonksiyonu için uygun geometrinin saptanmasını sağlamaktadırlar. Bu nedenle duyarlı cephelerin modellenmesi ve değerlendirilmesi için bir gereklilik oluşturmaktadırlar.

Tasarımın ilk aşamalarında parametrik tasarımı kullanmak önemlidir. Grasshopper gibi scriptler¹ karmaşık modelleri çeşitli parametrelerle analiz etmek ve optimize etmek için kullanılmaktadırlar. Bir yapının mimari tasarım sürecinde tek tip bir algoritma veya programdan ziyade probleme, tasarımcıya ve diğer etkenlere göre değişen bir süreç görülmektedir. Duyarlı cephe tasarım sürecini oluşturmak için dört unsur gerekmektedir. Bunlar; parametrelerin ve koşulların ayarlandığı girdi, algoritmalar ve kurallar dizisi kullanılarak üretim yapılan çıktı, tasarım alternatifleri üretme ve en verimli tasarımın seçilmesidir. Uyarlanabilirlikleri ve tasarım kriterlerini değiştirme yetenekleri, parametrik modelleri kinetik ve dinamik tasarımlar üretebilmek için yararlı kılmaktadır (Razzaghmanesh, 2015). Sürdürülebilir tasarımlar elde etmenin yanında hem faydalı hem de estetik bir ürün elde etmeyi sağlamaktadır.

Bir yapının mimari tasarım sürecinde tek tip bir algoritma veya programdan ziyade probleme, tasarımcıya ve diğer etkenlere göre değişen bir süreç görülmektedir. Teknolojilerin ve dolayısı ile yazılımların gelişmesiyle birlikte geleneksel ve bilgisayar destekli tasarım yöntemlerinin bir alanı olan kural tabanlı tasarım yöntemleri üzerinde araştırma ve tartışmalar yapılmaktadır. Şekil gramerleriyle gerçekleştirilen çalışmalarda çoğunlukla origami uygulamalarından faydalandığı görülmüştür. Çalışmanın devamında duyarlı cephelerde origami tekniklerinin kullanımıyla ilgili çalışmalar üzerine araştırmanın devam edilmesine karar verilmiştir. Origami ile ilgili literatürdeki çalışmalar 3. bölümde detaylı olarak aktarılacaktır.

Origami modellerinin davranışını anlamak ve katlama sürecini ve yapısal tepkiyi simüle etmek için doğru ve ayrıntılı bir modelleme gereklidir. Origami'nin katlanma hareketini modellemek ve simüle etmek için Miyazaki ve diğerlerinden başlayarak birçok yaklaşım

¹Script dilleri, sistem programlama dillerinden (C++, Pascal, vb.) farklı olarak özel görevler için tasarlanmış yapılarıdır. Sistem programlama dilleri sıfırdan başlayıp veri tabanları ve tasarlanmış algoritmalar ile yeni sistemler üretirler. Script dilleri ise, mevcut bir dilin alt bütünlerini kullanarak, bu bütünleri bağlamayı hedefler; kompleks algoritma ve veri yapıları için kullanılmaz. Script dillerinde uygulamayı hızlandırmak, tanımlanmış bütünleri bağlamayı kolaylaştırmak için söz dizim kuralları sadeleştirilmiştir. Script dilinde elemanların nasıl kullanılacağını ve bir araya geleceğini gösteren tanımlanmış kalıplar yoktur. (Keskin, 2008).

önerilmiştir (Curletto, 2016). Bununla birlikte, bazı araçlar karmaşık Origami için uygun değildir ve simülasyonu, katlama işlemini daha basit adımlara bölerek modelleri sınırlamak gerekir. Parametrik metodoloji hem geometrik hem de teknolojik özelliklerin entegre edildiği ideal bir araç gibi görünmektedir.



3. ORİGAMİ

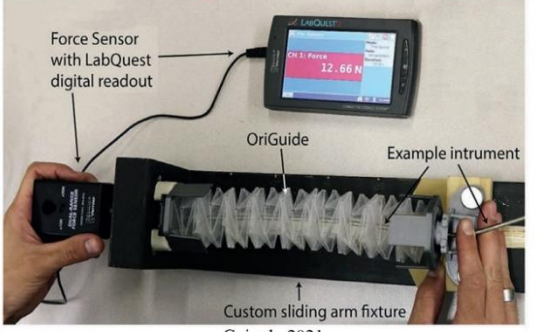
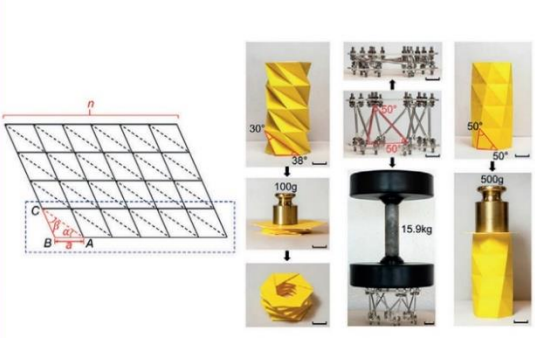
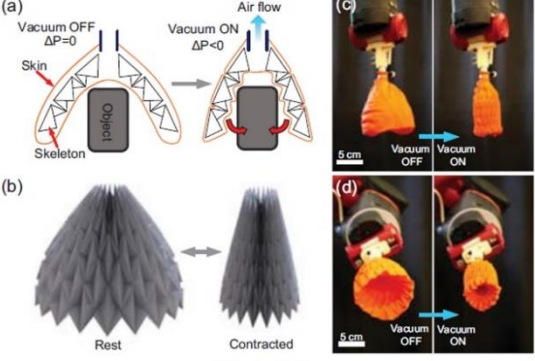
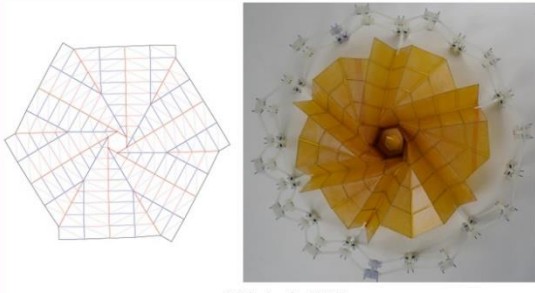
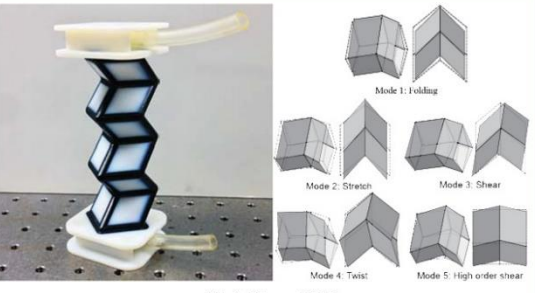
3.1. Origami ve Özellikleri

Origami, Japoncadan gelen eski kâğıt katlama sanatıdır. Kelime anlamı kıvrım anlamına gelen ‘oru’ ile kâğıt anlamına gelen ‘kami’ nin birleşimidir (Harper, 2004; Edmondson, 2015; Wonoto, et al., 2013). ‘Bir kâğıdı germeden, kesmeden veya başka bir kâğıt parçasını yapıştırmadan izometrik olarak çeşitli biçimlere dönüştürme’ sanatı olarak tanımlanabilir (Tachi, 2010). Tang Hanedanlığı döneminde Japonya'ya yayıldığı ve sonra Japonlar tarafından tanıtıldığı bilinmektedir. O zamandan beri origami sanatı eğitimciler, matematikçiler, mimarlar, fizikçiler ve mühendisler arasında popüler bir konu haline geldiği görülmektedir.

Düz tabakaları karmaşık üç boyutlu şekillere katlamanın görünüşte sonsuz olasılıkları, uzay aracı, medikal cihazlar, moda, kendinden katlanan robotlar gibi çok farklı boyutlarda çeşitli katlanabilir yapılara ilham vermektedir (Li ve diğ., 2018) (Şekil 3.1). NASA tarafından geliştirilen bir uydudan kalp damarları için tasarlanmış bir stente kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı olan origaminin çağdaş kullanımının pek çok örneği vardır (Çavuş, 2019). Son yıllarda mimaride de, origami ve origamiden ilham alan yapılar büyük ilgi görmektedir. Bu sanat kâğıt katlamadan çok daha fazlasını vaat eden bir potansiyele sahiptir.

Origami yıllardır kâğıt katlama olarak bilinmesine rağmen bugünkü origami anlayışının ilk bilinen anlamından (kâğıt katlama) farklılaşarak karmaşık tasarım uygulamaları için bir araç haline geldiği görülmektedir. Origami binlerce yıldır kullanılmasına rağmen daha çok 1970'lerin ortalarında matematikçilerin geleneksel origami modelleri kullanarak sonsuz sayıda şeklin oluşturulabileceğini keşfetmesiyle yaygınlığının arttığı görülmektedir (Peraza-Hernandez ve diğ., 2014). O günden bugüne kadar da çeşitli sert origami yapı tasarımları önerilmektedir.

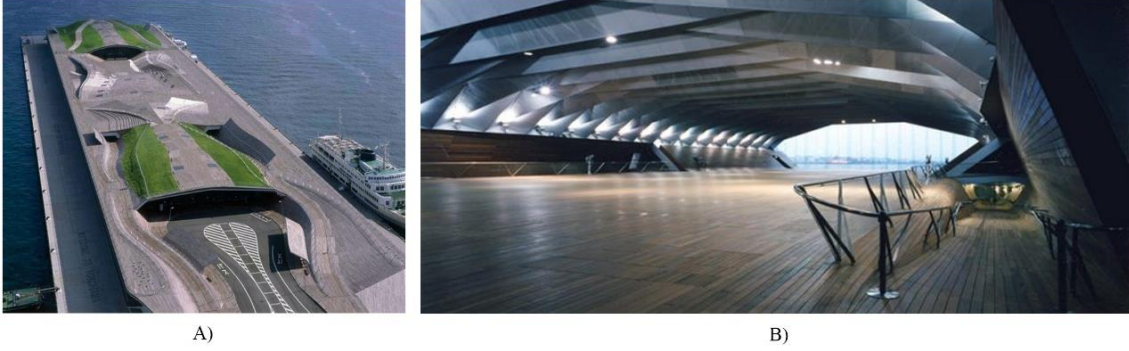
Mimaride origami kullanımının daha yaygın olarak donmuş bir durumda, yani bir yüzeyin beton, ahşap, metal gibi ağır malzemelerle statik bir şekilde üretilmesiyle başladığı bilinmektedir (Osorio ve diğ., 2014). Foreign Office Architects (FOA) tarafından Yokohama Uluslararası Yolcu Terminali ve Hironaka Ogawa & Associates tarafından Pleats Binası buna örnek verilebilmektedir.

Biyomedikal Mühendisliği  Force Sensor with LabQuest digital readout OriGuide Example instrument Custom sliding arm fixture Coi vd., 2021	Mimari  URL -5
Endüstriyel Tasarım  URL -6	Moda  URL -7
Metamalzemeler  Zhai vd., 2018	Robotik  Li vd., 2019
Uzay Mühendisliği  Zirbel vd., 2015	Biyomimetik Mühendisliği  Li & Wang, 2015

Şekil 3.1. Origamiden esinlenen disiplinler.

Yapımına 1995 yılında başlanan 2002’de tamamlanan Yokohama Uluslararası Yolcu Terminali (Şekil 3.2), bilgisayar destekli tasarımı sürece tamamen entegre eden ilk

örneklerdendir. Birçok kompleks yüzeyin hafifçe kıvrılıp birbirilerinin içinden geçerek gemi geçişine müsait, içinde bir yaşam kurgulanabilecek mimari bir topoğrafyaya dönüşmesiyle oluşturulmuş bir strüktüre sahiptir. En üstteki seyir terasının, kullanılan materyaller ile terastan uzanan döşemelerin yürüyüş yolları ve içteki geniş kapalı mekanları oluşturmak için yaptığı dalgaya benzer salınımlarla kurgulandığı anlaşılmaktadır (URL-8).



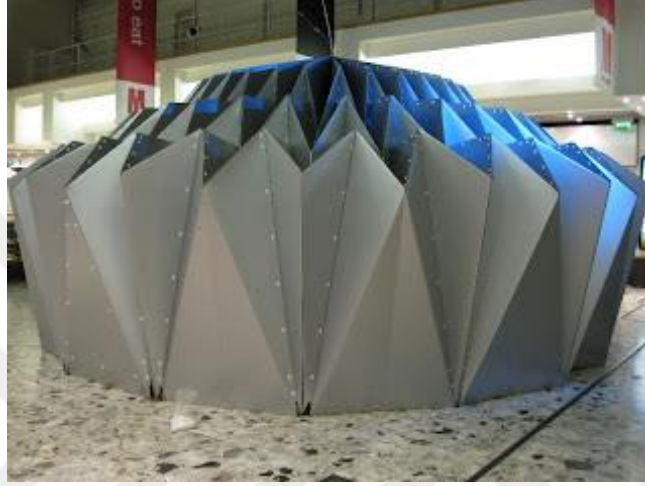
Şekil 3.2. A) Yokohama Uluslararası Yolcu Terminali ve B) İç mekân etkisi (URL-8).

2012 yılında yapılan Pleats Binası'ndaki pileler (Şekil 3.3), güneş tarafından yavaşça değişen gölgeler oluşturarak her sezon farklı görünümler oluşturmaktadır. Pileli duvarın arka yüzünde ters desen bulunmaktadır. Bu nedenle, tek bir kıvrımlı duvar bile aynı anda hem dış hem de iç kısımda farklı desenler oluşturmaktadır. Çeşitli kıvrımlar, strüktür, süslemeler, ses yansıtıcılar gibi birçok işlevi barındırmaktadır (URL-9, URL-10).



Şekil 3.3. A) Pleats Binası ve B) Cephenin iç mekâna etkisi (URL-9).

Cephe ya da üst örtü tasarımı haricinde geçici, sökülebilir, takılabilir farklı türde binalarda da origami örneklerini görmek mümkündür. 2007 yılında Miwa Takabayashi'nin bir alışveriş merkezinde kullanılmak üzere oluklu mukavvadan yaptığı küçük bir üst örtü olan Packaged buna örnek verilebilir (Şekil 3.4). Ryuichi Ashizawa tarafından yapılan Folded Hut, Matthew Malone tarafından yapılan Recover Shelter ve Mats Karlsson tarafından yapılan Xile de bunlara dahildir (Osorio ve diğ., 2017).



Şekil 3.4. Packaged (URL-11).

2008 yılında Ryuichi Ashizawa tarafından yapılan Folded Hut (Şekil 3.5) çeşitli etkinlikler için daha fazla sığınak sağlamaktadır. Atölye çalışmaları veya günlük sanat programları için bir alan tanımlayan kavisli bambu çadır benzeri yapılardan oluşmaktadır. Narin ahşap, altında yürüyen ziyaretçilerin üzerinde yüzen bir çatı örtüsü gibi davranır (URL-12).

2008 yılından Matthew Malone, Amanda Goldberg, Jennifer Metcalf ve Grant Meacham tarafından tasarlanan Recover Shelter (Şekil 3.6) acil durumlarda kullanılmak üzere polipropilenden yapılmış geçici bir sığınaktır. Büyük boyutlu bir origami yapısı olan sığınak, hangisinin taşınmasının daha kolay olduğuna bağlı olarak tamamen bir değil, iki farklı şekle bölünebilir. İki tam boyutlu prototipi başarıyla inşa edilip test edilen akordeon sığınak şiddetli rüzgarlara ve kara karşı dayanıklıdır (URL-14).



A)

B)

Şekil 3.5. A) Folded Hut ve B) İç mekân görünümü (URL-12, URL-13).

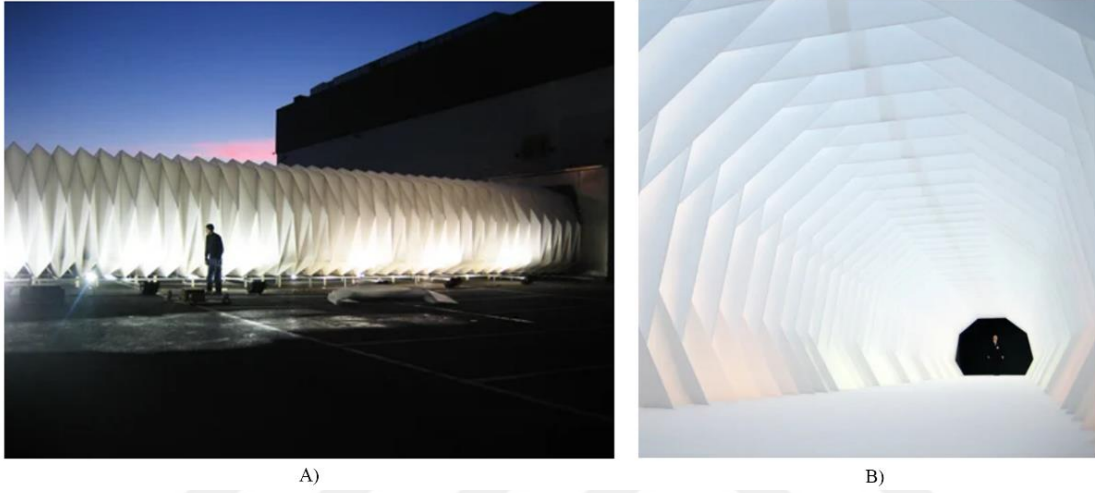


Şekil 3.6. Recover Shelter (URL-14).

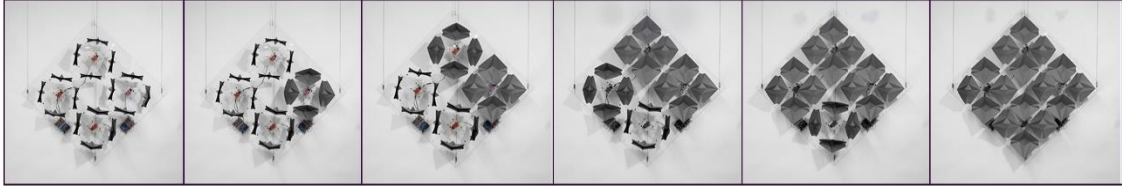
2008 yılında Mats Karlsson tarafından yapılan Xile (Şekil 3.7) Interieur tasarım fuarı sırasında iki binayı birbirine bağlamak için oluşturulan 35 metre uzunluğunda yarı saydam bir tüneldi. İç mimari kategorisinde ödül kazanan plastik ürün, iç ve dış mekanlarda kullanılabilir ve genişletilebilir özelliktedir (URL-15).

Teknolojinin ilerlemesiyle uyarlanabilir ve duyarlı yapılarda origami kullanım örnekleri daha çok görülmektedir. Origami'nin kullanımı, yalnızca yaşanan alanın konfigürasyonu açısından dönüştürülebilir mimari oluşturulmasına değil aynı zamanda duyarlı mimari veya kinetik çatılar veya tavan veya duvar panelleri gibi mimari unsurların tasarlanmasına da olanak tanımaktadır. Bu yapılar genellikle yüzeyler yerine origami modüllerine dayanmaktadır. Bu modüller genellikle, modüllerin açık ve kapalı geometrilerini tahmin etmek ve kontrol etmek daha basit olduğu için, merkezi bir nokta etrafında düzenlenmiş az sayıda yüze sahiptir. Ve modüller uyaranlara bir bütün olarak yanıt vermelerine

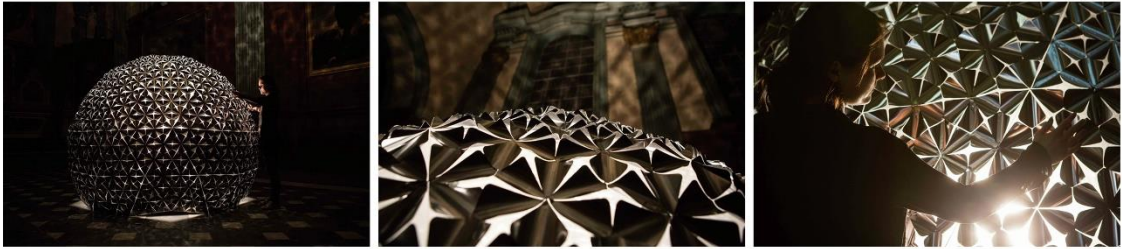
rağmen geometrik olarak bağımsız birimler olarak işlev görürler. Bunlara, 2011 yılında Yale Üniversitesi'nde Christopher Connock ve Amir Shahrokhi tarafından geliştirilen Auxetic Origami (Şekil 3.8), 2007'de Roosegaard Studio tarafından Lotus Dome (Şekil 3.9) (Osorio ve diğ., 2014) ve 2011'de David Lettellier tarafından karşılıklı duvarlara yerleştirilmiş, sese tepki veren ve birbirleriyle sürekli iletişim halinde olan çiçeklerden oluşan iki modülde oluşan Versus (Şekil 3.10) (Osorio ve diğ., 2017) örnek verilebilir.



Şekil 3.7. A) Xile ve B) İç mekân görünümü (URL-15).



Şekil 3.8. Auxetic Origami'nin katlanma aşamaları (URL-16).



Şekil 3.9. Lotus Dome (URL -17).



Şekil 3.10. Versus (URL -18).

Origami, kenar noktalarının hareketine odaklanarak kuvvetleri görmemizi ve hareketi tahmin etmemizi sağlamaktadır. Ayrıca, katlama işlemi sırasında geometrik dönüşümler göz önüne alındığında, herhangi bir kat çizgisinin uzunluk olarak sabit kaldığı gözlemlenebilmektedir. Yani şekli koruyan, izometrik bir dönüşüme sahiptir. Mozaik katlama kıvrımları sayesinde, sistemin diğer yönlerinde sert kalırken önceden belirlenmiş deformasyon yönüne kolayca deforme olabilmektedirler (Peraza-Hernandez ve diğ., 2014). Origami tabanlı yapıların en önemli avantajı, kinetik hareketler, çekme, sıkıştırma veya burulma için sabit bir kuvvet kullanması, hareketi çok basit ve mükemmel bir şekilde sağlamasıdır (Çavuş, 2019). Böylece cephe tasarımında origami kullanıldığında cephe elemanlarının hareketi kolaylaşmakta ve cephedeki hareketin enerji tüketimi azaltılabilmektedir. Uyarlanabilir cepheleri gerçekleştirmenin sezgisel bir yolu olarak da kabul edilen origami yöntemlerinin diğer avantajları, kendi kendine organize edebilir olmalarıdır (Pesenti ve diğ., 2015). Origami yapısal kalite sağlamakla birlikte aynı zamanda bir form bulma aracı olarak da kullanılabilmektedir. Bir kâğıttan başlayıp basitçe katlayarak çeşitli formlar elde edilebilir. Karmaşık şekiller ne kadar karmaşık olursa olsun, origami ile katlama veya açma hareketi deformasyon ve kilitlenme sorunları olmadan gerçekleştirilebilmektedir. Origami, çubuklu ve panelli yapılarından farklı olarak, farklı parçaları birleştirmeden sürekli yüzeyler oluşturmak için de kullanılabilmektedir. Süreci, nakliye ve maliyeti optimize etmede önemli ölçüde fayda sağlamaktadır (Foschi, 2019).

Yapıları kompakt bir şekilde depolama, yeniden yapılandırma ve üretim karmaşıklığını azaltma yeteneğine de sahiptir. Acil bir yapı inşa etme talebine hızlı yanıt verebilmektedir. Prefabrike yapılar kullanarak, her bir eleman yerine doğrudan bütün bir yapı içinde çalışarak, montaj süresini kısaltan, tek bir işlemde bir dış kaplama veya kanopi oluşturmayı mümkün kılmaktadır (Lucarelli ve Carlo, 2019). Ayrıca, günümüzün tasarım

zorlukları arasında çok işlevli, daha küçük ölçekli, konuşlandırılabilir ve kompakt bir şekilde depolanabilen ürünler oluşturmak önemlidir. Bu zorlukların çözümleri origamide olabilir (Morris ve diğ., 2016).

Çok çeşitli origami türleri vardır. Çalışma kapsamında bizi en çok ilgilendiren, tüm yüzlerin her zaman düzlemsel kalmasını sağlaması nedeniyle sert origamidir. Sert-katlanabilir origami Tomohiro Tachi tarafından önerilen tüm yapının katlama çizgilerinin bir kerede katlandığı, bir hareket üreten matematiksel bir modelden oluşmaktadır. Katlanmış yüzey, menteşe işlevi gören ve yüzeye elastik bir kapasite kazandıran kırışıklıklarla birbirine bağlanan çoklu yüzeyler olarak çalışmaktadır. Bu çoklu yüzeyler, kullanılan malzemenin sert olmasına ve esnekliği olmamasına rağmen oluşturulan origami modelinin büyüebilmesine ve küçülebilmesine olanak sağlamaktadır (Osorio ve diğ., 2014). Origamiyi özellikle hafif olması istenen, kendini taşıyabilen, farklı biçimler alabilen ve kinetik bir davranışa sahip olması istenen bir yapının taleplerini karşılamaya uygun kılan nedenler bunlardır.

Sonuç olarak, bu çalışma, yukarıda da anlatılan avantajları ve potansiyelleri nedeniyle duyarlı bir cephe oluşturmak için origami sanatını kullanmayı tercih etmektedir.

3.2. Origami Terimleri

Origami'nin kinetik bir yüzey oluşturmak için yüzleri, kat çizgileri ve eklem noktaları bulunmaktadır. Şekil 3.11'deki kırışıklık modeli origami'nin temel kavramlarını göstermektedir. Sıklıkla kullanılan temel terimler aşağıda verilmiştir:

Dağ kıvrımı: Dışa doğru katlanan, sırt özelliği gösteren kenarlardır. Genellikle kesikli bir çizgi ve/veya mavi renk ile gösterilmektedir.

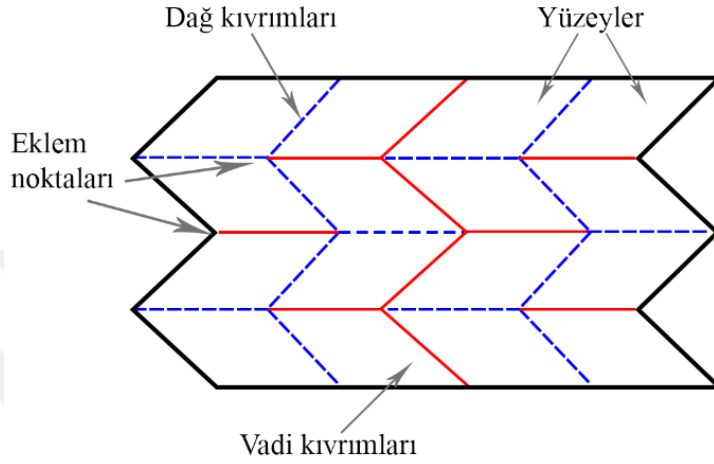
Vadi kıvrımı: Çıkıntılı, oluk özelliği gösteren kenarlardır. Genellikle kısa çizgi deseni ve/veya kırmızı renk ile gösterilmektedir.

Eklem noktaları: Dağ ve vadi kıvrımlarının birleştiği noktalardır.

Kırışıklık: Katlanan bir kâğıt açıldığında üzerinde oluşan çizgi kırışıklık olarak tanımlanır. Bu kırışıklıklar artık katlamayı sağlayan bir işaret ve kılavuz çizgileridir.

Kırışıklık deseni: Kılavuz çizgileri olan kırışıklıkların birleşmesiyle oluşan desendir.

İstenen üç boyutlu şekli elde etmek için, origami tasarımcıları genellikle matematiksel ve hesaplamalı origamiye göre iki boyutlu bir düzlemde kırışıklıklar düzenlemektedirler. Belirli bir şekilde dağılan tüm kırışıklıklar bir kırışma deseni oluşturmaktadır. Daha sonra, planlanan kırışma deseni boyunca düzlemsel levha katlanarak, belirli yük taşıma kapasitesine sahip karmaşık bir üç boyutlu yapı elde edilebilmektedir.



Şekil 3.11. Origami'nin temel kavramlarını gösteren kırışıklık deseni.

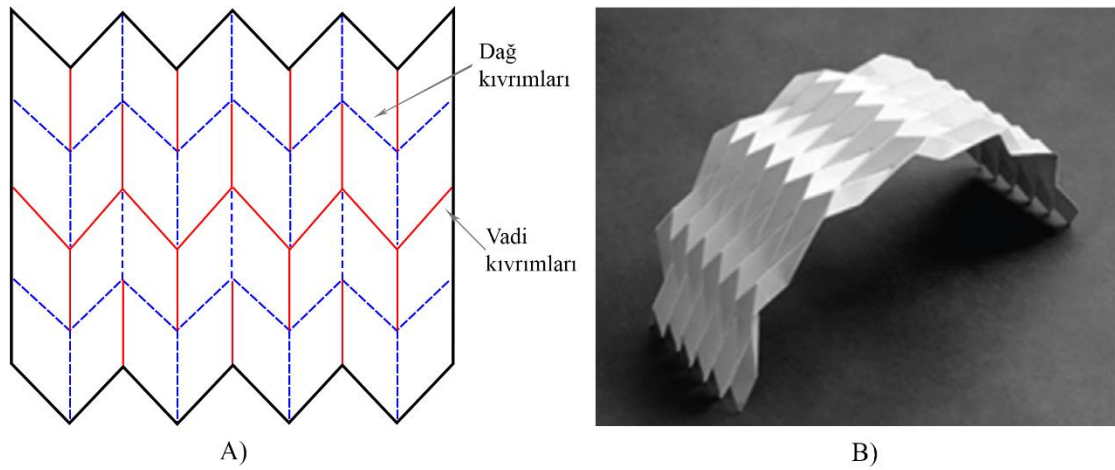
3.3. Origami Katlama Desenleri

Yaygın kullanılan kırışıklık desenleri arasında Miura-ori deseni, Waterbomb deseni, Yoshimura deseni ve diyagonal desen bulunmaktadır. Bu kıvrım desenleri, temel bir birim üzerindeki bir dizi dönüşüm sonrasında (örneğin, öteleme, döndürme veya yansıtma) elde edilmektedirler.

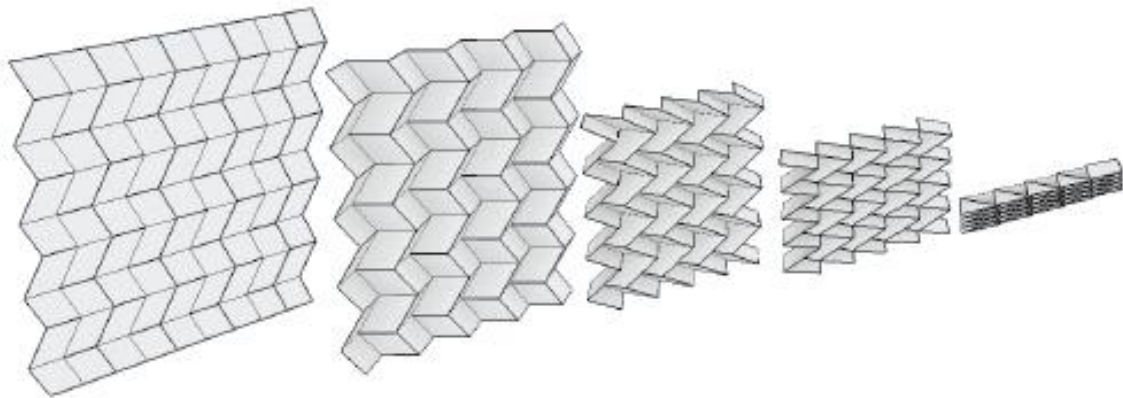
3.3.1. Miura-ori Deseni

Adını Japon bir astrofizikçi olan Koryo Miura'dan alan kırışıklık deseni, tekrar eden paralelkenarlardan oluşmaktadır (Şekil 3.12-A). Desen bir balıksırtı modeli oluşturan simetrik yamuklardan oluşmaktadır. Kırışıklıklar bir yönde düz çizgiler diğer yönde zikzak bir yol oluşturmaktadır. Her zikzak yolu ya dağ kıvrımları ya da bir zikzak yolundan diğerine dağlardan vadilere değişen vadi kıvrımlarıdır (Ahmed ve diğ., 2020). Bir yönde, kırışıklıklar düz çizgiler boyunca uzanır ve her bir paralelkenar, her bir kıvrım boyunca komşusunun ayna yansımısını oluşturmaktadır (Lucarelli ve Carlo, 2019).

Geliştirilebilir çift oluklu yüzey veya Miura-ori, haritaların katlanmasında, güneş panellerinin paketlenmesinde kullanılan iyi bilinen bir sert origami yapısıdır (Şekil 3.13). Desen aynı zamanda bükülebilir olma özelliğine de sahiptir (Şekil 3.12-B). Miuri-Ori modelinde katlama modeli tek bir kâğıt yaprağıyla katlanabildiği, katlama süreci boyunca her bir elemanın yüzleri ve kenarları düzlemsel kaldığı ve birleşimleri/kıvrımları menteşe görevi gördüğü için katı origamiye sahip olarak nitelendirilmektedir (Baerlecken ve diğ., 2012).



Şekil 3.12. A) Miura-ori kırışıklık deseni ve B) Miura-ori'nin bükülme hareketi (Lucarelli ve Carlo, 2019).

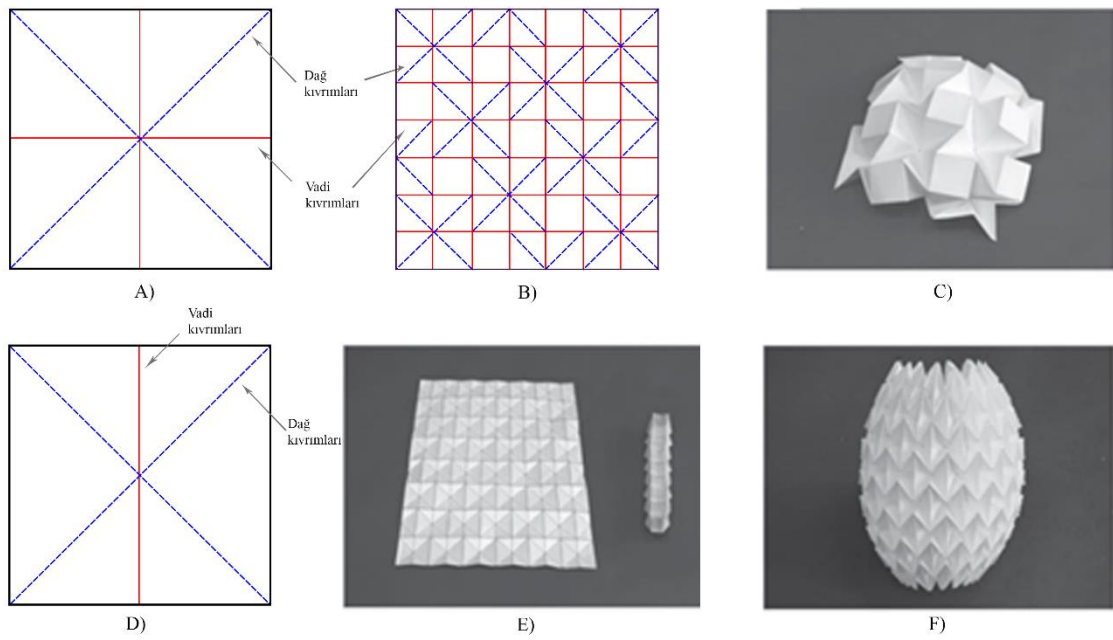


Şekil 3.13. Miura-ori'nin sert katlanma hareketi (Tachi, 2009).

3.3.2. Waterbomb Deseni

Altı kıvrımın birleştiği bir dizi köşeden oluşan bir desenden üretilen geleneksel Waterbomb deseni en yaygın kullanılan origami desenlerinden biridir. Sekiz kıvrımlı

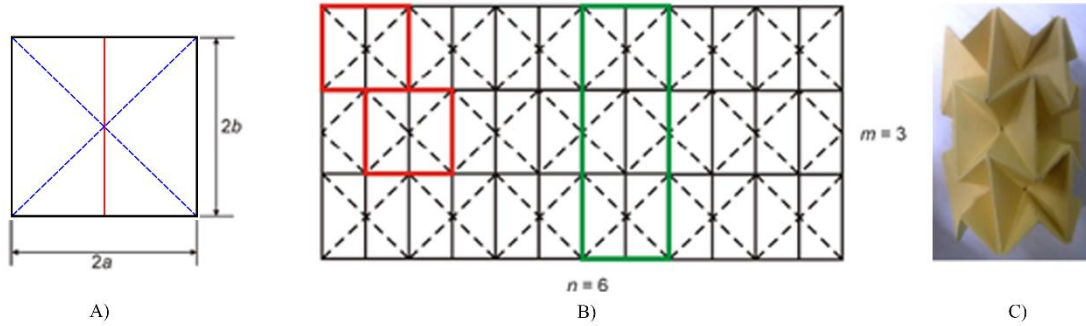
taban ve altı kıvrımlı taban olmak üzere iki türü bulunmaktadır. İlki, merkezi bir tepe noktası etrafında değişen sekiz dağ ve vadi kıvrımından oluşan kare bir kâğıt yaprağından oluşmaktadır (Şekil 3.14-A). Tipik mozaiklemelerinden biri, kare Resch modelini oluşturan daha küçük bir karenin etrafına döşenen bu tür dört taban tarafından üretilmektedir (Şekil 3.14-B ve C). Şekil 3.14-D' de gösterilen iki dağ ve dört vadi kıvrımından oluşan ikincisi, daha yaygın olarak bilinmektedir ve mozaikleri düz katlanabilir bir yüzeyden sihirli origami topu olarak bilinen deforme olabilen bir tüpe kadar değişmektedir (Şekil 3.14-E ve F). (Chen ve diğ., 2016).



Şekil 3.14. İki Waterbomb tabanı ve kırışıklık desenleri; A) Sekiz kıvrımlı Waterbomb kırışıklık deseni; B) Resch modelini oluşturan kırışıklık desenlerinden biri; C) Kısmen katlanmış Resch modeli; D) Altı kıvrımlı Waterbomb kırışıklık deseni, E) Katlanmamış ve katlanmış halde altı kıvrımlı model ve F) Desenin tüp olarak katlanmış modeli (Chen ve diğ., 2016'dan düzenlendi).

Desen modelinden yapılan silindirler genellikle rijit bir şekilde katlanamamaktadır. Ancak uygun bir model geometrisinin seçilmesi ile düzgün bir yarıçapa sahip bir silindirin, modelde bozulma olmadan sabit bir şekilde monte edilebileceği özel konfigürasyonlar oluşturulabilmektedir. Şekil 3.15'te düz ve kesikli çizgilerin sırasıyla dağ ve vadi kıvrımlarını temsil ettiği temel bir Waterbomb modeli sunulmaktadır. Desen, dört diyagonal vadi kıvrımından ve bir tepe noktasında buluşan hem dikey hem de yatay simetri oluşturan iki ortak doğrusal dağ kıvrımından oluşmaktadır. Şekil 3.15-A'daki

temel birim dikey ve yatay yönlerde tekrarlanarak Şekil 3.15-B'de gösterilen bir desen oluşturulabilmektedir. Bitişik katmanlardaki temel birimler birbirinden yarım birim kaymakta ve Şekil 3.15-B'de kırmızı kalın çizgilerle vurgulanmaktadır. Temel birimlerin düşey ve yatay yönlerdeki toplam sayıları sırasıyla m ve n olarak gösterilmektedir. Şekil 3.15-B'deki desen izlenerek bir kâğıt katlanırsa ve iki dikey kenar birleştirilirse, Şekil 3.15-C'de gösterildiği gibi bir silindir oluşturulabilmektedir (Ma ve You, 2014).



Şekil 3.15. A) Altı kıvrımlı Waterbomb deseninin temel birimi; B) Temel birimlerin kombinasyonu ve C) Waterbomb deseninden yapılan silindir (Ma ve You, 2014).

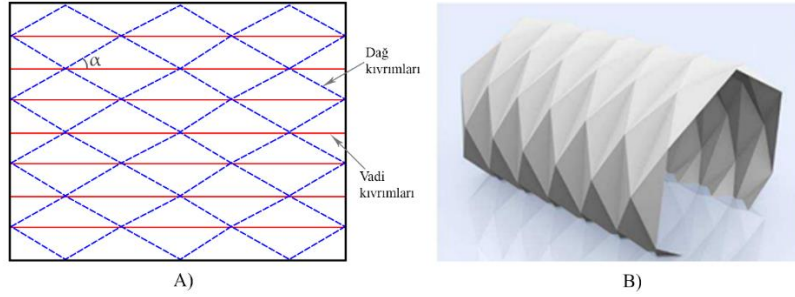
3.3.3. Yoshimura Deseni

Bu kırışıklık deseninin adını ilk kez 1951'de Japonya'da yayınlanan ve daha sonra Amerika Birleşik Devletleri'nde yeniden yayınlanan bir makalede origaminin gelişimi için bir açıklama sunan Japon araştırmacı Yoshimaru Yoshimura'dan aldığı bilinmektedir (Hoff, 1966). Baklava deseni olarak da anılan desenin temeli (Şekil 3.16), köşegenlerinden katlanarak elde edilen bir elmas şekli sayesinde. Şekilde mavi kesikli çizgiler dağ kıvrımlarını, turuncu çizgiler ise vadi kıvrımlarını belirtmektedir. Genellikle tüp katlamada uygulanmaktadır. Köşegenler ile kenarlar arasındaki α açısı ne kadar keskin olursa, desenin bükülmesi o kadar düz olmaktadır (Lucarelli ve Carlo, 2019). Chudoba ve diğ. (2014)'e göre, Yoshimura kırışıklık deseni, katlamanın herhangi bir aşamasında tek bir eğrilik ile şekiller almaktadır. Aynı boyutta üçgen elemanlar kullanılarak monte edilmektedirler.

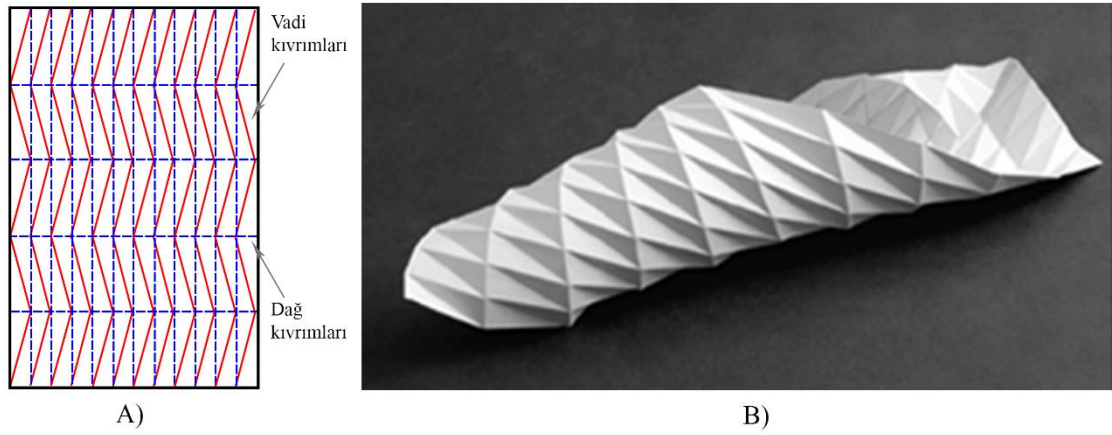
3.3.4. Diagonal Desen

Bu kırışıklık deseninde bir dizi katlanmış paralelkenar, sarmal çarpık bir katlanma oluşturmaktadır (Şekil 3.17). Diagonal desen ve Yoshimura deseni esas olarak baklava desenli vadi kıvrımlarının düz çokgen bir çizgi oluşturmasıyla gerçekleşmektedir. Buna

karşın Diagonal desen baklava desenli vadi kıvrımlarının sarmal çokgen bir çizgi oluşturması ile Yoshimura deseninden farklılık göstermektedir (Buri ve Weinand, 2008).



Şekil 3.16. A) Yoshimura Kırışıklık Deseni ve B) Yoshimura Deseni (Curletto, 2016).



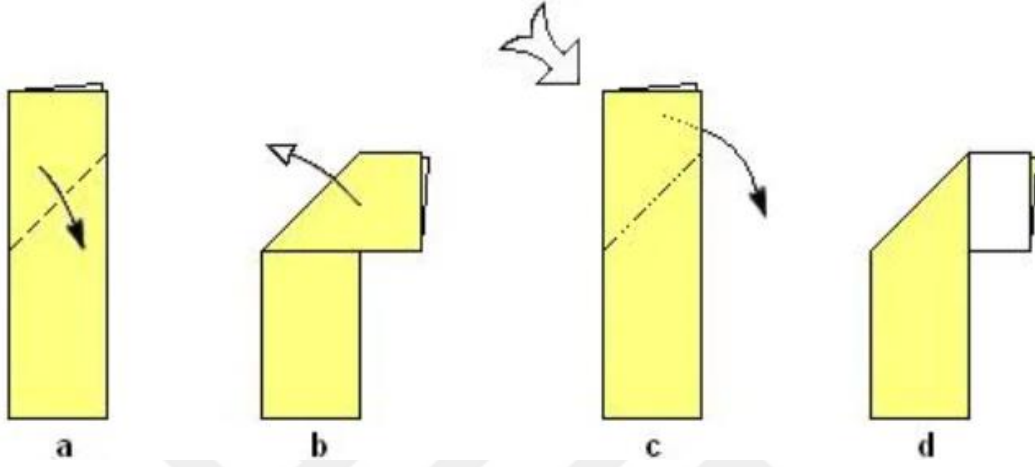
Şekil 3.17. A) Diagonal Kırışıklık Deseni ve B) Diagonal Desen (Buri ve Weinand, 2008).

3.4. Yaygın Katlama Türleri

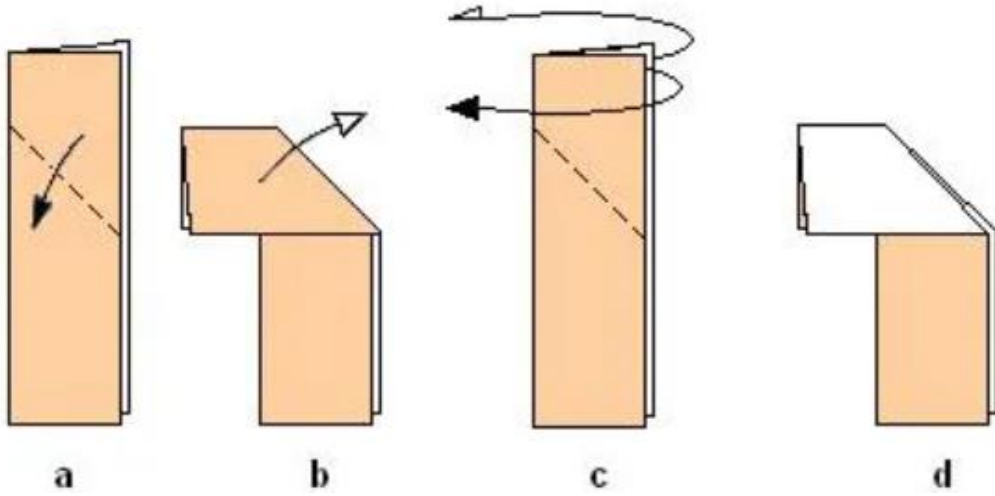
Tüm origami modelleri dağ ve vadi kıvrımlarından meydana gelse de genellikle kendilerine ters katlama (reverse fold), tavşan kulağı katlama (rabbit-ear fold), kabak katlama (squash fold), taç yaprağı katlama (petal fold), pilise katlama (pleat fold), kıvrımlı katlama (crimp fold) ve açık çöküntü katlama (open sink fold) gibi belirli isimler verilmiş farklı türleri bulunmaktadır (Ahmed ve diğ., 2020; Hemmerling, 2010; Gilewska ve diğ., 2014). Temel katlama türlerinin sayısı az olmasına rağmen karmaşık tasarımlar yapmak için çeşitli şekillerde birleştirilebilmektedirler.

3.4.1. Ters Katlama (Reverse Fold)

Ters katlama, bir ucun katlandığı, böylece iki veya daha fazla katmanın tek bir kıvrım boyunca katlandığı türdür. İç (Şekil 3.18) ve dış (Şekil 3.19) olmak üzere iki tür ters katlama uygulaması bulunmaktadır.



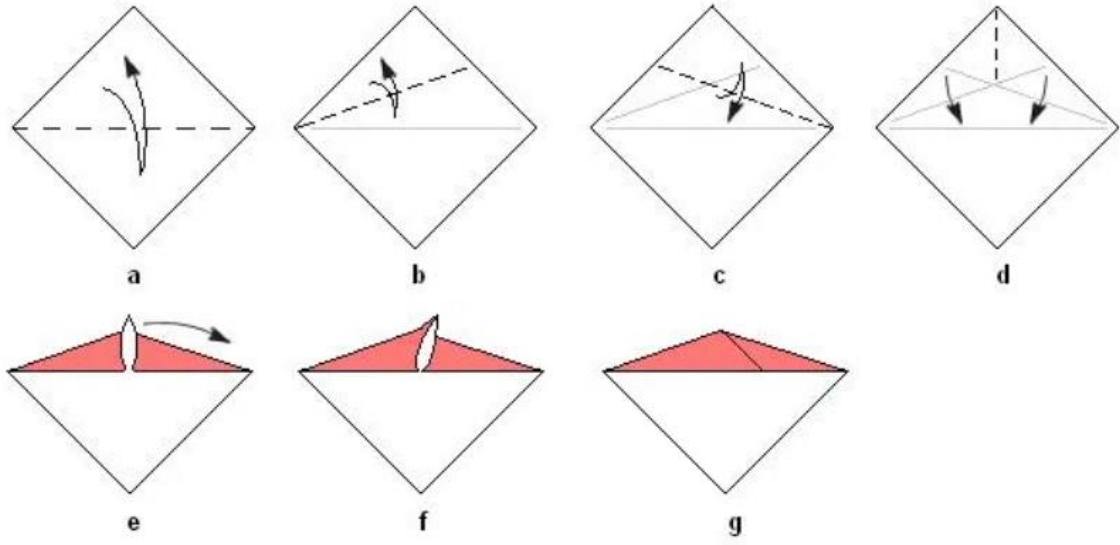
Şekil 3.18. İç ters katlama kırıxıklık deseni aşamaları (URL-19).



Şekil 3.19. Dış ters katlama kırıxıklık deseni aşamaları (URL-20).

3.4.2. Tavşan Kulağı Katlama (Rabbit-Ear Fold)

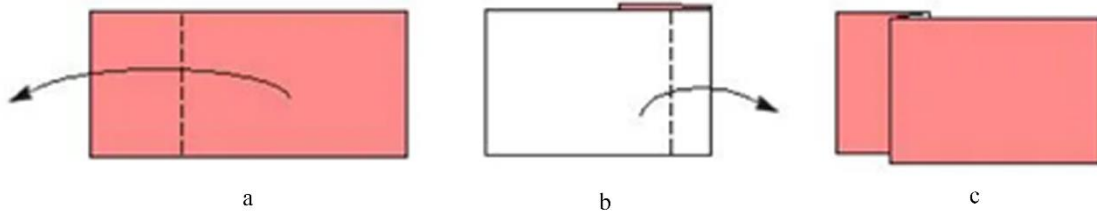
Üç vadi ve bir dağ kırıxıklığından oluşan, kâğıdı daha dar bir hale getiren modeldir. Kâğıdın bir köşesi yeni bir nokta oluşturmak için ikiye katlanmaktadır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Tavşan kulağı kırışıklık deseni aşamaları (URL-21).

3.4.3. Pilise Katlama (Pleat Fold)

Pilise katlama tekniği vadi ve dağ kıvrımlarından oluşan kolay bir kıvrım modelidir. Bu teknik, bir düzlemi genişletmek ve küçültmek için parçaları cephe yüzeyinin dışına çıkmadan modülün açıklığını değiştirerek basit ve esnek çözümler sunma potansiyeline sahiptir (Le-Tanh, 2021) (Şekil 3.21).



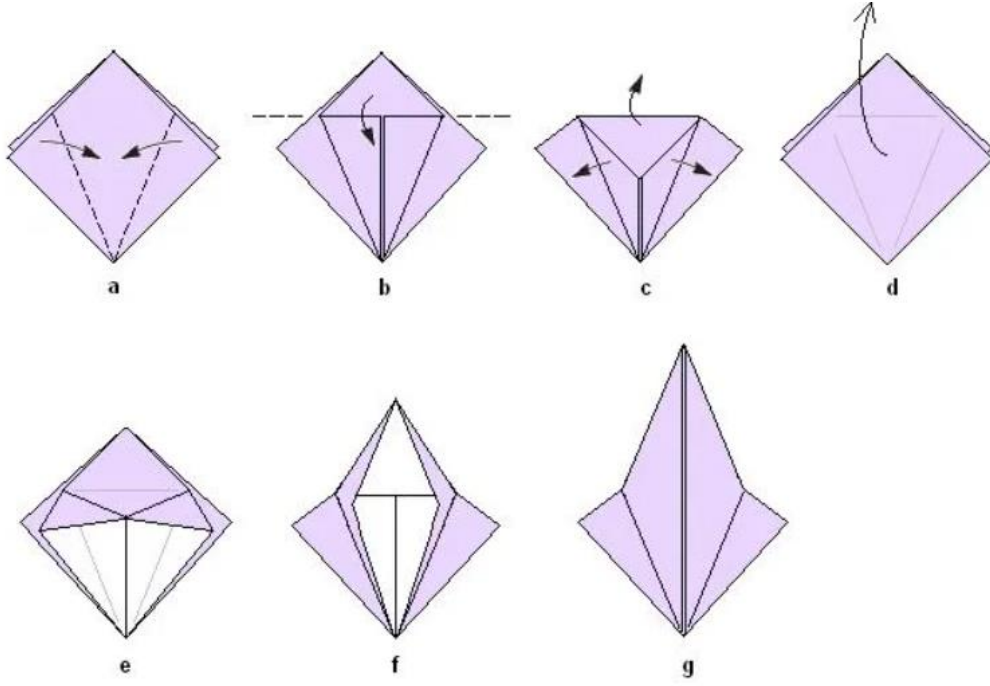
Şekil 3.21. Pilise katlama kırışıklık deseni aşamaları (URL-22).

3.4.4. Taç Yaprığı Katlama (Petal Fold)

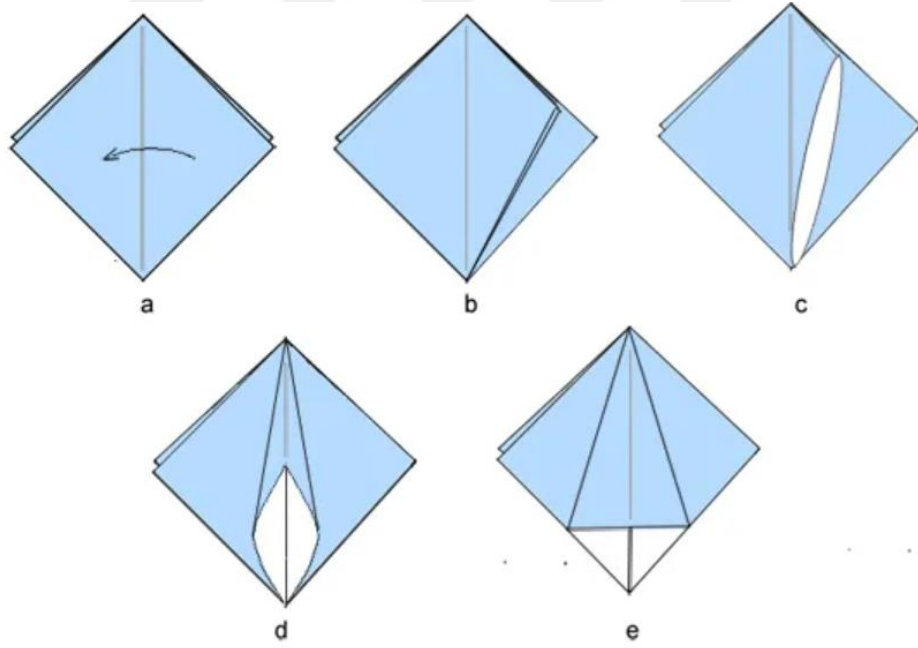
Bir taç yaprağına benzeyen kırışıklık desenidir. Genellikle iki dağ kıvrımından ve bir vadi kıvrımından oluşmaktadır (Şekil 3.22).

3.4.5. Kabak Katlama (Squash Fold)

Temelde katlanacak olan kanadı kaldırıp, katmanlarını ayırarak ve hafifçe bastırarak iki yeni dağ kıvrımının oluşturulmasıyla gerçekleşmektedir (Şekil 3.23). Kâğıdın üst katmanındaki kırışıklık çizgisinin alttaki kâğıt katmanlarıyla hizalanması gerekmektedir.



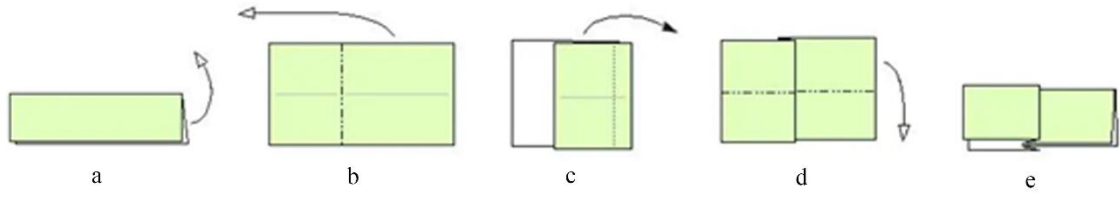
Şekil 3.22. Taç yaprağı katlama kırışıklık deseni aşamaları (URL-23).



Şekil 3.23. Kabak katlama kırışıklık deseni aşamaları (URL-24).

3.4.6. Kıvrımlı Katlama (Crimp Fold)

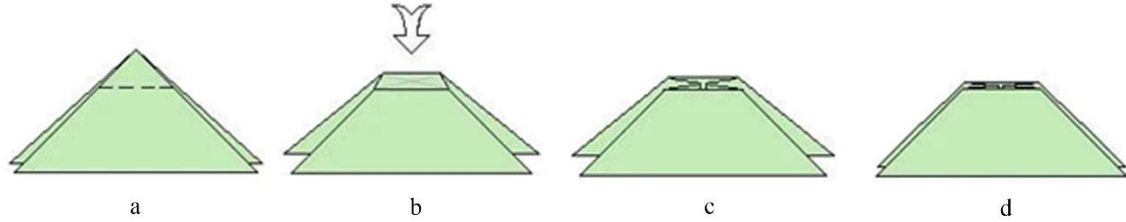
Bir seferde yapılan iki ters kıvrımdan oluşmaktadır (Şekil 3.24). Kıvrımların paralel kırışıklık çizgilerine sahip olması gerekmemektedir.



Şekil 3.24 Kıvrımlı katlama kırışıklık deseni aşamaları (URL-25).

3.4.7. Açık Çöküntü Katlama (Open Sink Fold)

İleri katlama tekniği olsa da çok sık kullanılmaktadır. Açık çöküntü kıvrımı, iki diyagonal vadi kıvrımından ve kare şeklinde bir dağ kıvrımının içinde bir yatay dağ kıvrımından oluşmaktadır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Kıvrımlı katlama kırışıklık deseni aşamaları (URL-26).

3.5. Origamiden Esinlenen Duyarlı Cephe Örnekleri

Çalışmanın origami ve form bulma sürecinin devamında yürütülecek uygulama aşaması için origamiden esinlenen duyarlı cephe örnekleri araştırıldı. Tablo 3.5.1’de bu çalışma için incelenen literatürden elde edilen origamiden esinlenen duyarlı cephelere ait bilgiler aşağıda verilen sınıflandırmalara ayrıldı. Bunlar: cephenin duyarlı sistem kaynağı, karakteristik elementi, detayı, modelleme araçları, hareket tipleri ve fonksiyonlarıdır. Ayrıca cephe görselleri de tabloda verildi. Fonksiyonlar kategorisinde gün ışığı performansı, parlama olasılığı, dış görüş memnuniyeti, güneş enerjisi kontrolü, cephede enerji üretimi ve enerji kazanımı özellikleri incelendi.

Matheou ve diğerleri’nin (2020), origami modelini şeklin genişlemesine, büzülmesine ve bükülmesine izin veren dinamik özellikleri nedeniyle kullandıkları görülmektedir. Çalışma, Rhino, Grasshopper, DIVA, ve Energy Plus entegrasyonuna sahiptir. Tasarım, her biri membran ile doldurulmuş 8 origami üçgeninden oluşan birimleri tutan bir alüminyum çerçeve yapısından oluşmaktadır. Ünitelerin açık alanları havanın iç mekâna girip çıkmasına izin vermektedir. Ünitenin dönüşümü, kasnakların yönlendirme

sisteminden geçen ve ünitenin üst ve alt kenarlarına sabitlenmiş ikincil bir sürekli kablo sistemi ile gerçekleştirilmektedir. Kabloları çekerek veya serbest bırakarak ünite farklı ara konfigürasyonlara dönüşmeyi başarmaktadır. Temel tasarım konsepti, hafif tekstil yüzeyinin dönüştürülebilirliğine dayanmaktadır. Sekiz destek noktasında kenar kablolarının uzunluğunun kontrol edilmesiyle membran farklı şekillerde ayarlanarak ünitelerin farklı ara konfigürasyonlara dönüşmesi sağlanmaktadır. Mekanizma, güneş ışığının iç ortama gerektiği kadar nüfuz etmesi için genişleyerek yansıtılan alanda bir artış sağlamaktadır (Matheou ve diğ., 2020).

Mahmoud ve Elghazi'nin (2016) yaptıkları altıgen modüler desenlere sahip kinetik cephe çalışması gün ışığı ile performansının iyileştirilmesini amaçlamaktadır. Araştırma, Rhino, Grasshopper ve DIVA olmak üzere üç farklı dijital aracın bir entegrasyonunu sunmaktadır. Temel model olarak yan aydınlatmalı bir ofis alanı inşa edildiği görülmektedir. Kinetik deri, tamponlu iç tabaka ile birleştirilmiş bir gölgeleme perdesi olarak işlev gören çift cephe tipinde bir dış tabakadan oluşmaktadır. İstenilen performans sonuçlarına ulaşabilmek için altıgen birimlerin hareket türlerinin değiştirildiği görülmektedir. Dönme hareketinde altıgen birim, 15 derecelik bir adım boyutu ile 30 ila 165 derece arasında değişen merkez eksenini etrafında dönmektedir. Öteleme hareketinde, birim tamamen açılmak üzere merkezden merkeze hareket ederek diğerinin üzerinde kaymaktadır. Çalışma sonucuna göre dönme hareketi öteleme hareketinden daha iyi aydınlatılmış alanlar ve daha iyi aydınlatma seviyeleri sağladığı görülmektedir (Elghazi ve Mahmoud, 2016).

Tabadkani (2019)'nin, gün ışığı performansı ve parlama olasılığına ulaşmak için önerilen altıgen kaleidocycle² kabuğu, üçgen ve altıgen desenlerin bir karışımı olan tekrarlayan altı kaleidocycle halkasından oluşmaktadır. Temel konsept, üçgen modellerin istenmeyen gün ışığını kontrol etmek için merkezileştirilebildiği zamanlama eğrilerine dayalı eklem yer değiştirmeleridir. Çalışma, Rhino, Grasshopper, Honeybee, Radiance ve Daysim entegrasyonuna sahiptir. Her modül, tüm camlı cepheyi kaplamak ve yapısal performans sağlamak için ayrı geometrilere sahip, ilginç bir dönme hareketi oranı ve geometrik oranlar sağlama potansiyeline sahiptir. Dişli kutularının yapısal konumlandırması ve

² Üçgen ve altıgen desenlerin bir karışımı olan Kaleidocycle halkası, Köşeleri merkezde birleşen altı tetrahedradan oluşan esnek bir polihedrondur (Tabadkani, 2019).

zamanlama hareketi her bir geometrinin belirli bir coğrafi konumlandırma ve sisteme uygulanabildiği ayrı bir geometriye dönüşmektedir. Her bir yapısal halkanın içindeki yerleştirilebilir kabuk panellerin, her bir yapısal halkaya komut verebilecek şekilde tasarlandığı görülmektedir (Tabadkani, 2019). Aynı şekilde Wagdy ve diğ. (2020) de kaleidocycle kabuğunu gün ışığı alımını artırmak ve tüketilen toplam enerjiyi azaltmak için kullanmaktadır. Sonuçlar sistemin temel duruma kıyasla %23 enerji tasarrufu sağladığını göstermektedir (Wagdy ve diğ., 2020).

Cimmino ve diğ. (2016), Salerno Üniversitesi kampüsünde origamiden ilham alan model ile yenilenebilir enerjiyi entegre edebilen, yenilikçi bir bina cephesi tasarlamayı amaçlamaktadır³. Gerginlik (tensegrity) mimarisine sahip bir yelken gibi oluşturulan modüller bükülebilir, kompozit fotovoltaik modüller ile donatılmış katlanabilir eşkenar dörtgen modüllerden oluşmaktadır. Yapının modülü altı adet sıkıştırma elemanı çubuk, iki germe elemanı kablo ve beş düğümden oluşmaktadır. Hareket, bir yelkeni taklit edecek şekilde seçilen kabloların uzamaları kontrol edilerek gerçekleştirilmektedir. Temel modülün tasarımı düğüm koordinatlarını tanımlayan iki açısal boyut değişkenine bağlı olarak oluşturulmaktadır. Modüller geceleri katlanarak açılmakta gün ışığında ise kademeli olarak kapatılmaktadır. Seçilen kablolar esnetilerek veya gevşetilerek kontrol edilmektedir. Kablolar güneş panellerini güneşe doğru yönlendirmek ve /veya rüzgarla uyarılan birimlerin kablolarında depolanan gerilim enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren yenilikçi rüzgâr jeneratörleri oluşturmak için kullanılmaktadır (Cimmino ve diğ., 2016). Bu örneklerde görüldüğü gibi modüllerin bağımsız çalışması gerçekleştirilerek cephenin bütünün şekli değiştirilmeden gün ışığının içeri girmesine izin verilebilmektedir. Al-bahar Tower ve Kiefer Technic Showroom da bu yapılara örnek gösterilebilmektedir (Karanouh & Kerber, 2015; Rodonò ve diğ., 2020).

Pesenti ve diğ. (2015)'nin, origami modelinde şekil hafızalı alaşım (SMA) aktüatörlerinin deformasyonu, güney yönüne bakan bir ofis alanı için görsel konfor ve enerji verimliliği etkisini gösteren bir çalışma gerçekleştirdikleri görülmektedir. Çalışma, Rhino, Grasshopper, Honeybee ve Energy Plus entegrasyonuna sahiptir. Basitleştirilmiş desen, kasılma oranını ve malzemelerin iki katmanı için opaklığını değiştirerek yeniden üretilmektedir. Ron Resch origami desenine sahip gölgeleme cihazıyla %68 ve %5

³ Bu çalışmanın modelleme araçlarına ulaşamadı.

yansıtma dereceleri olan iki farklı malzeme ilişkilendirilmektedir. Bulgular, karışık kombinasyonlar ile tasarımın toplam yıllık enerjiyi düşürdüğünü göstermektedir (Pesenti ve diğ., 2015). Burada cephenin tamamen bir yüzey olarak tasarlandığı görülmektedir. Fakat bu şekilde bir cephe düzeni tüm durumlar için uygun bir çözüm olarak görülmemektedir.

Le-Thanh ve diğ. (2020)'nin yaptığı çalışmada, cephe yüzeyinin dışına çıkmadan cihazın açıklığını değiştirmek için origami tekniklerinin kullanılması amaçlanmaktadır. Çalışma Rhinoceros, Grasshopper, BCMO, DIVA ve Archsim entegrasyonuna sahiptir. Dönme hareketiyle birleştirilmiş pileli katlama tekniği uygulanan cephede, sekiz farklı durum için farklı yönlerde binanın gün ışığı performansı değerlendirilmektedir. Önerilen tasarımın etkinliğini doğrulamak için, temel durum (gölgeleme elemanı olmayan cephe), Tasarım A ve Tasarım B olmak üzere iki üçgen desen tabanlı kinetik gölgeleme cihazı arasında bir karşılaştırma yapılmaktadır. Tasarım A'daki paneller üçgenin kenarı olan eksen etrafında dönmektedir. Bir modüldeki her panel, malzeme kalınlığı dikkate alınarak 10°'den 80°'ye 2°'lik adımlarla diğer iki panelle bağımsız olarak dönmektedir. Tasarım B kinetik cihazı, Al-Bahar Tower cephesinin modüllerine benzer şekilde bir şemsiye gibi çalışmaktadır. Bu kinetik gölgeleme cihazları, cephedeki açıklığı ayarlamak için dağ ve vadi katlama tekniğini kullanmaktadır. Çalışma binanın enerji tüketimini azaltmak ve gün ışığı performansını iyileştirmek için genel bir güneş gölgeleme çözümü olarak hareket etmektedir (Le-Thanh ve diğ., 2020).

Sheikh ve Asghar'ın (2019), Oxalis kekik yaprağından ilham alan cephe çalışmasıyla aslında biyomimetik bir cephe çalışması yaptığı görülmektedir. Fakat yaprağın fiziksel üretimi ve katlama şekliyle origamiden ilham alan cephe çalışmaları arasında da değerlendirilebilmektedir. Çalışma Rhino, Ecotect ve Insight araçlarının entegrasyonuna sahiptir. Modüller güneş yolunu izleyerek açısını ve konumunu buna göre değiştirmektedirler. Önerilen cephedeki her gölgeleme modülü dört gölgeleme panelinden oluşmaktadır. Modüller, karmaşık bir menteşe sistemi, kılavuz rayları ve elektrik motorları sistemi ile mevcut binaya bağlı olarak çelik bir çerçeve yapısı üzerinde x ve y ekseninde hareket ettirilmektedir. Tüm sistem sensörler, kontrolör ve enerji kaynağından oluşan bir geri bildirim sistemi ile kontrol edilmektedir. Güneş yolunu izlemekte olan sensörler her modülde bulunmaktadır. Tüm sistem aktif bir kontrol sistemi

ile teftiş edilebilmekte ve ayrıca insan tarafından geçersiz kılınabilmektedir. Gölgeleme cihazı cephenin hem yatay hem de dikey eksenini boyunca katlanabilmektedir. Ancak her iki ekseninde aynı anda katlanamamaktadır. Tasarım, dış ortamın görünürliğini engellemeden gölgeleme sağlamaktadır. Sayısal sonuçlar, binanın mevcut enerji yükünün, tasarlanan cephenin güçlendirilmesi ile %32'ye kadar azaltılabileceğini göstermektedir (Sheikh ve Asghar, 2019).

2004 yılında Ernst Giselbrecht tarafından yapılan Biyokataliz Laboratuvarı Binası cephesi dar bir çelik ızgaranın genişliğine tekabül eden bir mesafeye monte edilmiş, tek tek açılıp kapanabilen panjurlara sahiptir⁴. Güney cephesi, iç mekânı parlamadan korumak ve gün ışığını kontrol etmek için delikli beyaz alüminyum levhalarla kaplandığı görülmektedir (Lomholt, 2016). Güney cephesi tamamen camlıdır ve katlanan levhalar sayesinde odaların dışarıdan görünmesi engellenmektedir. Delikli beyaz alüminyum levhadan üretilen bu kepenk elemanları altılı gruplar halinde birleştirilmektedir. Panjurlar, sürekli yeniden konumlandırma sürecinde hayati önem taşıyan özellikler olan açıklık ve hareketliliği temsil eden bireysel isteklere göre ayarlanabilmektedir (URL-27).

2004 yılında Henning Larsen Architects tarafından inşa edilen Henning Larsen's Üniversite binasının, değişken sıcaklık ve gün ışığına uyartılabilir olarak hareket eden dinamik bir cepheye sahip olduğu görülmektedir. Yapı cephesinde uygulanan bu sıcaklık ve gün ışığına duyarlı olan sistem ile iç mekânda en uygun gün ışığını ve iç mekân kullanıcı konforunu yakalamak hedeflemektedir⁵ (Nady, 2017; URL-28). Cepheye uygulanan güneş kırıcı olarak nitelendirilebilecek delikli çelik panjurlardan 1600 adet bulunmaktadır. Panjurların delikli olarak tasarlanması, içeri alınmak istenen ışık miktarı ile enerji arasındaki optimum dengenin korunmasını sağlarken, iç mekânda ışık oyunları ile dinamik bir etki oluşturmaktadır. Ayrıca panjurların bazılarının renkli olmasının tamamen mimari tasarım yönü düşünülerek uygulandığı bilinmektedir. Panjurlar yarı açık veya tamamen açık olduklarında cepheden çıkıntı yapmaktadırlar. Cephe strüktürü, yapıdan dışa doğru uzanan kısa uzantılar ile yapıya sabitlenmekte ve panjurlar dışarı doğru açılma hareketi gerçekleştirmektedir. Rüzgâr vb. iklimsel koşullar düşünüldüğünde cephe strüktürünün etkinliğinin deneysel olarak ispatlanması gerekmektedir. Teorik

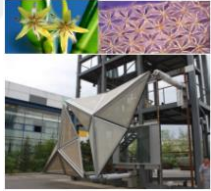
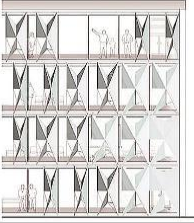
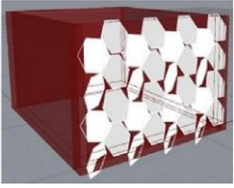
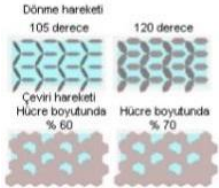
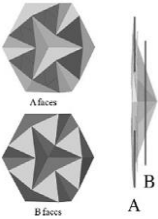
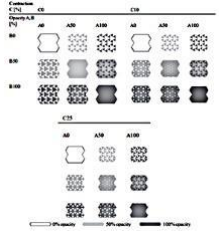
⁴ Bu çalışmanın modelleme araçlarına ulaşamadı.

⁵ Bu çalışmanın modelleme araçlarına ulaşamadı.

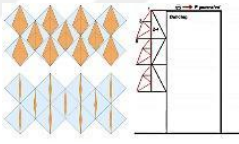
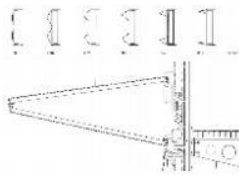
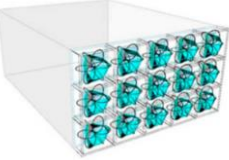
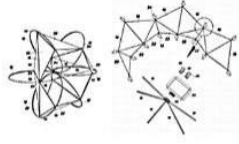
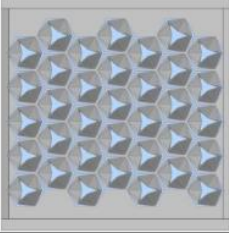
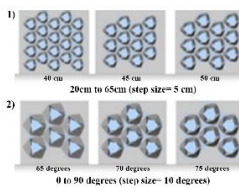
olarak, bağlantı elemanları ile yapıya entegre edilmiş bağımsız bir cephe sisteminin strüktürel etkinliğinin çok yüksek olmadığı söylenmektedir. Ancak, yapıdan dışarı yöne olan çıkıntının miktarı az olduğundan panjur sisteminin konsol etkisi yaratmadığı belirtilmektedir (Kızıлтаş, 2019). Bu çelik panjurlar, değişen gün ışığına uyarlanabilecek ve iç mekânda istenen ışık akışı miktarının sağlanması için hareket edebilecek şekilde yapı strüktürüne monte edilmektedir. Sistemde uyarlanabilir harekete imkân sağlayan ışık ve ısı seviyelerini sürekli olarak ölçen sensörler bu panjurlara monte edilmektedir. Ayrıca, panjur hareketi her panjur için küçük bir motor aracılığıyla mekanik olarak sağlanmaktadır (Nady, 2017; URL-28; URL-29). Panjurların güneşe uyarlanabilir hareketi, kapalı döngülü bir sistem olarak değerlendirilebilecek ısı ve ışığa duyarlı sensörler tarafından sağlanmaktadır. Ayarlanabilir yüksek hassasiyetli sensörler sayesinde panjurların güneş hareketine tepki oluşturma süresi daha kısa olup, uyarlama düzeyi olumlu etkilenmektedir (Kızıлтаş, 2019).

Origami tabanlı duyarlı cephe özelliklerine sahip olarak değerlendirilen 12 çalışmaya bakıldığında belirli bir biçim grubundaki elemanların çeşitli kombinasyonlarının belirlenmesine dayalı alternatif çözümlerin araştırıldığı görülmektedir. Çalışmaların bazıları doğrudan origami tabanlı olarak adlandırılmasa da cephe tasarımındaki modüllerin fiziksel hareketleri origaminin sağladığı yeteneklerle gerçekleştirilmektedir. Her bir çalışma için biçimlerin seçimi ve biçimler arası ilişkilerin geometrilerine göre belirlenmesi tasarım problemine, programına ve tasarımcının yorumuna göre belirlenmektedir. Çalışmalarda origaminin kullanılma sebebinin yoğun olarak şeklin genişlemesine, büzülmesine, bükülmesine izin veren dinamik özellikleri olduğu görülmektedir. Origamiden ilham alan tasarımlarda bir başlangıç biçimi, ondan türeyen veya diğer biçimlerle oluşan biçimler ve biçimlerin arasındaki ilişkileri tanımlayan kural setleri olduğu görülmektedir. Bu sistemler sonuç ürün çeşitliliğini artırmaktadır ve farklı farklı cephe modelleri üzerinde uygulanabilirlik sağlamaktadır. Biçimlere öteleme, döndürme, yansıtma, ölçekleme, ekleme, çıkarma gibi aritmetik biçim operasyonları uygulanabilmektedir. Biçimlerin birbirleri ile olan ilişkileri hem ikinci hem de üçüncü boyutta tanımlanabilmektedir.

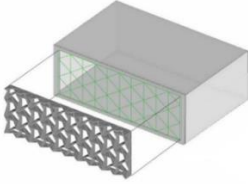
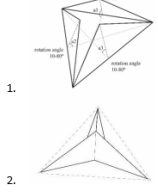
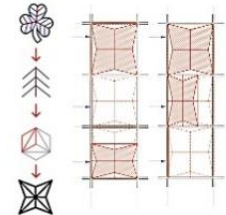
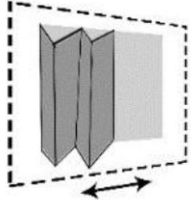
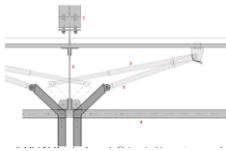
Tablo 3.1. Origami tabanlı cephelerin modelleme araçlarına, karakteristik unsurlarına, detayına, hareket çeşitlerine ve işlevlerine göre sınıflandırılması.

Kinetik Sistem Kaynağı	Karakteristik elementi	Detayı	Modelleme Araçları	Hareket tipi	Fonksiyonu					
					Gün Işığı	Parlama	Dış Görüş Memnuniyeti	Güneş Enerjisi Kontrolü	Cephede enerji üretimi	Enerji Kazanımı
Mangrove Çiçeği (Waseef ve Nashaat, 2017)			Rhinoceros Grasshopper	Katlama, Genişleme & Daralma	✓	✓	×	×	×	✓
Dikdörtgen Modül Deseni (Matheou ve diğ., 2020)			Rhinoceros Grasshopper Diva EnergyPlus	Döndürme, Kayma, Ölçek	✓	✓	×	×	×	×
Altıgen Modül Deseni (Elghazi ve Mahmoud, 2016).			Rhinoceros Grasshopper Diva	Çeviri, Döndürme, Kayma	✓	✓	×	×	×	×
Ron Resch Origami Deseni (Pesenti ve diğ., 2015)			Rhinoceros Grasshopper Honeybee EnergyPlus	Çeviri, Kapak, Katlama, Genişleme & Daralma	✓	✓	×	✓	×	✓

Tablo 3.1. (Devam) Origami tabanlı cephelerin modelleme araçlarına, karakteristik unsurlarına, detayına, hareket çeşitlerine ve işlevlerine göre sınıflandırılması.

Kinetik Sistem Kaynağı	Karakteristik elementi	Detayı	Modelleme Araçları	Hareket tipi	Fonksiyonu					
					Gün Işığı	Parlama	Dış Görüş Memnuniyeti	Güneş Enerjisi Kontrolü	Cephede enerji üretimi	Enerji Kazanımı
Eşkenar Dörtgen Origami deseni (Cimmino ve diğ., 2017)			-----	Katlama, Genişleme & Daralma	✓	✓	×	✓	✓	×
Dikey Katlanır Diikdörtgen Elemanlar (Waseef ve Nashaat, 2017)			-----	Dikey Katlama	✓	✓	×	✓	×	×
Altıgen Kaleidocycle (Tabadkani ve diğ., 2019)			Rhinoceros Grasshopper Honeybee	Döndürme, Kapak, Kayma, Genişleme & Daralma	✓	✓	×	×	×	×
Kaleidocycle (Wagdy ve diğ., 2020)			Rhinoceros Grasshopper Daysim, Radiance, EnergyPlus	Döndürme, Aynalama, Kayma	✓	✓	×	×	×	✓

Tablo 3.1. (Devam) Origami tabanlı cephelerin modelleme araçlarına, karakteristik unsurlarına, detayına, hareket çeşitlerine ve işlevlerine göre sınıflandırılması.

Kinetik Sistem Kaynağı	Karakteristik elementi	Detayı	Modelleme Araçları	Hareket tipi	Fonksiyonu					
					Gün Işığı	Parlama	Dış Görüş Memnuniyeti	Güneş Enerjisi Kontrolü	Cephede enerji üretimi	Enerji Kazanımı
Pilise Katlama Deseni (Le-Thanh ve diğ., 2020).			Rhinoceros Grasshopper BCMO Diva Archsim	Katlama	✓	✓	×	×	×	✓
Oxalis kekik yaprağı (Sheikh ve Asghar, 2019)			Rhino Ecotect Insight	Kapak, Döndürme	✓	✓	✓	×	×	×
Yatay Katlanır Dikdörtgen Modüller (Ernst Giselbrecht, 2004)			-----	Yatay Katlama	✓	✓	×	×	×	×
Üçgen desenli modül (Larsen Architects, 2004)			-----	Yatay Katlama	✓	✓	×	×	×	✓

4. DUYARLI CEPHENİN MODELLENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Metodoloji

Görsel (uygun iç mekân aydınlatma seviyeleri ve dış görüş memnuniyeti) ve termal konfor koşullarını sağlayabilmek için kullanıcı katılımları simülasyon ve analizlere dahil edildi. Farklı katlama desenleri kullanılarak tasarlanan cephe modülleri, tek seferde katlanabilen ve açılabilen kolay bir mekanizmaya sahip olması ve daha az enerji ile çalışması nedeniyle çalışmada tercih edildi.

Origami teknikleri ve kombinasyonları ile gerçekleştirilen form bulma süreci araştırmanın temelini oluşturmaktadır. Çalışmanın başında manuel katlama denemeleri ile cephe modül sistemi tasarımına başlandı. Bu denemelerin modüler kullanıma uygunluk, cephe sisteminde istenen durumları sağlama durumları incelendi ve katlama desenleri araştırılarak origami desenleri denendi. Sürecin devamında bu manuel denemeler dijital modele aktarıldı. Parametrik modelleme aracı Grasshopper ve Kangaroo eklentisi, origami tabanlı cephe modülünün dijital modelini oluşturmak için kullanıldı (Rhino, 2022; Food4rhino a, 2022). Origami tabanlı duyarlı cephe modülleri, tezin varsayım kısmında boyutları tanımlanan bir ofis alanının tüm cephesine gölgeleme elemanı olarak giydirildi.

Çalışmada, Kartal/İstanbul'un hava durumu dosyası verileri alınarak simülasyon metodolojisi gerçekleştirildi. Modelin iklim simülasyonu Ladybug ve Honeybee (Food4rhino b, 2022) eklentileri ile, gün ışığı analizi ise ClimateStudio eklentisi ile yapıldı (ClimateStudio, 2022). Eş zamanlı olarak, temel durum (üzerinde gölgeleme elemanı olmayan cephe) için ve önerilen 4 ORF modülü için analizler yapıldı. Görsel konforun sağlanması için dikkat edilmesi gereken ısı kazanımları ve görsel rahatsızlık (gün ışığı parlaması) gibi bazı hususlar bulunmaktadır (Hosseini et al., 2019a). Çalışma kapsamında görsel konforu değerlendirmek için simülasyonlarda Gün Işığı Özerkliği (DA), Gün Işığında Parlama Olasılığı (DGP), Faydalı Gün Işığı Aydınlatması (UDI), Faydalı Gün Işığı Aydınlatması Aşma Değeri (UDI Overlit) ölçümleri kullanılarak analizler gerçekleştirildi ve simülasyon sonuçları değerlendirildi.

4.2. Vaka Çalışması

Bina sakinlerinin tipik olarak pozisyonlarını serbestçe ayarlayamadığı ve oldukça katı görsel konfor gereksinimlerine sahip olduğu ofis tipi ortamlarda bina kaplaması, akıllı cephe yönlendirmeleri ve tasarımıyla parlama kontrolünün sağlanması gereklidir (Mahmoud ve Elghazi, 2016). Bu yüzden çalışmada aşağıda verilen plan şemasındaki ofis alanının (Şekil 4.1) tüm yıl boyunca sergilediği origamiye dayalı gölgeleme elemanlarının davranışları incelendi.

Çalışma, origami tabanlı duyarlı cephe tasarımında gün ışığı etkisini araştırmak için üç aşamada gerçekleştirildi. İlk aşamada, hareketi küresel ölçekte anlamayı sağlayan farklı basit katlama konfigürasyonlarını karşılaştırmak için kâğıt maketler aracılığıyla origami geometrilerinin kinetik davranışı araştırıldı. İkinci aşamada, kinematiğin formunu etkileyen parametrelerin değişimi yoluyla duyarlı origami modülünü modellemek için parametrik modelleme araçları kullanıldı. Üçüncü aşamada, parametrik simülasyon kullanarak duyarlı origami hücrel cephelerinin gün ışığı ve termal performansı değerlendirildi.

4.3. Simülasyon Modeli

Çalışma kapsamında referans bir ofis odası ve ORF tiplerinin bütün detayları Rhino ve Grasshopperda modellenerek, Ladybug, Honeybee ve Climate Studio eklentileriyle görsel ve termal performans analizi gerçekleştirildi. Modellemeye esas teşkil eden konum ve iklim özellikleri, boyutsal ve geometrik özellikler, iç mekân özellikleri, kullanıcı konumlarının belirlenmesine ilişkin özellikler, ORF tiplerine ilişkin özellikler ve simülasyon girdilerine ilişkin bilgiler ve kabuller ayrıntılı olarak aşağıda anlatılmaktadır. Dijital modellemede çevre, bina, kullanıcı ile ilgili gerekli parametreler LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) standartlarına göre tanımlandı. LEED Sertifikası, enerji verimli, yüksek performanslı, çevre dostu ve sürdürülebilir yeşil binaların tasarımı, inşası ve işletmesi için dünya çapında kullanılan bina derecelendirme sistemi olduğu için tercih edilmiştir. Konum ve ulaşım, su verimliliği, enerji ve atmosfer, malzeme ve kaynaklar, iç mekân kalitesi başlıklarında performansa dayalı önkoşullar sunulmaktadır.

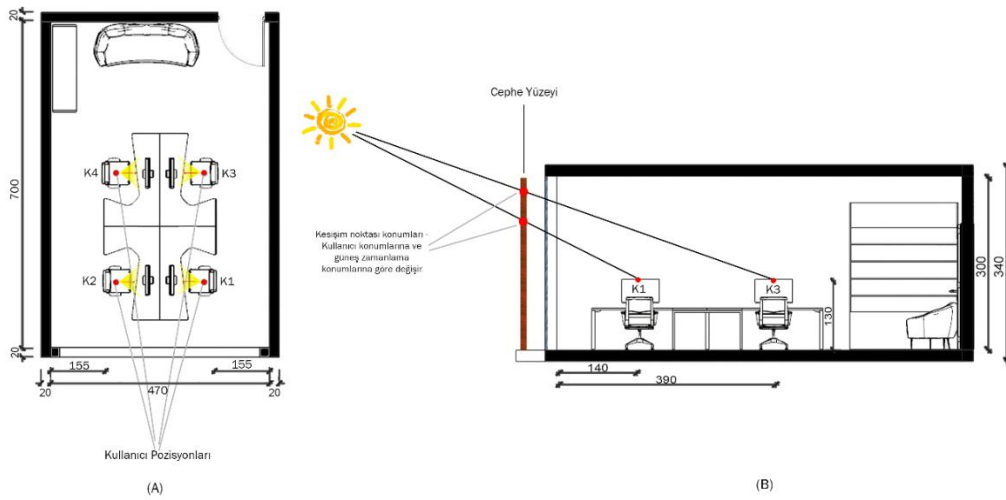
4.3.1. Boyutsal ve Geometrik Özellikler

Temel model olarak, orta büyüklükte bir ofis alanı (zemin dışında herhangi bir kentsel bağlam olmaksızın) oluşturuldu. Ofisin zemin katta yer aldığı var sayıldı (Şekil 4.1-A). Bu ofisin alanı 38 m², genişliği 4.7 m ve derinliği 7 m olacak şekilde düşünüldü. Odanın zeminden tavana kadar olan yüksekliği ise, 3 m olarak belirlendi (Şekil 4.1-B). Ayrıca pencere güney cephede ve %85'i cam olacak şekilde yer almaktadır. Yapı elemanları duvarlar, tavan ve zemin için 0,2 m kalınlıkta modellendi. Cephe konfigürasyonları değişse de alan boyutları çalışma boyunca aynı kalmaktadır. Araştırma sınırları Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Araştırma sınırları.

Sınırlamalar	Değerler
Ofis odası için önerilen boyutlar	38 m ² (4.7 m*7 m*3 m)
Doğu, batı ve kuzey cephelerde pencere- duvar oranı	Sıfır
Güney cephede pencere- duvar oranı	%85
Birimlerin bina cephe yüzeyine dağılımı	Tüm kapalı alanda normal dağılım
Birim boyutları	50 cm *50 cm
Birim sayısı	Her sütun için 6 Her satır için 10 olarak sabitlenmiştir.

Çalışmada kullanıcı konumları ve etkileşimleri de dikkate alındığı için çalışma alanında kullanıcıların konumları ve bakış yönleri Şekil 4.1-A ve B'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Referans odaya ait; (A) Kısmi plan, (B) Kesit.

4.3.2. Konum ve İklim Özellikleri

Ofisin konumu Energyplus'ta ulaşılabilir olan Marmara bölgesinde bulunan İstanbul/Kartal/Türkiye kabul edilmiştir. Meteorolojik veriler İstanbul'da yazların sıcak ve az yağışlı, kışların kısmen ılık ve yağışlı olduğunu göstermektedir. Şekil 4.2'de Türkiye'ye ait iklim haritası verildi. İstanbul ılıman iklime sahip en büyük iklim bölgesidir. Ayrıca en kalabalık ve enerji talebi açısından kritik bölgedir. İstanbul, ılıman kuru iklim kuşağına sahiptir. Şehrin kendisi, büyüklüğü ve kuzey ve güneyden iki kıyı şeridi nedeniyle çok çeşitli bir topoğrafyaya sahiptir, bu da çoklu mikro iklimler oluşturmaktadır. Ancak kentin güneyindeki yerleşim alanlarındaki iklim, ılıman nemli olarak tanımlanmaktadır. Türkiye Devlet Meteoroloji Servisi'ne göre, yaz aylarında İstanbul'da ortalama sıcaklık 14,4°C ve yüksek sıcaklıklar ortalama 29°C civarındadır, Temmuz ortalama 23,3°C ile en sıcak aydır. Ocak, ortalama 5,6°C sıcaklık ve ortalama 1-4°C düşük sıcaklık ile kışın en soğuk ayıdır. Yıllık ortalama yağış miktarı 130 gündür ve bu da yılda 810 milimetredir (Muhammedova, 2019). İstanbul'a ait iklim verileri Tablo 4.2'de verilmiştir. İstanbul için iklimsel veriler için, iklimsel veri tanımlamasında Energy Plus tabanlı ve 'epw.' dosya uzantılı 'TUR_Istanbul.170600_IWEC' dosyası kullanıldı (URL -30). Bina yönü doğrudan güneş ışığına maruz kalmaya izin vermek için güney yönüne bakmaktadır. Bu kriterler, kinetik sistemin hem ısıtma hem de soğutmaya fayda sağlayacak şekilde yeterli çeşitliliğe sahip olduğunu belirlemeye yardımcı olacaktır.



Şekil 4.2. Türkiye İklim bölgesi haritası (Muhammedova, 2019).

Çevre binalar ile örnek bina arasındaki mesafenin uzak olduğu varsayılarak modelleme yapıldı. Simülasyon önce temel durum daha sonra önerilen ORF modülleri için gerçekleştirildi. Leed v4.1’de kodlanmış ölçümler dikkate alınarak 21 Mart, 21 Haziran, 21 Aralık tarihlerini içeren gündönümü ve ekinoks günlerinde, 09.00, 12.00 ve 15.00 saatlerinde simüle edildi. Kamaşma için en kötü durum senaryosu olan ‘ClearSkyWithSun’ yani açık gökyüzü tipi seçildi.

Tablo 4.2. İstanbul’a ait iklim verileri (ClimateStudio, 2022).

İklim Bölgesi	
Koeppen iklim Bölgesi:	Ilıman, Kuru Sıcak Yaz (Csa)
ASHRAE iklim bölgesi:	Sıcak (3)
İklim bölgesi (TS825):	2.bölge
Ortalama yıllık sıcaklık:	16 °C
Yıllık toplam güneş radyasyonu:	1.615 kWh/m ²
Isıtma Tasarım Koşulları	
En soğuk ay:	Ocak
En soğuk hafta:	1/ 6-1/12
Tipik kış haftası:	2/10-2/16
Soğutma Tasarım Koşulları	
En sıcak ay:	Ağustos
En sıcak hafta:	8/10-8/16
Tipik yaz haftası:	7/20-7/26

4.3.3. İç Mekân Özellikleri

Tüm analizlere ve Leed v4.1’deki kriterlere uygun olarak modellenen yüzeylere ClimateStudio da bulunan hazır materyaller atandı. Duvar %50 yansıtma, tavan %80 yansıtma, zemin %20, cam %67,4 ve gölgeleme elemanı %92 yansıtma olmak üzere malzemeler atanmış ve değerler analiz boyunca sabit tutuldu. Gün ışığı performans

simülasyonunu incelemek için temel unsurlar Tablo 4.3'te verildi. Bu belirlenen standartlar dahilinde gölgeleme elemanları cepheden 0,03 m dışarıya yerleştirildi.

Tablo 4.3. Ortak malzeme yüzeylerinin optik özellikleri.

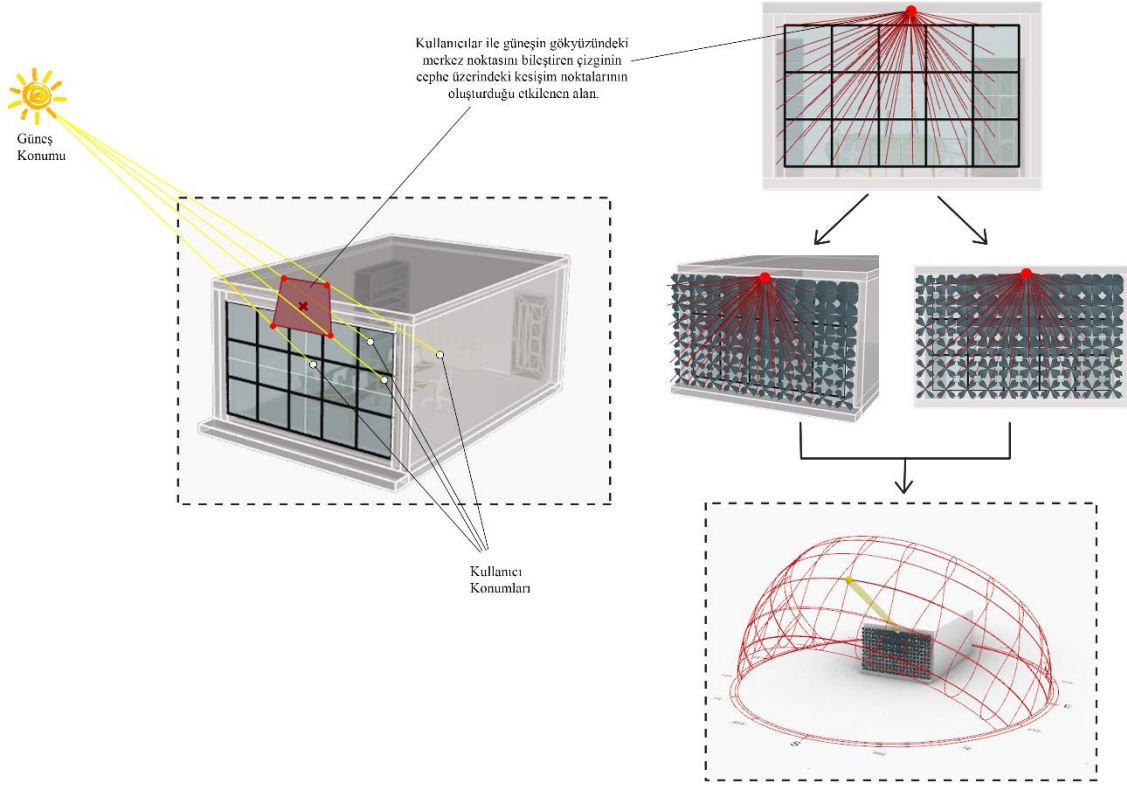
Yüzey	Özellik	Değer
Duvarlar	Yansıtıcılık miktarı	%50
Tavan	Yansıtıcılık miktarı	%80
Zemin	Yansıtıcılık miktarı	%20
Çift katmanlı cam	SHGC	0.703
	U- değeri	2.69 W/m ² K
	T-vis	0.774
Gölgeleme elemanı	Yansıtıcılık miktarı	%92
	Malzeme	Ince metal

4.3.4. Kullanıcı Konumları

Bu çalışmada gün ışığı ve güneş ışıınının değerlendirilmesi, kullanıcının mekandaki konumuna ve güneşin gökyüzündeki konumuna dayanmaktadır ve varsayımsal değerlendirme yüzeyinin yerden 0,85 m yüksekte olduğu varsayılmaktadır (Leed v4.1'de kodlanmış ölçümler dikkate alınarak karar verildi). Değerlendirme yüzeyini tanımlamak için ilk olarak, bina kullanıcıların tam konumu varsayımsal bir merkez noktasından x,y ve z parametreleri aracılığıyla tanımlanmalıdır. Çalışmada değerlendirilecek olan ofis alanı içinde bulunduğu varsayılan 4 kullanıcının konumu belirlendi (Şekil 4.1-A). Konumlar z-yönünde görüş açıları hesaba katılarak 1,30 m hareket ettirildi. Bu araştırmada günışığı parlama olasılığı, mekânda konumları sabit olarak belirlenen 4 kullanıcı için eş zamanlı olarak hesaplandı (Şekil 4.3). Kullanıcı konumlarının teker teker simülasyona dahil edilmemesinin sebebi 21 Mart, 21 Haziran ve 21 Aralık olarak belirlenen tarihlerde ve 09.00, 12.00 ve 15.00 olarak belirlenen saatlerde optimum cephe konfigürasyonunu ofis odasında çalışan tüm kullanıcılar için sağlama amacıdır.

Güneşin gökyüzündeki merkez noktasından başlayan, mekandaki sabit konumlu kullanıcının 1,30 m'deki görüş açısında biten bir çizgi çizilmektedir. Bu işlem her bir kullanıcı için tekrarlandı. Belirlenen tüm kesişim noktalarının Grasshopper ortamında birleştirilmesiyle oluşan çerçevenin merkez noktası, cephe elemanlarının odanın diğer bölümlerinden farklı olarak değerlendirme yüzeyini etkilemesine izin vermektedir.

Herhangi bir gölgeleme cihazı olmayan temel durum ve bu makalede önerilen 4 farklı duyarlı cephe modülünün oluşturduğu cepheler karşılaştırılmak üzere görsel konfor miktarları simüle edildi.

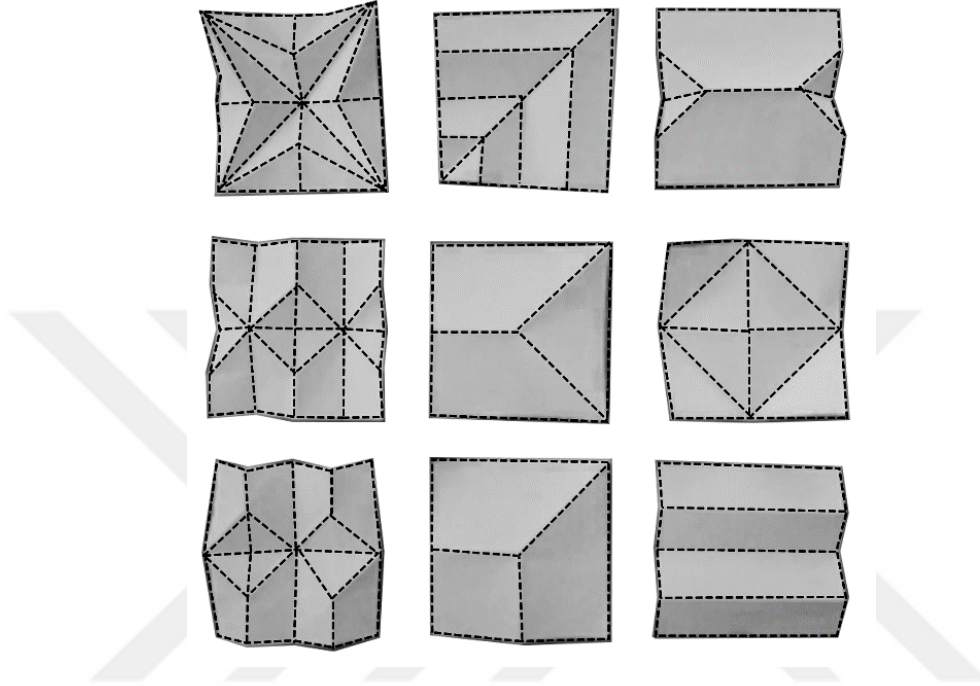


Şekil 4.3. Cephe elemanlarının değerlendirme yüzeyini etkilemesine izin veren etkilenen alanın oluşum diyagramı.

4.3.5. ORF Tiplerine İlişkin Özellikler

Yapılmak istenen kabuk tasarımı için uygun form arayışı manuel şekilde sürdürüldü. Bu form arayışlarına mevcut örnekler ve araştırmalar yön verdi. Buna bağlı olarak Şekil 4.'te görüldüğü gibi yüzey hareketini görselleştirmek için kâğıt maketler aracılığıyla katlanmış modüller oluşturuldu. Tez çalışması için tasarlanan her bir kare modül, kıvrımlı katlama tekniği ve kare modülün birleşiminden yani Miura-ori kıvrım modelinin uyarlanmış versiyonundan oluşan desenlerin kullanılmasından oluşmaktadır. Bu hem modüler kullanıma uygunluğu hem de kare modülün dönüştürülerek de kullanabilmeye elverişli olması sebebiyle çalışmanın devamı için uygun görüldü. Miura katlamasının açılıp kapanma potansiyelinin yüksek olması ve tamamen aynı birimlerden oluşması bu modelin olumlu yönlerindendir. Pek çok tipte mozaik ve geometrik desen, düzenli olarak bir matris halinde düzenlenmiş üçgenler, kareler veya altıgenlerle tanımlanabilmektedir

(Pesenti ve diğ., 2015). Origamide kullanılan en doğal kâğıt şekli bir karedir. Bir kareyi başka bir şekle dönüştürmek, katlanmış bir formu daha orijinal bir şeye dönüştürmeye yaramaktadır (Jackson, 2013). Ofis alanının cephesinin de dikdörtgen bir yüzey olması sebebiyle çalışmada kare katlama desenleri üzerine araştırmalar yapılmaya devam edildi.



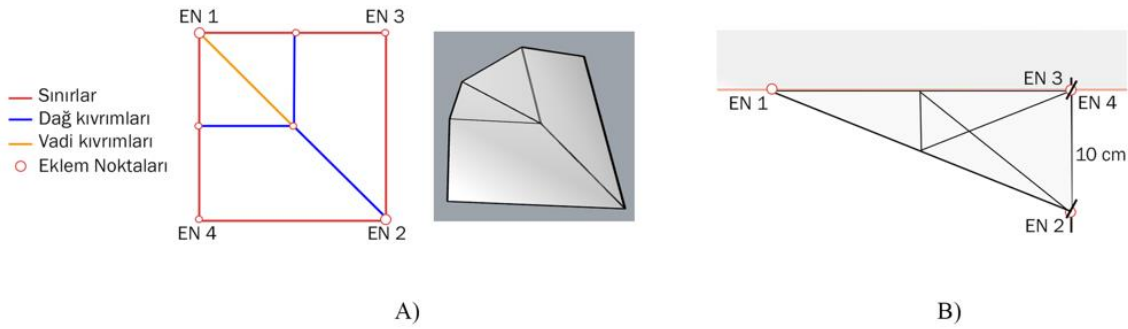
Şekil 4.4. Katlanmış kâğıt maket incelemeleri.

Tez kapsamında gerçekleştirilmesi amaçlanan dış görüş memnuniyetini engellemeden görsel ve termal konforu sağlayabilmek için gölgeleme elemanı alternatiflerinin modül kıvrımlarının 2 boyutta değil 3 boyutta düzenlenmesi planlandı. Bunun için modül geometrilerinin kıvrımlarının temel kavramı, kıvrım modelinde gösterilen EN 1 noktasının EN 2 noktasına göre 10 cm dışarda olacak şekilde konumlandırılması ile oluşturuldu. EN 3 ve EN 4 noktaları ise EN 1 ile aynı düzlemde konumlandırıldı (Şekil 4.5-b,4.6-b,4.7-b,4.8-b). Çalışma kapsamında 4 modül alternatifi oluşturuldu. Bu dört modülün seçilmesinin sebebi temel katlama teknikleriyle oluşturulan bir modül geometrisinin duyarlı bir cephe çalışmasında daha fazla görünürlüğü sağlayıp sağlayamayacağını görmektir. Dört modülde de kinetik origami desenlerinin kıvrımlarının temel kavramı, gün ışığı düzeylerini kontrol etmek için bir karenin dört hücreye bölünerek açıklık görevi görecek şekilde farklı yönlerde katlanmasından oluşmaktadır. Bu kare yüzeyler merkez noktalarından birbirlerine bağlıdır. Birimlerin

yatay ve dikey dönüşü aslında en basit katlama biçimi olan kanatlara benzer davranmaktadır.

4.3.5.1. ORF-1 Modül Özellikleri

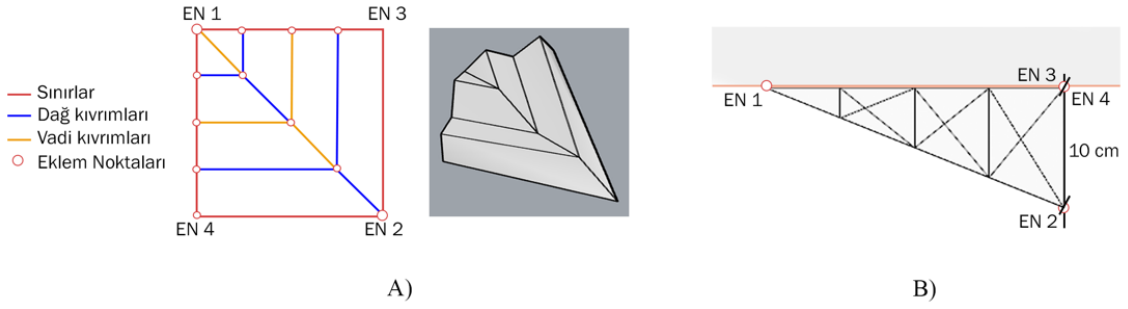
ORF -1 modülü Paul Jackson'ın 'Folding Techniques For Designers' adlı kitabındaki temel bir kare desenden esinlendi (Şekil 4.5-A) (Jackson, 2011). Desen kıvrımlı katlama tekniğine sahiptir. Kıvrımlı katlama (Pleat folding) tekniği ise, bir düzlemi genişletmek ve küçültmek için parçaları cephe yüzeyinin dışına çıkmadan modülün açıklığını değiştirerek basit ve esnek çözümler sunmaktadır (Le-Tanh, 2021). Kitaptan alınan temel desen modülü 2 boyuttan 3 boyuta taşındı. Formu oluşturmak için desen olarak bölünmüş her bir kare, eşit uzunlukta zıt kenarlar ve 90°'lik açı oluşturacak şekilde köşegen çizgisinin orta noktası üzerinden 2 yüzeye ayrıldı. EN 2 EN 1'e göre 10 cm dışarıda bulunmaktadır. Modül deseninin plan görünümü, perspektif ve önden görünümü tüm katlama adımları için Şekil 4.9'da gösterildi.



Şekil 4.5. a) ORF-1 modül deseninin dağ ve vadi kıvrımları, b) ORF-1 modül deseni plan düzleminden görünümü ve eklem noktalarının konumları.

4.3.5.2. ORF-2 Modül Özellikleri

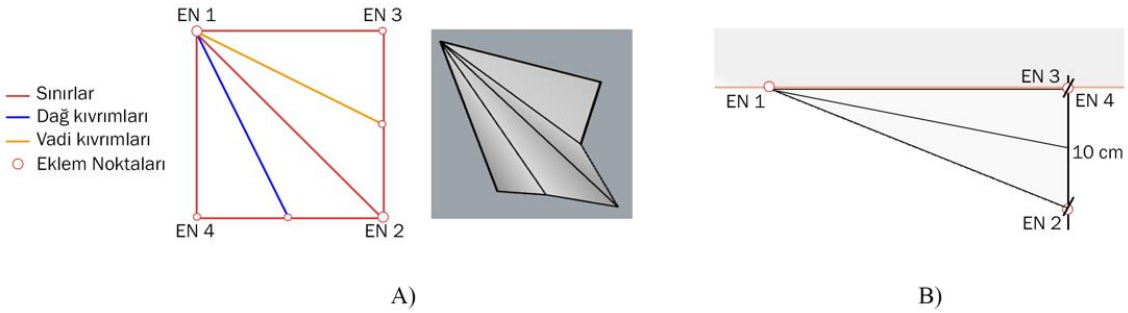
ORF-2 modülü Paul Jackson'ın 'Folding Techniques For Designers' adlı kitabındaki karmaşık bir kare desenden esinlendi (Şekil 4.6) (Jackson, 2011). Desen kıvrımlı katlama tekniğine sahiptir. Formu oluşturmak için desen olarak bölünmüş her bir kare, eşit uzunlukta zıt kenarlar ve 90°'lik açı oluşturacak şekilde köşegen çizgisi üzerinden 4 yüzeye ayrıldı. Modül deseninin plan görünümü, perspektif ve önden görünümü tüm katlama adımları için Şekil 4.9'da gösterildi.



Şekil 4.6. a) ORF-2 modül deseninin dağ ve vadi kıvrımları, b) ORF-2 modül deseni plan düzleminden görünümü ve eklem noktalarının konumları.

4.3.5.3. ORF-3 Modül Özellikleri

ORF-3 modülü yazar tarafından oluşturuldu (Şekil 4.7). Ön görünüşte daha çok katlanmanın gerçekleşmesi için form geometrisinde önce bir köşegen çizgisi belirlendi. EN 1 noktasından diğer kenarların orta noktalarına kıvrımlar çizilerek biri dağ kıvrımı diğeri vadi kıvrımı olarak belirlendi ve bu şekilde katlama gerçekleşirken modülün yarısının öne doğru yarısının arkaya doğru kıvrılması sağlandı. Modül deseninin plan görünümü, perspektif ve önden görünümü tüm katlama adımları için Şekil 4.10'da gösterildi.

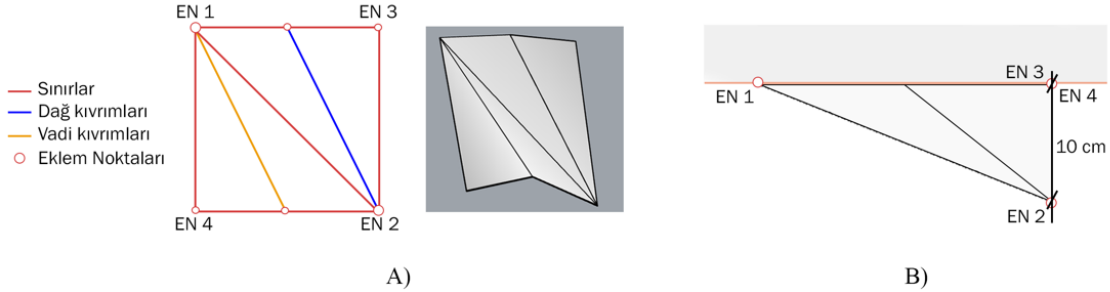


Şekil 4.7. A) ORF-3 modül deseninin dağ ve vadi kıvrımları, B) ORF-3 modül deseni plan düzleminden görünümü ve eklem noktalarının konumları.

4.3.5.4. ORF-4 Modül Özellikleri

ORF-4 modülü yazar tarafından oluşturuldu (Şekil 4.8). Form geometrisinde EN 1 ve EN 2 noktası arasında önce bir köşegen çizgisi belirlendi. Daha sonra EN 1 noktasından EN 4 ve EN 2 noktalarının birleştirdiği kenarın orta noktasına ulaşan bir vadi kıvrımı oluşturuldu. Aynı şekilde EN 2 noktasından EN 1 ve EN 3 noktalarının birleştirdiği kenarın orta noktasına ulaşan bir dağ kıvrımı oluşturuldu. Bu şekilde katlama gerçekleşirken ORF 3'teki gibi modülün bir kısmının öne doğru bir kısmının arkaya

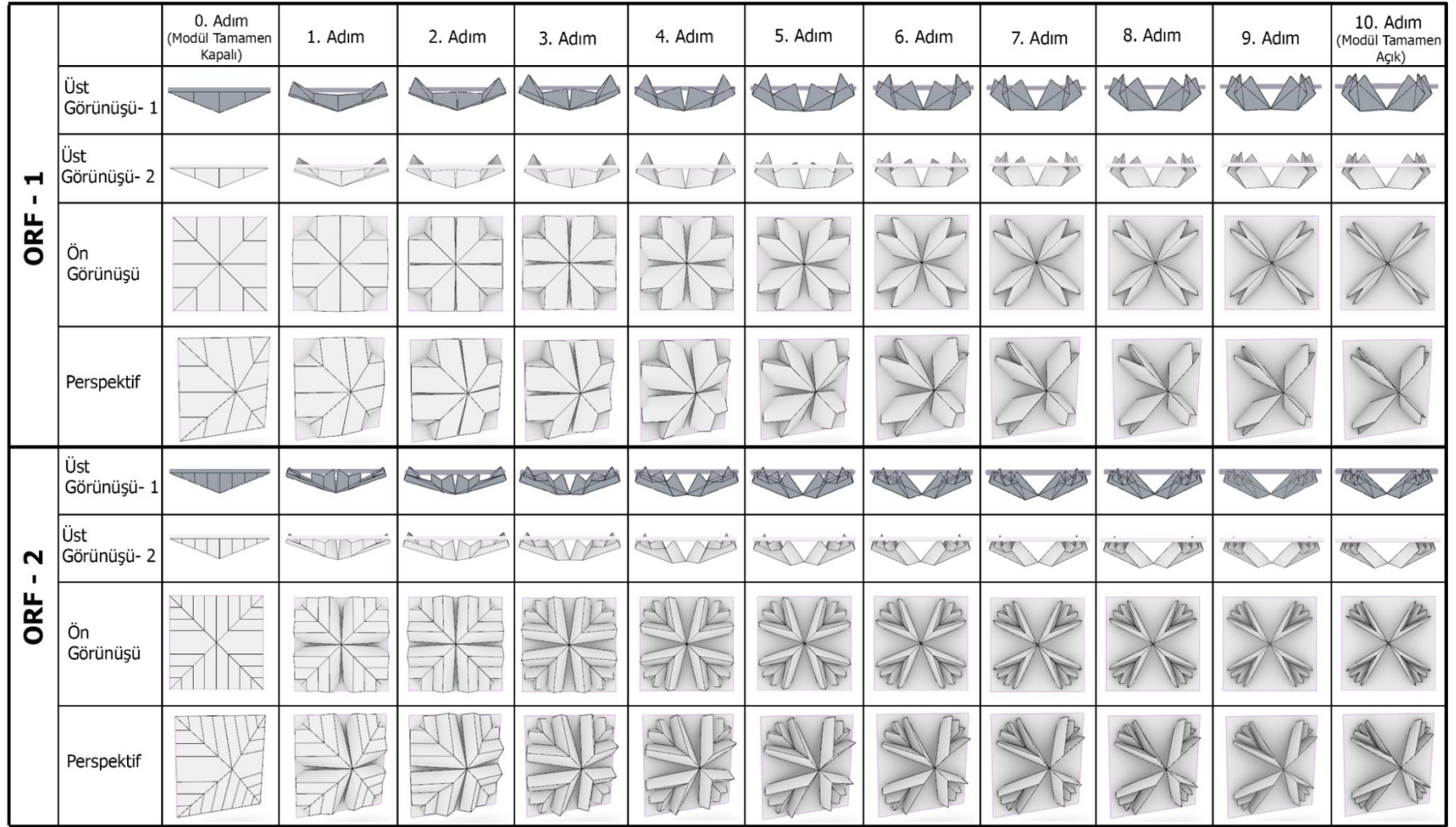
doğru kıvrılması sağlandı. ORF 4 modülünün ORF 3'ten farkı katlanan yüzeylerin oranlarıdır. Modül deseninin planı görünümü, perspektif ve önden görünümü tüm katlama adımları için Şekil 4.10'da gösterildi.



Şekil 4.8. A) ORF-4 modül deseninin dağ ve vadi kıvrımları, B) ORF-4 modül deseni plan düzleminden görünümü ve eklem noktalarının konumları.

4.4. Cephe Modüllerinin Dijital Üretimi

Önerilen cephe modülleri, araştırma için Rhino'da bir komut dosyası oluşturularak dijital olarak modellendi. Öncelikle Rhino üzerinde modül geometrileri oluşturulup desen tanımına göre elemanlar ayrıştırıldı (Şekil 4.11). Origami yüzeyler, dağ kıvrımları, vadi kıvrımları ve eklem noktalarından oluştuğu için temel olarak ilk yapılacak olan bu elemanları belirlemektir. Daha sonra oluşturulan bu kıvrım desenleri Grasshopper ara yüzüne aktarıldı. Geometrik parametreler Grasshopper ile ayarlanırken, origaminin kinetik hareketi Kangaroo eklentisi aracılığıyla modele aktarıldı. Modül oluşumunun Grasshopper senaryosu Şekil 4.12'de verildi. Kangaroo doğrudan Grasshopper içinde bulunan, etkileşimli simülasyon, form bulma, optimizasyon ve kısıtlama çözme motorudur. Herhangi bir simülasyon çalışırken modelle canlı etkileşime izin vermektedir (Food4rhino- a., 2022). Rhino arayüzünde oluşturulan modüllerin kılavuz çizgileri öncelikle Rhino arayüzünde tanımlandı. Daha sonra bu kılavuz çizgiler Grasshopper'a aktarıldı ve modüllerin katlama hareketleri Kangaroo eklentisiyle cephenin her bir elemanı için tamamen kapalı ve tamamen açık olmak üzere 10 adımda gerçekleştirildi (Şekil 4.13-1.Adım). Kılavuz çizgileri sabit bir nokta etrafında çoğaltılarak tek bir kanat



Şekil 4.9. Tüm adımlarda ORF-1 ve 2 modül desenlerinin planı (üstten görünümü), perspektif ve önden görünümü.

ORF - 3		0. Adım (Modül Tamamen Kapalı)	1. Adım	2. Adım	3. Adım	4. Adım	5. Adım	6. Adım	7. Adım	8. Adım	9. Adım	10. Adım (Modül Tamamen Açık)
	Üst Görünüşü- 1											
	Üst Görünüşü- 2											
	Ön Görünüşü											
	Perspektif											
ORF - 4	Üst Görünüşü- 1											
	Üst Görünüşü- 2											
	Ön Görünüşü											
	Perspektif											

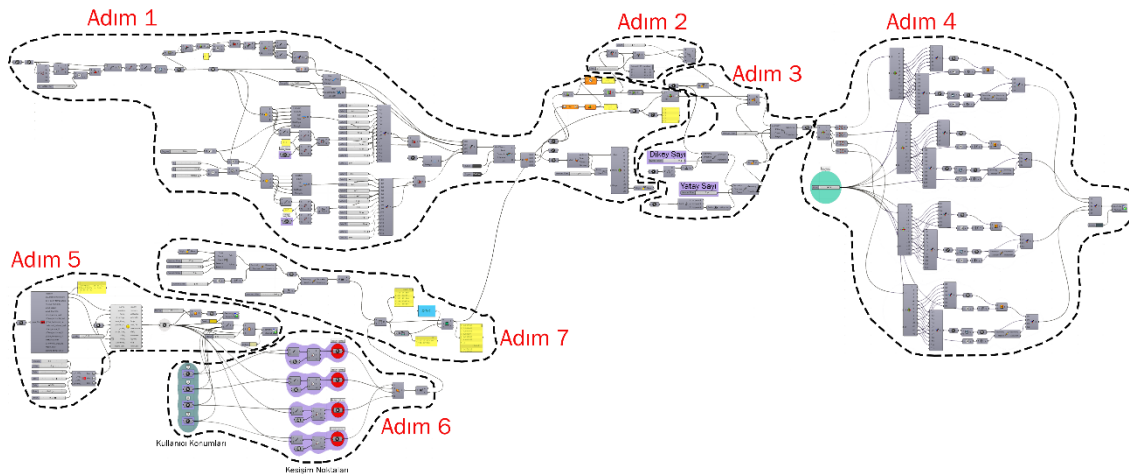
Şekil 4.10. Tüm adımlarda ORF-3 ve 4 modül desenlerinin planı (üstten görünümü), perspektif ve önden görünümü.

```

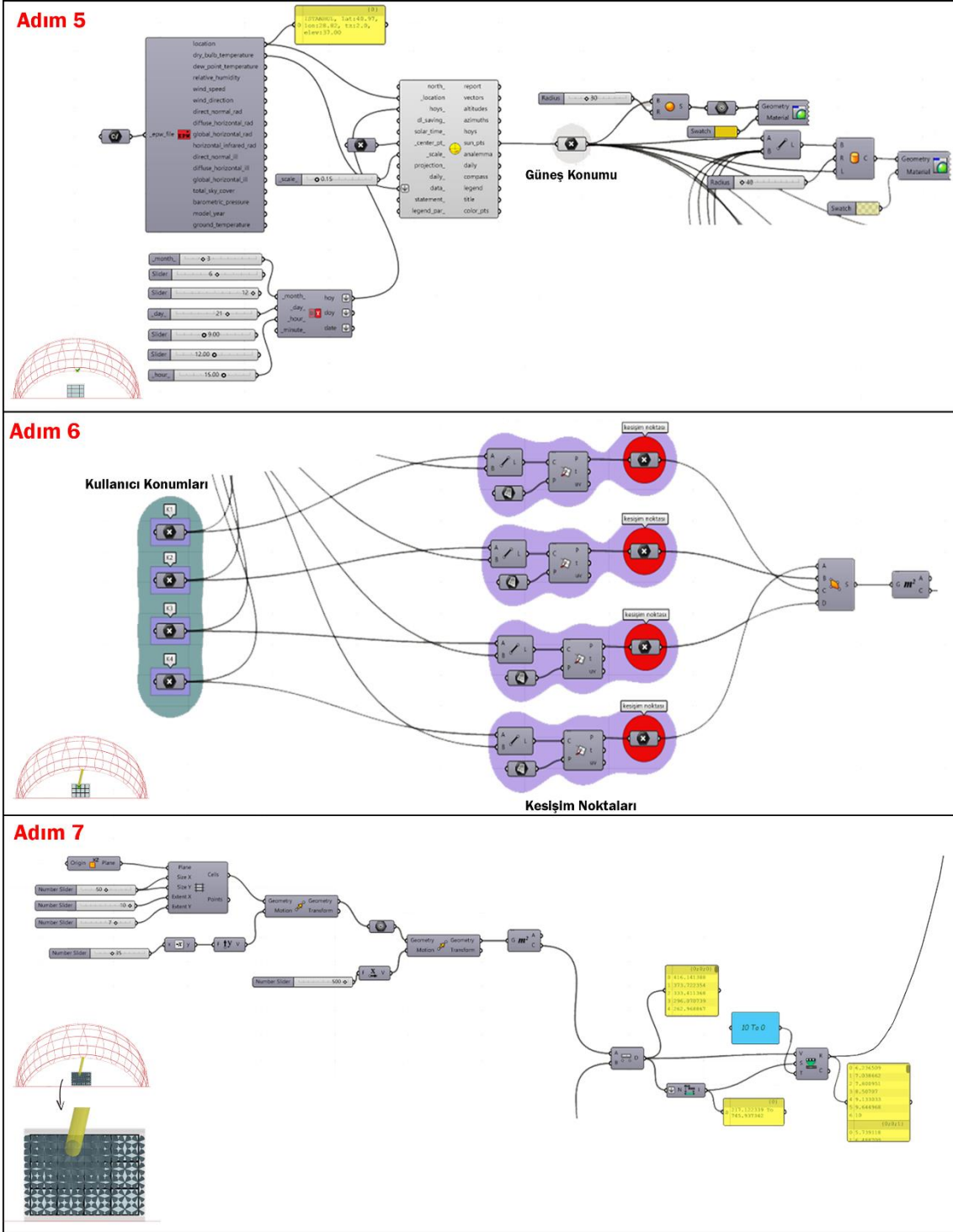
graph LR
    A["MODÜL GEOMETRİSİ  
kırıkklık desenini oluşturan  
tüm katlama çizgileri ve  
yüzeyin oluşturulması"] --> B["ELEMANLARIN AYRILMASI  
kırıkklık desenini oluşturan  
tüm elemanların  
seçiminin sağlanması"]
    B --> C["SINIRLAR  
kırıkklık desenini  
oluşturan çizgiler"]
    B --> D["DAĞ KIVIRIMLARI  
dış doğru katlanan çizgiler"]
    B --> E["VADI KIVIRIMLARI  
oluk özelliği gösteren çizgiler"]
    B --> F["EKLEM NOKTALARI  
dağ ve vadi kıvrımlarının  
birleştiği noktalar"]
    C --> G["MESH  
kırıkklık desenini  
oluşturan çizgilerin tek  
bir ağda birleştirilmesi"]
    G --> H["DİJİTAL MODELE AKTARIM  
modül tipine ait kırıkklık  
desenlerinin ayrı ayrı dijital  
modele aktarılarak geometrinin  
dış kurvetler ile birleştirilmesi"]
  
```

The flowchart illustrates the process of digital model transfer. It begins with 'MODÜL GEOMETRİSİ' (Module Geometry), which involves creating the rib pattern and the surface. This leads to 'ELEMANLARIN AYRILMASI' (Separation of Elements), where the elements of the rib pattern are selected. From here, the process branches into five categories: 'SINIRLAR' (Boundaries), 'DAĞ KIVIRIMLARI' (Mountain Curves), 'VADI KIVIRIMLARI' (Valley Curves), and 'EKLEM NOKTALARI' (Joining Points). These categories are then processed into a 'MESH' (Mesh), which is the final step before 'DİJİTAL MODELE AKTARIM' (Digital Model Transfer), where the rib pattern is transferred to the digital model and combined with the external curves.

Şekil 4.11. Dijital model eylemlerinin şematik gösterimi.



Şekil 4.12. Kare modül cephe modeli oluşturma 7 ana adımı-Grasshopper senaryosu.



Şekil 4.13. (Devam) Grasshopper senaryosu adım detayları.

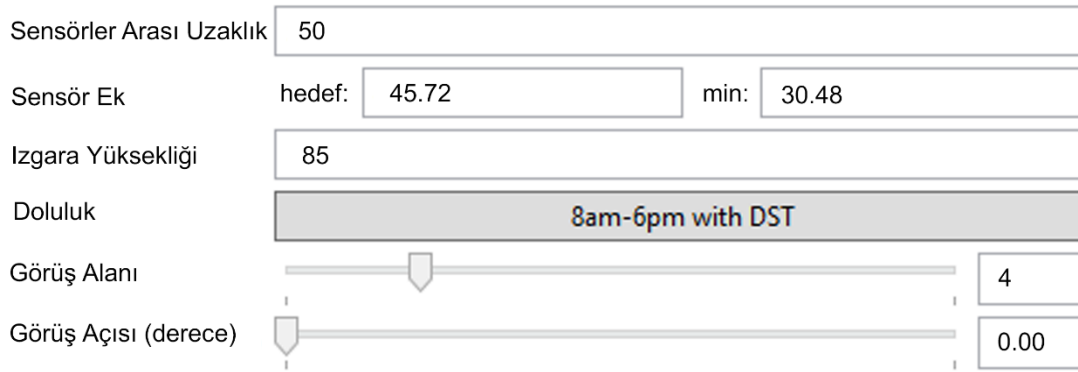
4.5. Değerlendirme Ölçütleri

4.5.1. Görsel Performans Değerlendirme Ölçütleri

Görsel performans analizi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk adımda bütün ORF tiplerinin aydınlık düzeylerine bakıldı. İkinci adımda iç ortamda oluşan kamaşma düzeyleri incelendi ve aydınlık dağılımlarına bakıldı.

Aydınlık düzeyi birim alana düşen ışık akısı olarak tanımlanmaktadır. Birimi lux'tur. Gözün görme yeteneği ile doğrudan ilişkili olan bu kavram iç mekanlarda görsel konfor koşullarının sağlanabilmesi için gerekli referans aralıklarında olmalıdır.

21 Mart, 21 Haziran ve 21 Aralık tarihlerinde 09.00, 12.00 ve 15.00 saatlerinde toplam 36 durum için İstanbul iklim koşullarında gün ışığı simülasyonları gerçekleştirildi. Simülasyon süresi de göz önünde bulundurularak daha iyi sonuç almak için analiz ızgarasını oluşturan noktalar arası uzaklık 0.50 m olarak alındı (Şekil 4.14). Günışığı simülasyonlarında zemin seviyesinden 85 cm yüksekliğe yerleştirilen 126 noktadan oluşan ızgara üzerindeki aydınlık düzeyleri hesaplandı.



The image shows the Climate Studio software interface with the following parameters set:

- Sensörler Arası Uzaklık: 50
- Sensör Ek: hedef: 45.72, min: 30.48
- Izgara Yüksekliği: 85
- Doluluk: 8am-6pm with DST
- Görüş Alanı: 4
- Görüş Açısı (derece): 0.00

Şekil 4.14. Climate Studio’da analiz ızgarasına ait değerlerin belirlenmesi.

Günışığı Simülasyonları Grasshopper ve ClimateStudio (Diva’nın yeni versiyonu) kullanılarak gerçekleştirildi. Cephe tasarımında görsel konfor konusu, tasarımcıların tasarım aşamasında dikkat etmesi gereken önemli noktalardan biridir. Görsel konforun değerlendirilmesi için parlama indeksi ve gün ışığı gibi parametreler değerlendirilmelidir. Parlama indeksi ve gün ışığını değerlendirmek için bazı parametreler Tablo 4.4’te verildi.

Tablo 4.4. Parlama indeksi ve gün ışığını değerlendirmek için bazı parametreler (Valitabar vd., 2018).

Parlama	Gün Işığı
Daylight Glare Index	Daylight Autonomy (DA)
Visual Comfort Probability (VCP)	Continuous Daylight Autonomy
British Glare Index (BGI)	Useful Daylight Illuminance (UDI)
Daylight Glare Probability (DGP)	Spatial Daylight Autonomy (SDA)
Simplified Discomfort Glare Probability (DGPs)	Annual Sunlight Exposure (ASE)
CIE Glare Index (CGI)	Daylight Factor (DF)
Unified Glare Rating (UGR)	Mean Illuminance (MI)
j-Index	Vertical Eye Illuminance (E_v)

Çalışma kapsamında günüışı tasarımı değerlendirme için aşağıda listelenen LEED v4.1 'de kodlanmış ölçümler kullanılarak analizler gerçekleştirildi.

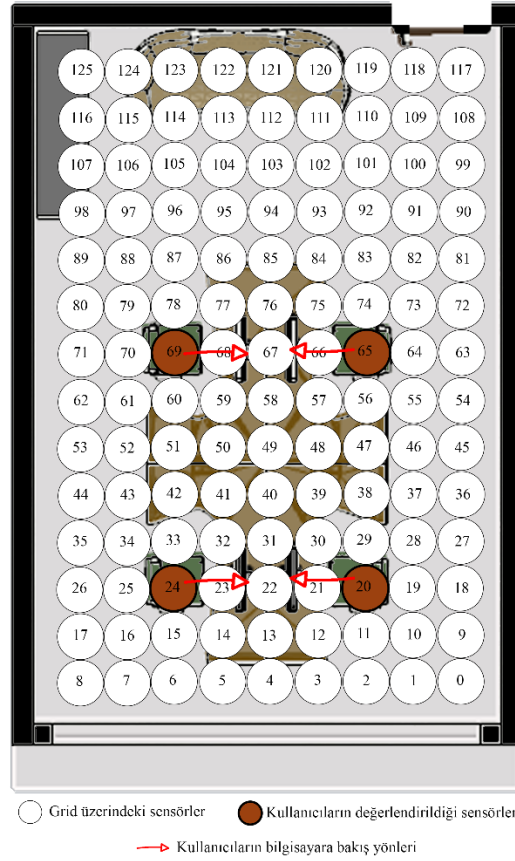
- Gün Işığı Özerkliği (DA),
- Gün Işığında Parlama Olasılığı (DGP),
- Faydalı Gün Işığı Aydınlatması (UDI),
- Faydalı Gün Işığı Aydınlatması Aşma Değeri (UDI Overlit).

Gün Işığı Özerkliği (DA), iklimle dayalı bir gün ışığı performansı metriğidir. Yani binanın konum ve cephe yönünü ekleyerek gün ışığı analizi yapmakta ve belirli bir alanın yıllık koşullarına göre gün ışığı performansını ölçmektedir. Mekansal Gün Işığı Özerkliği (sDA), bir alanın ne kadarının yeterli gün ışığı aldığını göstermektedir. Taban alanının en az %40'ı için (sDA 300 lux/yıllık işgal edilen saatlerin %50'si) e az 300 lux'luk değerlerin elde edilmesi gerekmektedir. sDA'nın parlaklık seviyelerinde üst sınırı yoktur, bu nedenle Yıllık Güneşe Maruz Kalma (ASE), ne kadar alanın çok fazla doğrudan güneş ışığı aldığını açıklamak için kullanılmaktadır. Yılda en az 250 dolu saat için en az 1000 lüks ve taban alanının %10'unu geçmemesi gereken taban alanı yüzdesini ölçmektedir (Mardaljevic de diğ., 2012). Bu yüzden amaç doğrudan güneşe maruz kalmaktan kurtulmak için ASE'nin etkisi en aza indirilirken sDA değerini maksimize etmektir.

Yararlı gün ışığı aydınlatma (UDI) ölçümlerine göre, gün ışığından kaynaklanan aydınlatma seviyeleri 3 aydınlatma aralığında sınıflandırılmaktadır (Carlucci ve diğ., 2015). Bunlar yetersiz gün ışığı aydınlatması (<300 lux) (FUDI), faydalı gün ışığı aydınlatması (300-3000 lux) (UDI) ve gerekli seviyeleri aşan gün ışığı aydınlatması (>3000 lux) (EUDI). Amaç faydalı gün ışığı aydınlatmasını korurken DA kriterlerini karşılamaktır.

Bu çalışmada bina kullanıcıları için kamaşma riskini tahmin etmek için Gün Işığında Parlama Olasılığı (DGP) indeksi kullanılmaktadır. DGP indeksi ilk kez Wienold ve Christoffersen tarafından 2006 yılında yayınlanan makalelerinde önerilmiştir. Bu yöntem, mekanlarda ölçülen aydınlık ve parıltı değerleri ile kullanıcıların mekanlardaki aydınlatma koşullarına olan tepkisi arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Günışığı için en doğrulanmış model olarak görülmektedir (Wienold ve Christoffersen, 2006). Kamaşma istenmeyen ışığın bakış doğrultusunda kalmasından kaynaklanan bir durum olup gözün dış etkenlere bağlı olarak geçici bir süre görme yeteneğini kaybetmesi olarak nitelendirilmektedir (Öner, 2019). Çevrede yer alan yüzeylerin parıltısının, çevredeki genel parıltı düzeyinden gözün alışık olmadığı derecede yüksek olması durumu olan kamaşma, görsel performansın ve görünürlüğün azalmasına sebep olmaktadır. Kamaşma özellikle gün boyu kullanılan ve görsel işlerin gerçekleştirilmesinin önemli olduğu, bilgisayar ekranına maruz kalmanın yoğun olduğu ofis gibi mekanlarda, kullanıcıların göz sağlığını olumsuz etkileyen, görsel işte verim düşmesi, dikkat dağınıklığı gibi unsurları beraberinde getiren bir problemdir.

DGP %0-34 algılanamaz, %34-38 algılanabilir, %38-45 rahatsız edici ve %45-100 dayanılmaz olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada simülasyon modelinin kat planında kullanıcıların konumları olarak belirtilen 4 farklı nokta için eş zamanlı olarak gün ışığı kamaşma olasılığı hesaplandı. İncelenen vakalarda günışığına bağlı kamaşma analizlerinin gerçekleştirilebilmesi hedefiyle pencereye en yakın masalardan sol ve sağ tarafta oturan iki kullanıcının ve pencereye daha uzak noktalarda oturan iki kullanıcının bilgisayar ekranına bakış doğrultuları dikkate alındı (Şekil 4.15). Kamaşma analizlerinin gerçeğe en yakın sonuçları verebilmesi için tefriş elemanlarının renk, doku ve malzeme özellikleri gözetilerek modelleme yapıldı.



Şekil 4.15. Referans odaya yerleştirilen ızgara, tefriş düzeni ve kullanıcıların bakış doğrultuları.

4.5.2. Enerji Performans Değerlendirme Ölçütleri

Simülasyonları gerçekleştirilen 4 adet ORF tipine ait enerji performansları (soğutma ve yükleri) saatlik olarak mekân düzeyinde, referans oda ile karşılaştırmalı olarak analiz edildi. Saatlik değerlendirmelerde yaz ayını temsilen en uzun gün olarak 21 Haziran günü seçildi ve soğutma yüklerindeki değişim analiz edildi. Kullanıcı ayarları hafta içi 8.00-16.00 ofis çalışma saatlerine göre yapıldı.

ORF tiplerinin performansı inceleneceği için cam sistemi U değeri $2.669 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, SGHC değeri 0.703, konstrüksiyonu 6 mm cam, 13 mm hava, 6 mm cam olan çift camdan oluşmaktadır (Tablo 4.3). Soğutma ayar noktası 26°C 'dir ve limit yoktur. Minimum ve maksimum bağıl nem sırasıyla %45 ve %50'dir. Mekanik havalandırma için temiz hava 12.5 L/s/kişi 'ye olarak ayarlandı. Ölçülebilen ısı geri kazanımı ve gizli ısı geri kazanımı (EnergyPlus varsayılanı) sırasıyla 0,65 ve 0,6 olarak ayarlandı. Ekonomizör yoktur.

İnfiltrasyon dikkate alınmadı. Doluluk ve ekipman yükleri sırasıyla 0.1 kişi/m² ve 12 W/m²'dir. Aydınlatma gücü 10.6 W/m²'dir. Sıcak su sistemleri ve doğal havalandırma kapalı olarak ayarlandı. Havalandırma programı 18 °C'lik ayar noktasına getirildi.

Termal model tanımlandıktan sonra, EnergyPlus çalıştırılmakta ve her bir çalışma durumu için soğutma sağlamak için kullanılan saatlik enerji (kWh/m²) hesaplanmaktadır.

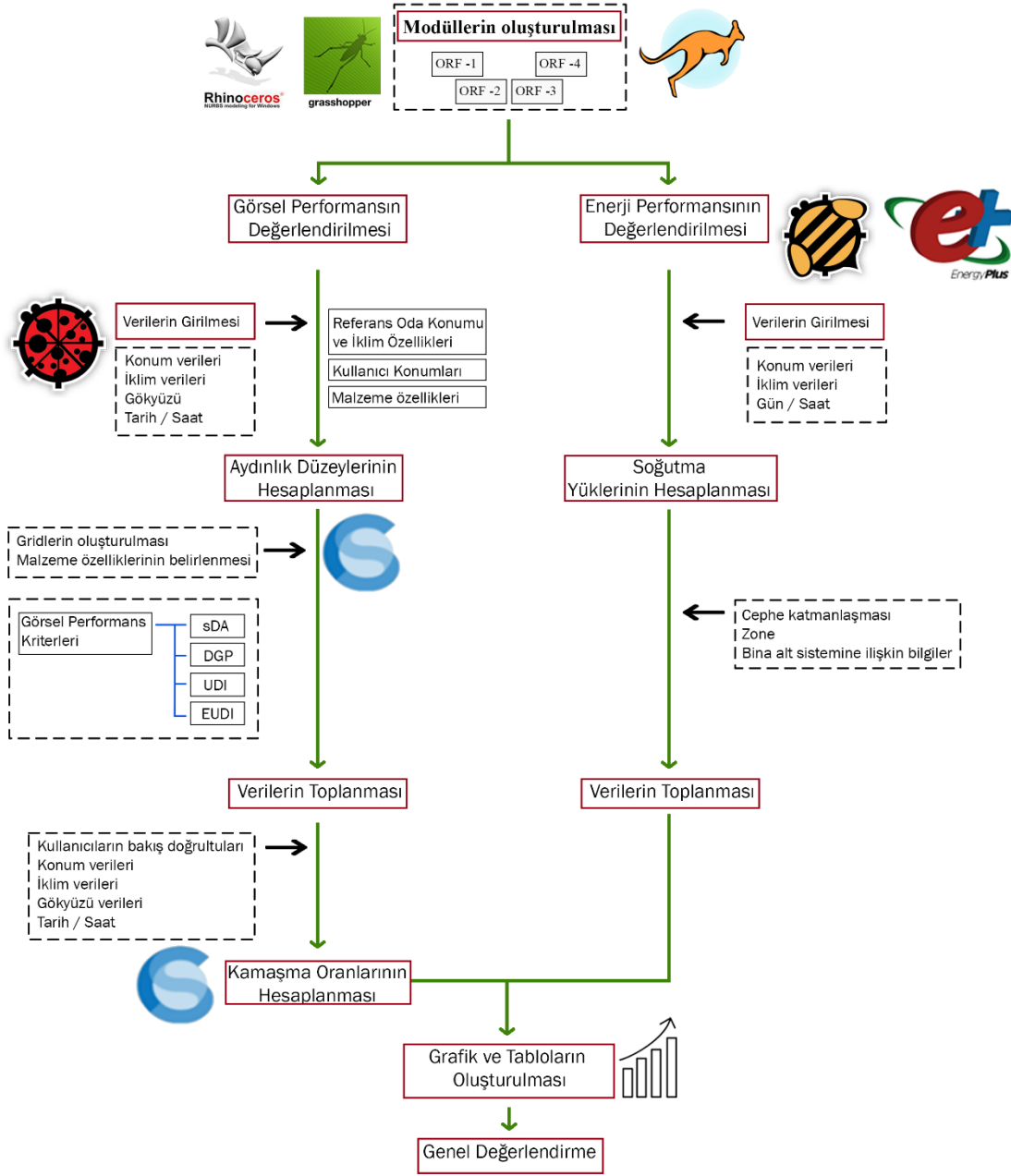
Bina alt sistemine ilişkin kabuller kapsamında, yukarıda anlatıldığı gibi soğutma sistemi yaz aylarında iç ortam sıcaklığını 26°C'de sabit tutacak şekilde modellendi. Değerlendirilecek ORF tiplerinin soğutma yüklerini farklı şekilde etkileyeceği varsayılmaktadır.

4.6. Simülasyon Süreci

Referans odalar ve ORF tiplerinin görsel konfor ve enerji performanslarının değerlendirilmesi belirlenen simülasyon akışıyla (Şekil 4.16) araştırma ardışık olarak 4 aşamada yapıldı. İlk aşamada, her tip için aydınlık düzeyi simülasyonları gerçekleştirildi ve veriler tablolara aktarıldı. Tablolar yorumlanarak en iyi aydınlık düzeyini veren (300 ile 3000 lux arasında olan çalışma düzlemi yüzdesi) saatler bulundu ve aydınlık dağılımlarına bakıldı. İkinci aşamada iç ortamda oluşan kamaşma düzeyleri incelendi. Üçüncü aşama olarak, haziran ayında ısıtmaya gerek duyulmadığı için optimum saat\açılarda sadece soğutma enerji tüketimi hesaplandı ve veriler grafik haline getirilerek değerlendirme yapıldı. Son aşamada ORF tiplerinin görsel performansı ve soğutma için hesaplanan enerji tüketimi karşılaştırılarak optimum performansı sağlayan ORF çözümüne ulaşılmaya çalışıldı.

4.6.1. Görsel Performansın Değerlendirilmesi

Görsel performans değerlendirmesi için aydınlık düzeyleri ve kamaşma düzeylerine bakıldı. ORF-1, ORF-2, ORF-3 ve ORF-4 modülleri temel durumdaki üzerinde hiçbir gölgeleme elemanı olmayan oda (referans oda) üzerinden karşılaştırma yapılarak değerlendirildi. ORF tiplerinin saatlik doğal aydınlatma performansları 4.6.1 bölümünde anlatılan kriterlere göre değerlendirilmiş olup doğal aydınlatmanın değerlendirilmesi kendi içinde 3 aşamaya ayrıldı.



Şekil 4.16. Simülasyona ait akış şeması.

İlk aşamada, 4 ORF tipi için sırasıyla 21 Mart, 21 Haziran ve 21 Aralık günlerinde 09.00, 12.00 ve 15.00 saatleri için simülasyonlar yapılarak iç ortama ne kadar gün ışığı sağladığı incelendi. Temel durum için simülasyon sonuçlarına hem yıllık hem de günlük/saatlik olarak bakılırken, ORF tipleri için her gün ve saatte cephe şekli değişikliğe uğradığı için günlük /saatlik verilere bakıldı. Aydınlık düzeyi 300 lux'ün altına indiğinde aydınlatma kontrolü devreye girdiği için, bu sınırı sağlayacak biçimde gün ışığı geçirebilen ORF modülü ile aydınlatma yönünden performansın daha yüksek olması öngörülmektedir.

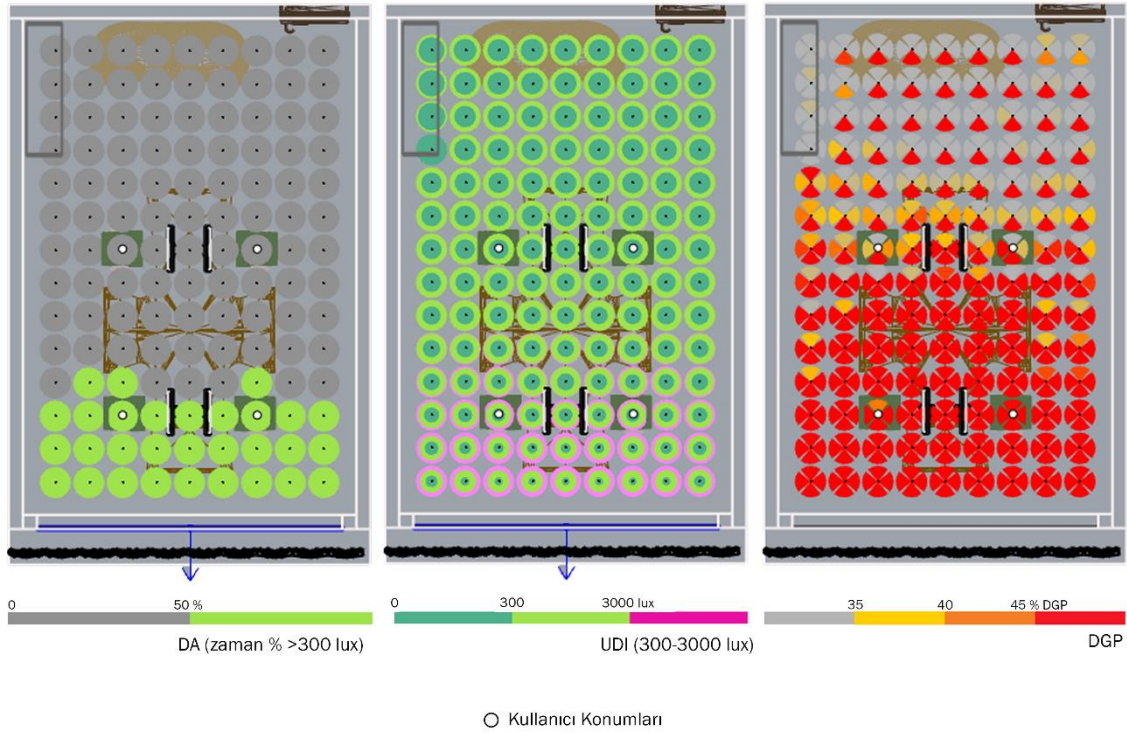
Ayrıca 3000 lux üzerinde görsel konforsuzluk oluşacağı için ORF modülünün bu sınırı koruyacak şekilde olması önemlidir. Ancak dış görünüşün maksimumda sağlanması çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Bu yüzden ikinci aşamada, referans odaya ve ORF tiplerine ait çalışma düzleminde oluşan aydınlık düzeylerine ait sonuçlara ve kamaşma değerlerine bakılmaktadır. Çalışmada günışığına bağlı kamaşmanın değerlendirilmesi bölüm 4.6.1’de aktarılan DGP yöntemiyle gerçekleştirildi.

Son olarak aydınlık düzeylerinin görsel konfor üzerindeki etkisi kadar ışığın mekânda eşit dağılımı da bir o kadar önemlidir. Bundan dolayı çalışma düzleminde ölçülen aydınlık düzeyi yüzdeleri alan yüzdeleri ile Tablo 4.9, 4.12, 4.15, 4.18’de verilen ofis odasında oluşan günışığı dağılımları da değerlendirmeye alındı.

4.6.1.1. Temel Durum İçin Simülasyon Sonuçları

Gün ışığı performansı için parametrik simülasyon, simülasyonun temel durumu olarak ofis alanının temel durumu için ofis odasında sabit konumlu bilgisayar ekranına bakan kullanıcılar için görsel rahatsızlık oluşturduğunu kanıtlamaktadır. Tüm yıl genelinde DA miktarı %23,8’dir. Yani odaya zamanın %23,8’inde gün ışığı alınmasına rağmen, UDI miktarı (%36) kabul edilen ışığın çoğunun en iyi aydınlık düzeyini sağlayan değerlerin (300 lux 3000 lux arası) dışında olduğunu göstermektedir. Ayrıca %5,9’luk EUDI ve %58,1’lik FUDI (300 lux’tan az) değerlerine sahiptir. Bu da görsel ve termal rahatsızlığa sebep olmaktadır. Temel durum için yıllık iklim tabanlı gün ışığı ölçümleri ızgara değerlendirmesi Şekil 4.17’de gösterildi.

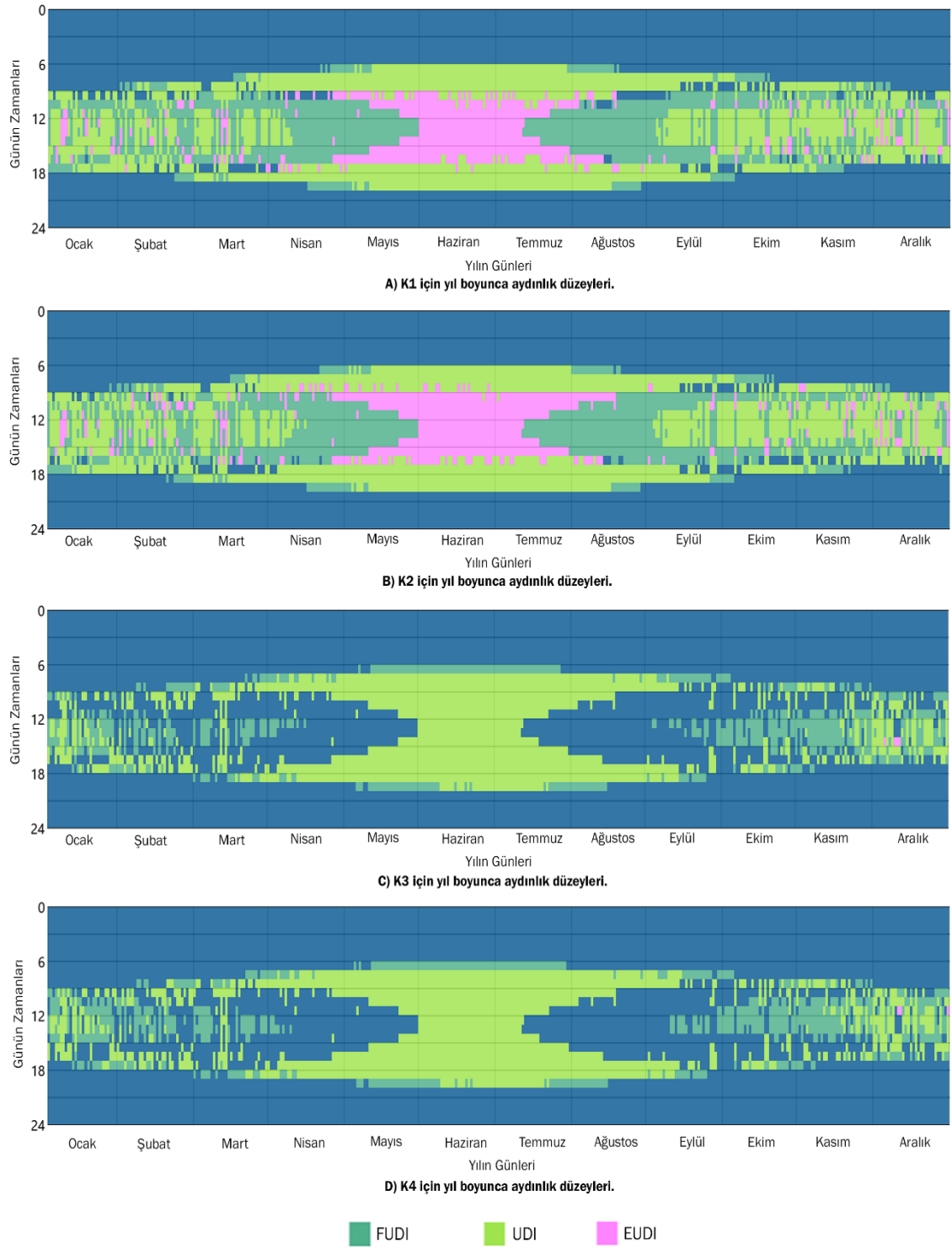
Mekandaki kullanıcılar için eş zamanlı olarak değerlendirilerek, belirlenen tarih ve saatlerde anlık olarak sahip oldukları aydınlık düzeylerine bakıldığında (Şekil 4.18) kullanıcı 3 ve 4’ün ofis odasının arka bölümünde kaldıkları için en iyi aydınlık düzeyini sağlayan değerlerin dışına çıkmadığı görülmektedir. Kullanıcı 1 ve 2 ise çoğunlukla haziran ve temmuz aylarında öğle saatlerinde faydalı sınırları aşan aydınlık düzeylerine sahip oldukları görülmektedir. Bütün kullanıcıların simülasyonun yapıldığı diğer tarihler olan mart ve aralık aylarında aydınlık düzeylerinin çoğunlukla faydalı değerlerin altında kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.17. Temel durum için yıllık iklim tabanlı gün ışığı ölçümleri ızgara değerlendirmesi.

Temel durum için belirlenen tarih ve saatler için elde edilen aydınlık düzeyi yüzdeleri ise Tablo 4.5’te verildi. Önünde hiçbir gölgeleme elemanı bulunmaması nedeniyle saat 12.00 ve 15.00’da faydalı sınırları aşan (EUDI) alan yüzdeleri referans oda için artış gösterdiği ve bu durumun beraberinde kamaşma potansiyelini artırdığı görülmektedir. Ayrıca en yüksek EUDI değerleri 21 Haziran 12.00 ve 15.00’de görüldü.

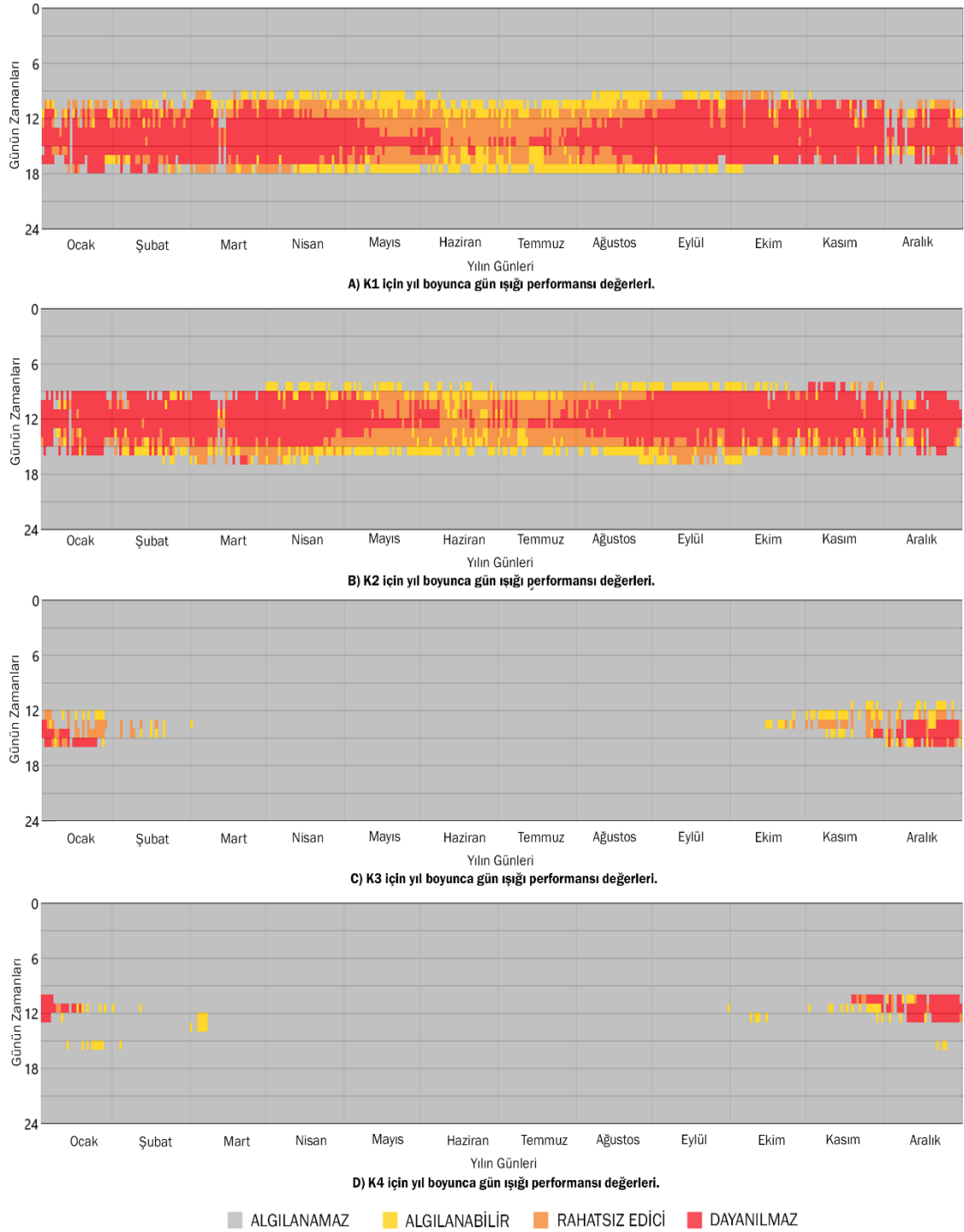
Parlama riskinin tahmin edilmesiyle ilgili olarak, günün üç farklı saatinde bina sakinleri ve güneş konumuna dayalı 36 simülasyon analiz edildi. Simülasyon sonuçlarına göre temel durumda yılın genelinde oda performansı %17 dayanılmaz, %5 rahatsız edici ve %73 algılanamaz aralıklarda ve yalnızca %4 algılanabilir olarak bulundu (Şekil 4.17). Sabit konumlu kullanıcıların yıl boyunca sahip oldukları gün ışığı performansı değerlerine bakıldığında (Şekil 4.19) kullanıcı 1 ve 2’nin pencereye yakın konumda bulundukları için yoğun bir şekilde gün ışığına maruz kaldıkları görülmektedir. Maruz kalınan saatler genellikle öğle saatleridir. Kullanıcı 3 ve 4 için ise aralık ayında ve genellikle öğleden sona yoğun bir şekilde gün ışığına maruz kaldığı söylenebilir.



Şekil 4.18. Kullanıcıların yıl boyunca sahip oldukları aydınlık düzeyleri.

Aynı zamanda belirlenen tarih ve saatler için oda performansına bakıldığında algılanamaz aralıklarda 12 durum, algılanabilir 2 durum, rahatsız edici 3 durum ve dayanılmaz 19 durum gözlemlendi. Bu nedenle, vakaların yaklaşık yarısında, özellikle 21 Aralık'ta

kullanıcılar gün ışığı parlaması ve görsel rahatsızlıktan mustarip olacağı söylenebilir (Tablo 4.6). Tablo 4.5’te temel durum için gün ışığı performansı değerleri verildi ve dayanılmaz aralıkta olan değerler turuncu renk ile vurgulandı.



Şekil 4.19. Kullanıcıların yıl boyunca sahip oldukları gün ışığı performansı değerleri.

Tablo 4.5. Temel durum için aydınlık düzeyi yüzdeleri.

Değerlendirme Ölçütü	Aydınlık Düzeyi Yüzdeleri		
Saatler	0-300 lux (FUDI)	300-3000 lux (UDI)	3000 lux ve üstü (EUDI)
21 Mart 09.00	100	-	-
21 Mart 12.00	76,2	23,8	-
21 Mart 15.00	85	15	-
21 Haziran 09.00	1,6	83,4	15
21 Haziran 12.00	0,8	61,9	37,3
21 Haziran 15.00	0,8	69	30,2
21 Aralık 09.00	8,7	87,3	4
21 Aralık 12.00	50,8	49,2	-
21 Aralık 15.00	3,2	73,8	23

Tablo 4.6. Temel durum için gün ışığı performansı değerleri.

Değerlendirme Ölçütü	DGP Değerleri		
Saatler	09.00	12.00	15.00
Kullanıcı 1/ 21 Mart	35	57	100
Kullanıcı 1/ 21 Haziran	32	42	46
Kullanıcı 1/ 21 Aralık	28	49	62
Kullanıcı 2/ 21 Mart	53	100	39
Kullanıcı 2/ 21 Haziran	36	45	37
Kullanıcı 2/ 21 Aralık	59	100	29
Kullanıcı 3/ 21 Mart	23	28	26
Kullanıcı 3/ 21 Haziran	21	24	24
Kullanıcı 3/ 21 Aralık	19	37	48
Kullanıcı 4/ 21 Mart	24	30	24
Kullanıcı 4/ 21 Haziran	22	25	23
Kullanıcı 4/ 21 Aralık	21	93	21

4.6.1.2. ORF-1 Modülü İçin Simülasyon Sonuçları

Tablo 4.7, ORF-1 modülü için aydınlık düzeyi yüzdelerini göstermektedir. Modülün sağladığı gölgeleme ile haziran ayında faydalı gün ışığında (300-3000 lux) önemli bir gelişme görülmektedir. Bununla beraber mekâna giren gerekli seviyeleri aşan gün ışığı aydınlatması (>3000 lux) miktarının azaltıldığı görülmektedir. Kamaşma değerlendirmesine bakıldığında dayanılmaz (%45-100) bölgede bulunan 3 vaka kaydedildi. Bu alanlar tabloda turuncu tonuyla vurgulandı (Tablo 4.8). Aynı zamanda oda performansında algılanamaz aralıklarda 32 durum, algılanabilir 3 durum gözlemlendi. Rahatsız edici durum gözlenmedi (Şekil 4.20). DGP temel duruma göre önemli bir gelişme göstermektedir. Parlaklık tabanlı metrik sonuçlar, geliştirilen cephenin gün ışığı performansının temel duruma göre yaklaşık 3 kat daha iyi durumda olduğunu göstermektedir. Fakat aydınlık düzeyi yüzdelerine bakıldığında çok fazla faydalı sınırların altında kalan değerler olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda oda yeterince aydınlatılamadığı için yapay aydınlatma ihtiyacı doğacaktır. Modül geometrisinin sağladığı gölgeleme oranıyla bağlantılı olarak EUDI oranının en çok bu modülde azaldığı görülmektedir. Tablo 4.9’da her bir kullanıcı için belirtilen tarihlerde önerilen cephenin durumu ve kullanıcı görüş açıları resimlerle listelendi.

Tablo 4.7. ORF-1 modülü için aydınlık düzeyi yüzdeleri.

Değerlendirme Ölçütü	Aydınlık Düzeyi Yüzdeleri		
Saatler	0-300 lux (FUDI)	300-3000 lux (UDI)	3000 lux ve üstü (EUDI)
21 Mart 09.00	100	-	-
21 Mart 12.00	100	-	-
21 Mart 15.00	100	-	-
21 Haziran 09.00	9,5	87,3	3,2
21 Haziran 12.00	4	84,1	11,9
21 Haziran 15.00	3,2	84,9	11,9
21 Aralık 09.00	62	38	-
21 Aralık 12.00	100	-	-
21 Aralık 15.00	27,8	70,6	1,6

Tablo 4.8. ORF-1 modülü için gün ışığı performansı değerleri.

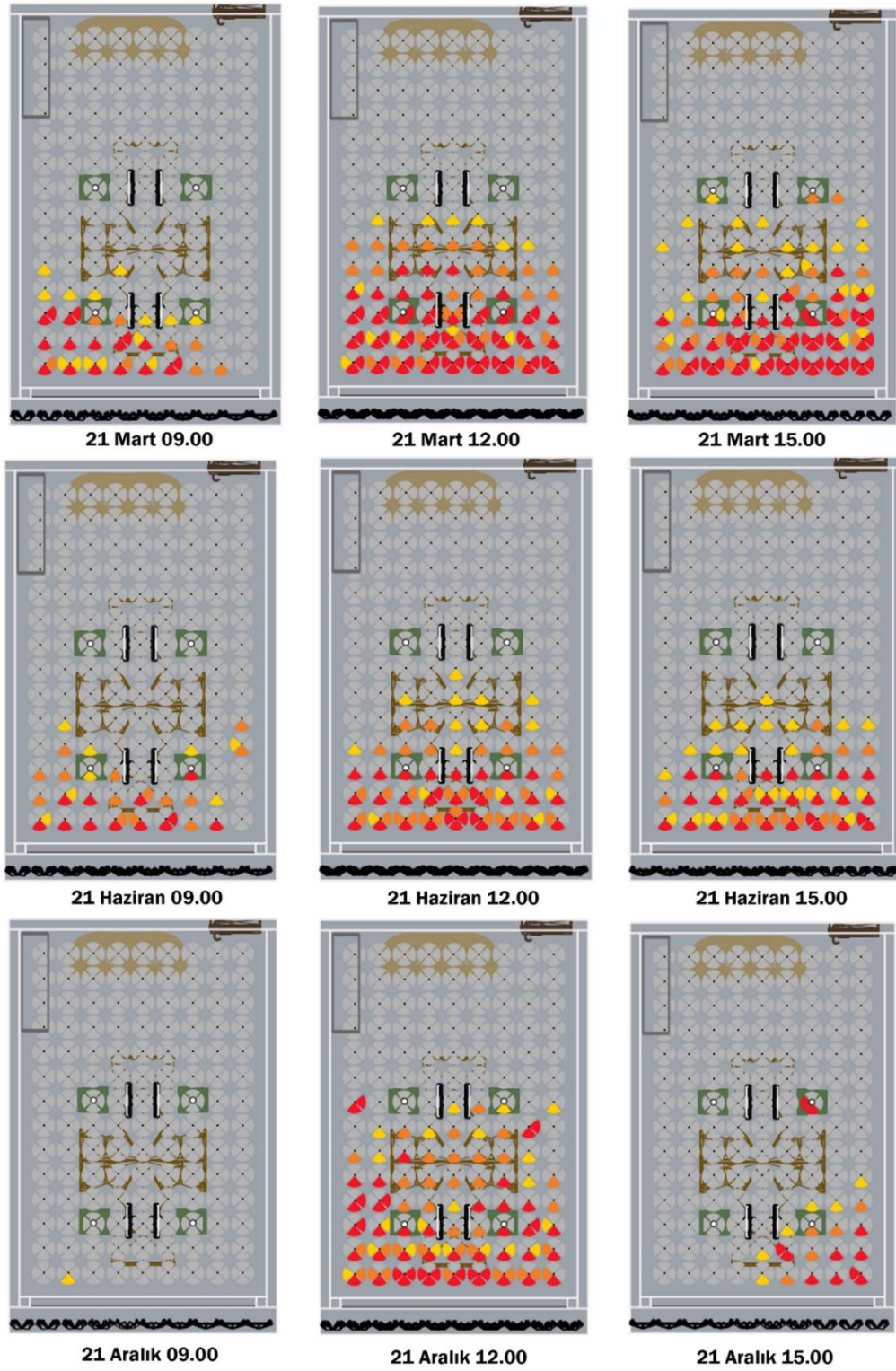
Değerlendirme Ölçütü	DGP		
Saatler	09.00	12.00	15.00
Kullanıcı 1/ 21 Mart	25	33	100
Kullanıcı 1/ 21 Haziran	24	32	28
Kullanıcı 1/ 21 Aralık	19	34	24
Kullanıcı 2/ 21 Mart	29	100	36
Kullanıcı 2/ 21 Haziran	24	29	30
Kullanıcı 2/ 21 Aralık	20	30	22
Kullanıcı 3/ 21 Mart	19	22	23
Kullanıcı 3/ 21 Haziran	19	20	20
Kullanıcı 3/ 21 Aralık	11	23	45
Kullanıcı 4/ 21 Mart	19	21	24
Kullanıcı 4/ 21 Haziran	19	20	21
Kullanıcı 4/ 21 Aralık	9	23	18

4.6.1.3. ORF-2 Modülü İçin Simülasyon Sonuçları

ORF-2 modülüne sahip cephe için elde edilen aydınlık düzeyi yüzdeleri Tablo 4.10'da verildi. Tabloya göre incelenen 36 vaka için iç mekâna giren ortalama gün ışığı (DA) değeri hem temel duruma hem de ORF-1 modülüne göre artış gösterdiği görülmektedir. Mekâna giren gerekli seviyeleri aşan gün ışığı aydınlatması (>3000 lux) miktarı temel duruma göre azalırken ORF-1 modülüne kıyasla yüksektir.

Tablo 4.11, ORF-2 modülü için ışığı performansı değerlerini göstermektedir. Kamaşma değerlendirmesine bakıldığında dayanılmaz (%45-100) bölgede bulunan 4 vaka kaydedildi (Tablo 4.11). Aynı zamanda oda performansında algılanamaz aralıklarda 31 durum ve rahatsız edici 3 durum gözlemlendi. Algılanabilir aralıkta hiçbir vaka bulunmamaktadır (Şekil 4.21). Parlaklık tabanlı metrik sonuçlar, geliştirilen cephenin gün ışığı performansının temel duruma göre yaklaşık 3 kat daha iyi durumda olduğunu göstermektedir. Senaryoların çoğu, temel durumla ilgili gün ışığı performansını iyileştirmek için ORF-2 modülünün yüksek performansını vurgulamaktadır. Tablo

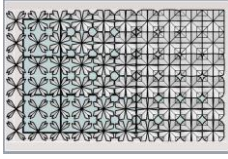
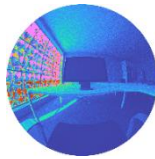
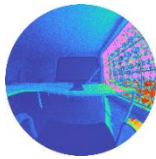
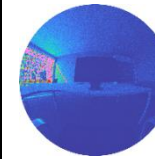
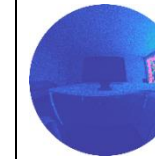
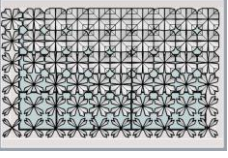
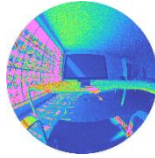
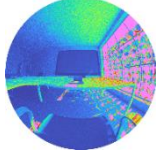
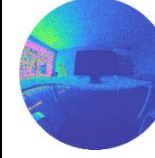
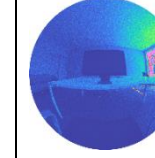
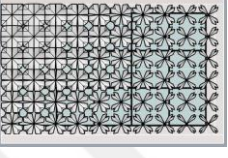
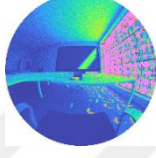
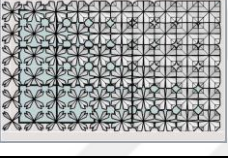
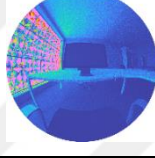
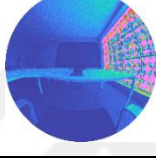
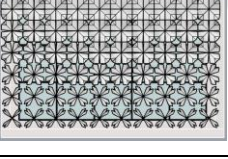
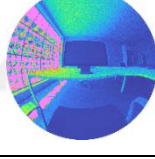
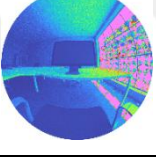
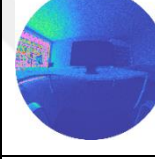
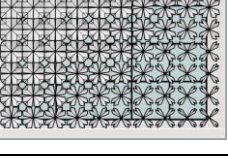
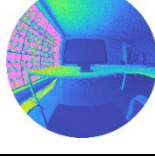
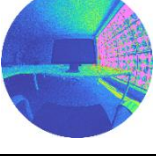
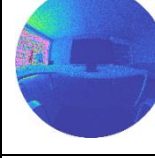
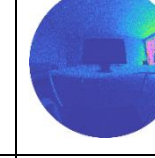
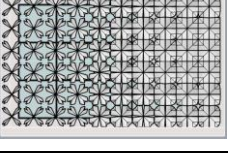
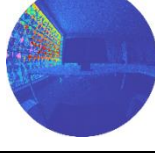
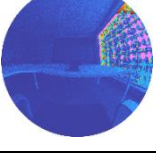
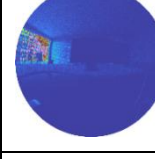
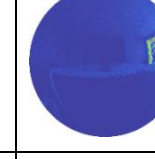
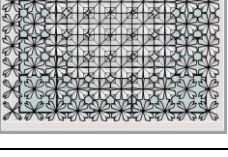
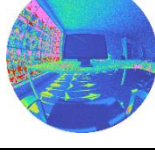
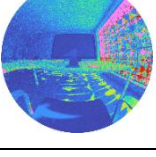
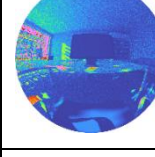
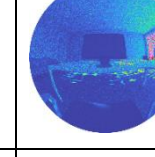
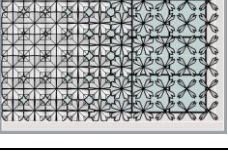
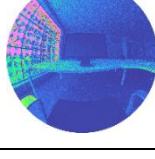
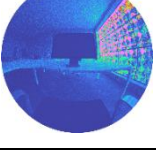
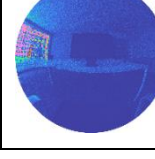
4.12’de her bir kullanıcı için belirtilen tarihlerde önerilen cephenin durumu ve kullanıcı görüş açıları resimlerle listelendi.



ALGILANAMAZ ALGILANABİLİR RAHATSIZ EDİCİ DAYANILMAZ

Şekil 4.20. ORF-1 modülüne ait çalışma düzlemindeki gün ışığı performansı düzeyleri.

Tablo 4.9. ORF-1 modülü için gün ışığı performansı değerleri.

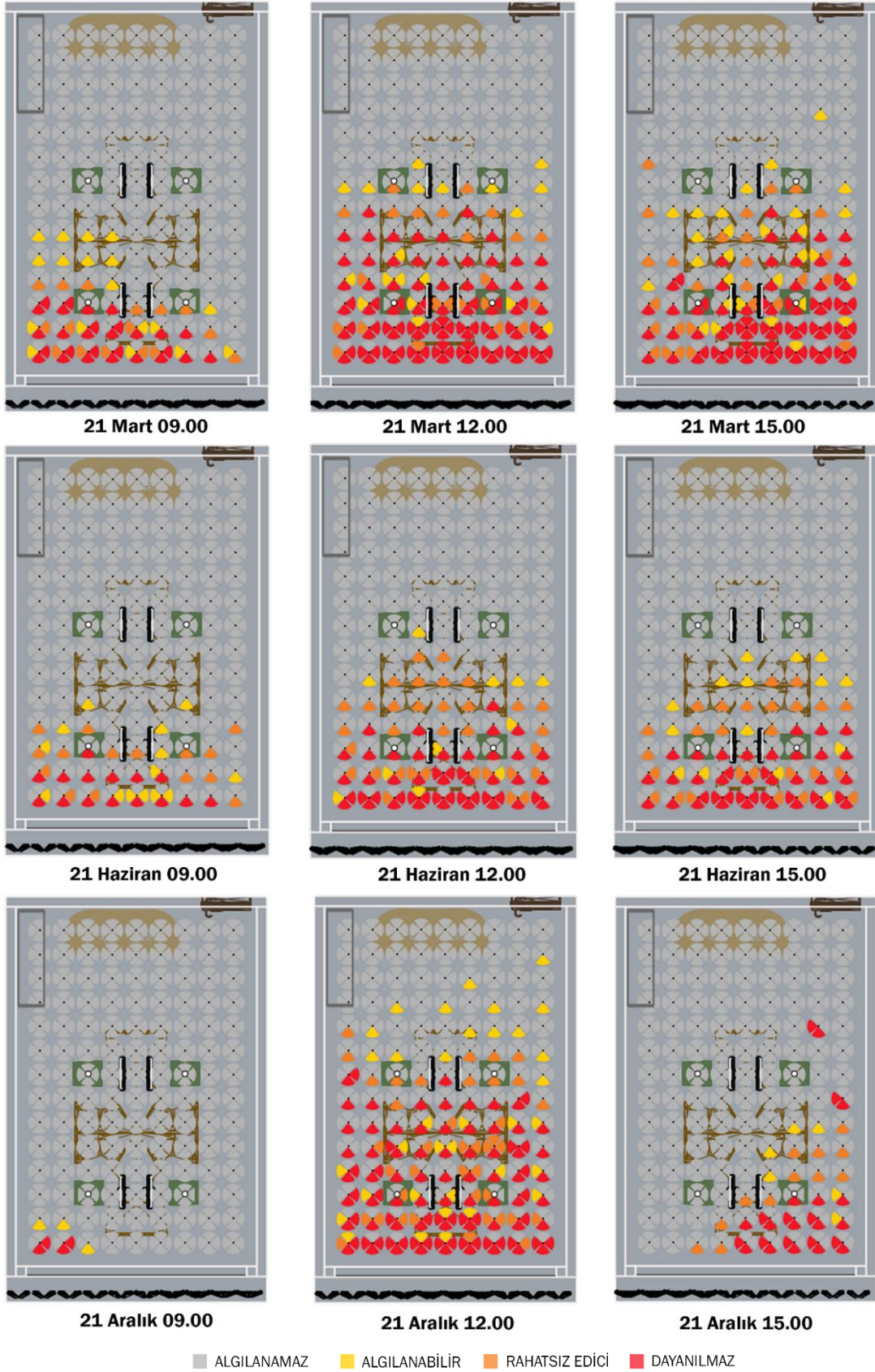
Tarih	Saat	Değerlendirme Ölçütü	Saatlik Aydınlık Dağılımları			
		Kinetik Cephe	Kullanıcı 1	Kullanıcı 2	Kullanıcı 3	Kullanıcı 4
21 Mart	09.00					
	12.00					
	15.00					
21 Haziran	09.00					
	12.00					
	15.00					
21 Aralık	09.00					
	12.00					
	15.00					

Tablo 4.10. ORF-2 modülü için aydınlık düzeyi yüzdeleri.

Değerlendirme Ölçütü	Aydınlık Düzeyi Yüzdeleri		
	0-300 lux (FUDI)	300-3000 lux (UDI)	3000 lux ve üstü (EUDI)
21 Mart 09.00	100	-	-
21 Mart 12.00	95,2	4,8	-
21 Mart 15.00	96	4	-
21 Haziran 09.00	3,2	92	4,8
21 Haziran 12.00	3,2	80,9	15,9
21 Haziran 15.00	3,2	80,1	16,7
21 Aralık 09.00	46,8	53,2	-
21 Aralık 12.00	92,9	7,2	-
21 Aralık 15.00	6,3	86,5	7,2

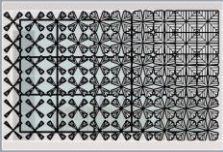
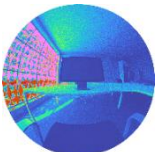
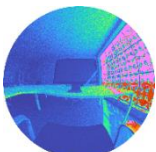
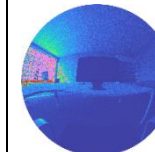
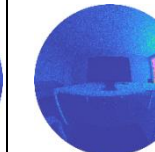
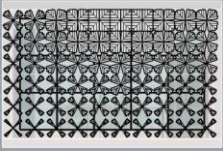
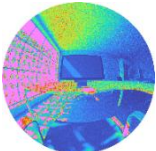
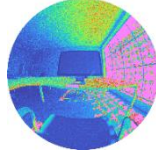
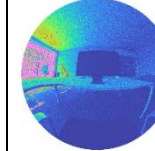
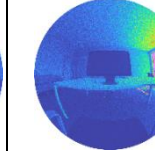
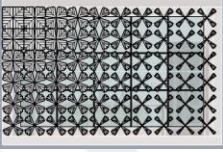
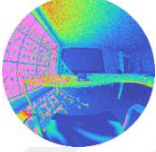
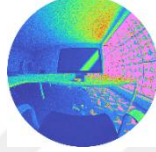
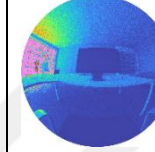
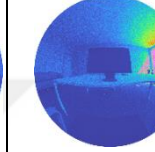
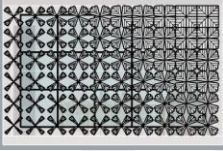
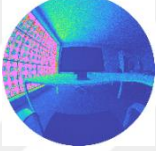
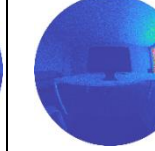
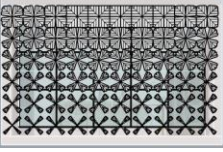
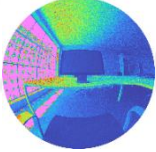
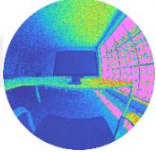
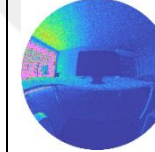
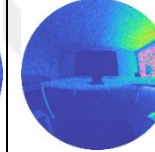
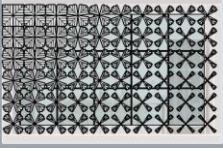
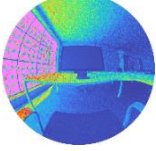
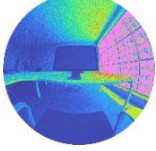
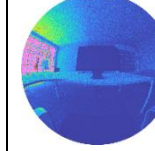
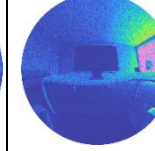
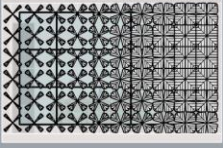
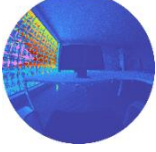
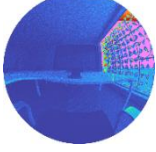
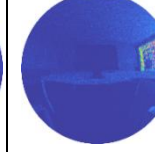
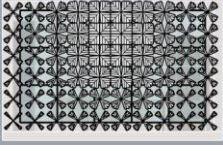
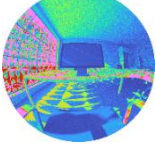
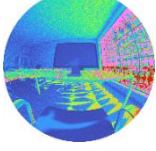
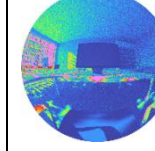
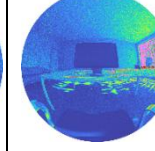
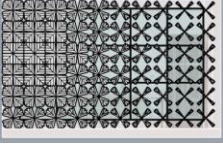
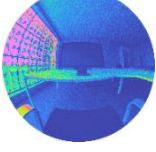
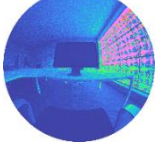
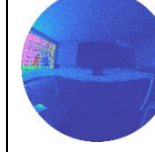
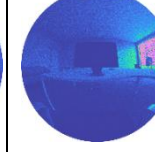
Tablo 4.11. ORF-2 için gün ışığı performansı değerleri.

Değerlendirme Ölçütü	DGP		
	09.00	12.00	15.00
Kullanıcı 1/ 21 Mart	26	42	100
Kullanıcı 1/ 21 Haziran	29	32	34
Kullanıcı 1/ 21 Aralık	20	38	28
Kullanıcı 2/ 21 Mart	33	100	53
Kullanıcı 2/ 21 Haziran	33	33	31
Kullanıcı 2/ 21 Aralık	22	40	24
Kullanıcı 3/ 21 Mart	21	23	23
Kullanıcı 3/ 21 Haziran	19	21	21
Kullanıcı 3/ 21 Aralık	17	28	18
Kullanıcı 4/ 21 Mart	20	25	23
Kullanıcı 4/ 21 Haziran	19	22	21
Kullanıcı 4/ 21 Aralık	13	26	19



Şekil 4.21. ORF-2 modülüne ait çalışma düzlemindeki gün ışığı performansı düzeyleri.

Tablo 4.12. ORF-2 için gün ışığı performansı değerleri.

Tarih	Saat	Değerlendirme Ölçütü	Saatlik Aydınlık Dağılımları			
			Kullanıcı 1	Kullanıcı 2	Kullanıcı 3	Kullanıcı 4
21 Mart	09.00					
	12.00					
	15.00					
21 Haziran	09.00					
	12.00					
	15.00					
21 Aralık	09.00					
	12.00					
	15.00					

4.6.1.4. ORF-3 Modülü İçin Simülasyon Sonuçları

ORF-3 modülüne sahip cephe için elde edilen aydınlık düzeyi yüzdeleri Tablo 4.13’de verildi. Mekandaki aydınlık düzeyi yüzdelerine bakıldığında UDI değerlerinin yüksek bir oranda iyileştiği görülmektedir. ORF-1 ve ORF-2 modülünde mart ayında aydınlık düzeyi değerleri yüksek oranda 300 lux’un altında kalırken ORF-3 modülünde UDI değerlerinin az bir oranda arttığı görülmektedir. Temel durumda en çok EUDI değerlerine sahip olan haziran 12.00, 15.00 ve aralık 15.00 saatlerinde belirgin bir iyileşme görülse de oranlar ORF-1 ve ORF-2 modülüne göre yüksek kalmaktadır.

Tablo 4.14, ORF-3 modülü için gün ışığı performansı değerlerini göstermektedir. Kamaşma değerlendirmesine bakıldığında dayanılmaz (%45-100) bölgede bulunan 4 vaka kaydedildi (Tablo 4.14). Aynı zamanda oda performansında algılanamaz aralıklarda 25 durum, algılanabilir 5 durum, rahatsız edici 2 durum gözlemlendi (Şekil 4.22). Parlaklık tabanlı metrik sonuçlara göre, geliştirilen ORF-3 modülü temel duruma, ORF-1 ve ORF-2 modülüne göre daha fazla faydalı aydınlık düzeyi yüzdesine sahiptir. Tablo 4.15’te her bir kullanıcı için belirtilen tarihlerde önerilen cephenin durumu ve kullanıcı görüş açıları resimlerle listelendi.

Tablo 4.13. ORF-3 modülü için aydınlık düzeyi yüzdeleri.

Değerlendirme Ölçütü	Aydınlık Düzeyi Yüzdeleri		
Saatler	0-300 lux (FUDI)	300-3000 lux (UDI)	3000 lux ve üstü (EUDI)
21 Mart 09.00	100	-	-
21 Mart 12.00	97,6	2,4	-
21 Mart 15.00	95,2	4,8	-
21 Haziran 09.00	1,6	86,5	11,9
21 Haziran 12.00	2,4	70,6	27
21 Haziran 15.00	2,4	75,4	22,2
21 Aralık 09.00	44,4	55,6	-
21 Aralık 12.00	96	4	-
21 Aralık 15.00	4	91,2	4,8

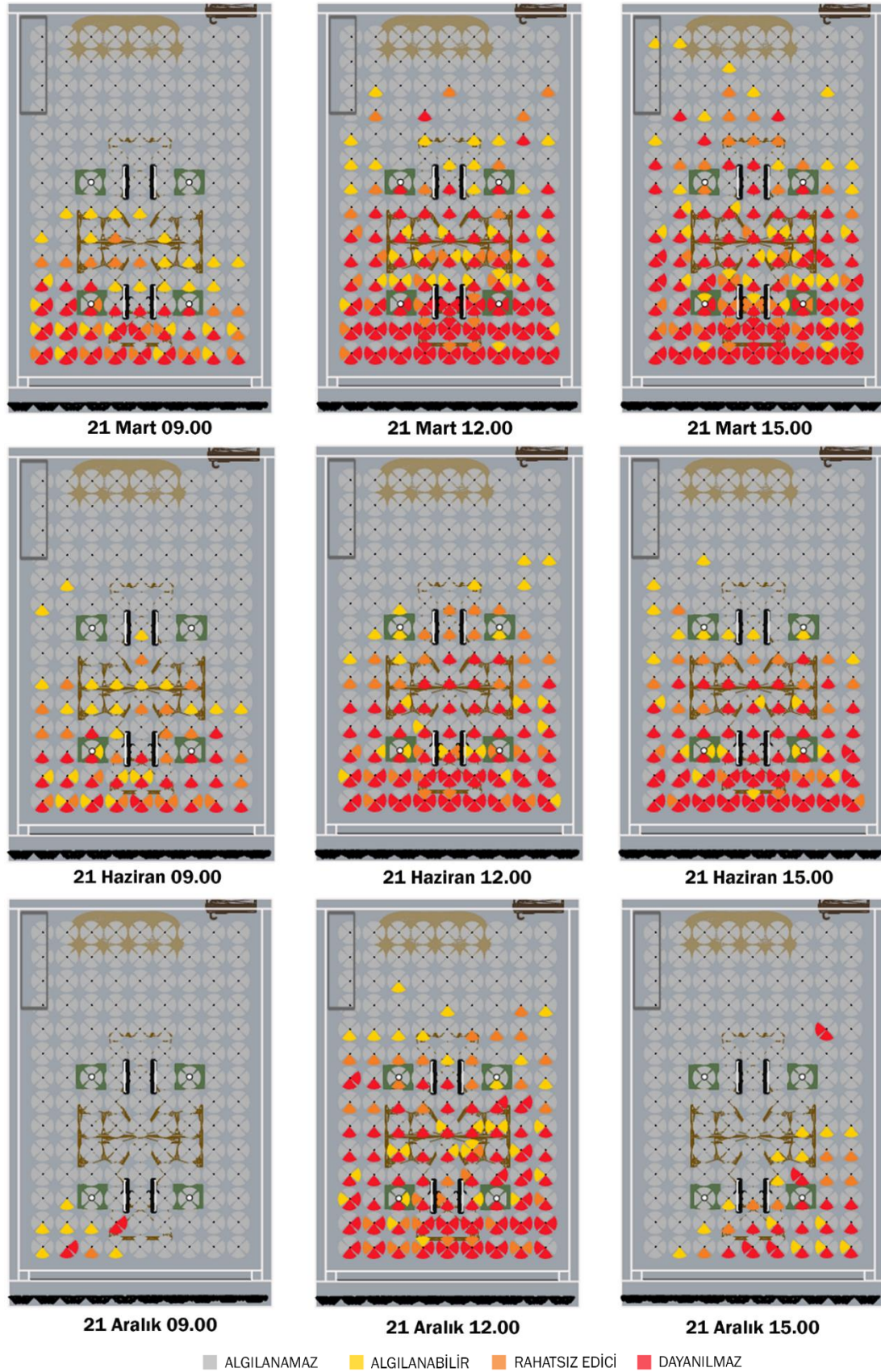
Tablo 4.14. ORF-3 için gün ışığı performansı değerleri.

Değerlendirme Ölçütü	DGP		
Saatler	09.00	12.00	15.00
Kullanıcı 1/ 21 Mart	29	46	100
Kullanıcı 1/ 21 Haziran	28	38	36
Kullanıcı 1/ 21 Aralık	20	33	28
Kullanıcı 2/ 21 Mart	43	100	50
Kullanıcı 2/ 21 Haziran	38	36	34
Kullanıcı 2/ 21 Aralık	22	36	23
Kullanıcı 3/ 21 Mart	20	28	34
Kullanıcı 3/ 21 Haziran	23	25	24
Kullanıcı 3/ 21 Aralık	18	21	20
Kullanıcı 4/ 21 Mart	20	26	25
Kullanıcı 4/ 21 Haziran	20	23	24
Kullanıcı 4/ 21 Aralık	17	22	19

4.6.1.5. ORF-4 Modülü İçin Simülasyon Sonuçları

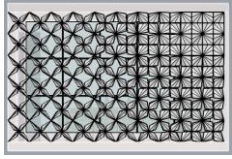
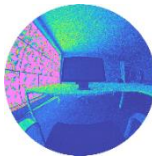
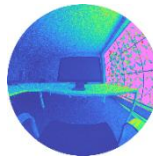
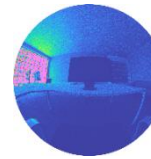
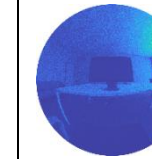
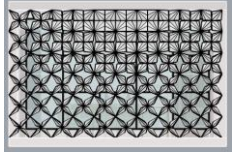
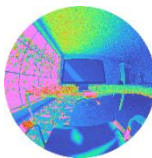
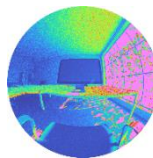
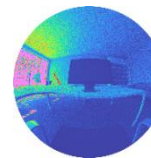
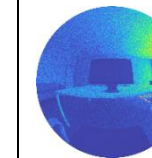
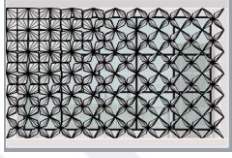
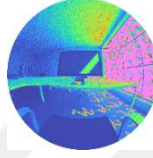
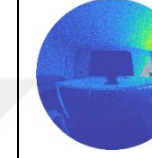
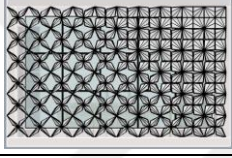
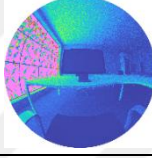
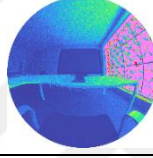
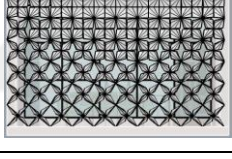
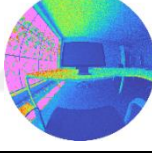
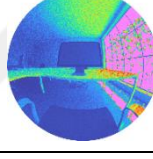
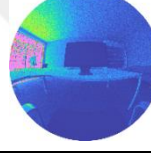
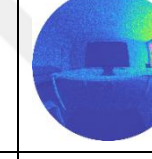
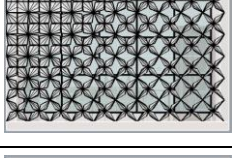
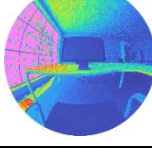
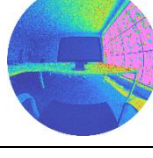
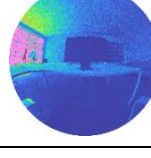
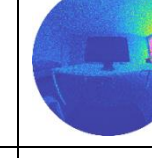
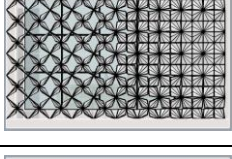
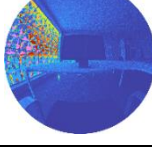
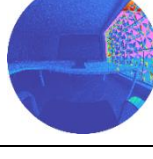
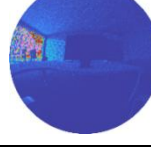
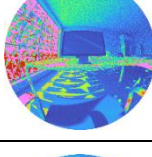
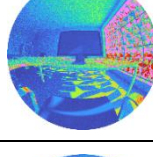
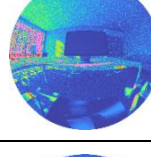
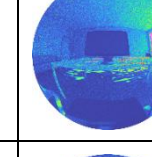
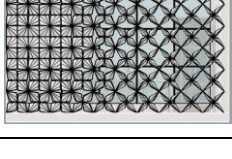
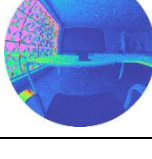
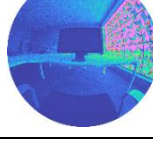
ORF-4 modülüne sahip cephe için elde edilen aydınlık düzeyi yüzdeleri Tablo 4.16’da verildi. ORF-4 modülünün sağladığı gölgelemeyle mekâna giren gerekli seviyeleri aşan gün ışığı aydınlatması (>3000 lux) miktarının temel durumdaki ve diğer ORF modüllerine kıyasla iyileştiği görülmektedir. Fakat UDI değerleri temel durum, ORF-1 ve ORF-2 modüllerine göre yüksek olsa da ORF-3 modülüne göre düşük yüzdelere sahiptir.

Tablo 4.17, ORF-3 modülü için gün ışığı performansı değerlerini göstermektedir. Kamaşma değerlendirmesine bakıldığında dayanılmaz (%45-100) bölgede bulunan 4 vaka kaydedildi. Bu alanlar tabloda turuncu tonuyla vurgulandı (Tablo 4.1). Aynı zamanda oda performansında algılanamaz aralıklarda 33 vaka ve algılanabilir aralıklara sahip 6 vaka gözlemlendi. Rahatsız edici aralıklara sahip vaka gözlenmedi (Şekil 4.23). Algılanabilir aralıklara sahip en çok vaka bu modülde bulunmaktadır. Tablo 4.18’de her bir kullanıcı için belirtilen tarihlerde önerilen cephenin durumu ve kullanıcı görüş açıları resimlerle listelendi.



Şekil 4.22. ORF-3 modülüne ait çalışma düzlemindeki gün ışığı performansı düzeyleri.

Tablo 4.15. ORF-3 modülü için gün ışığı performansı değerleri.

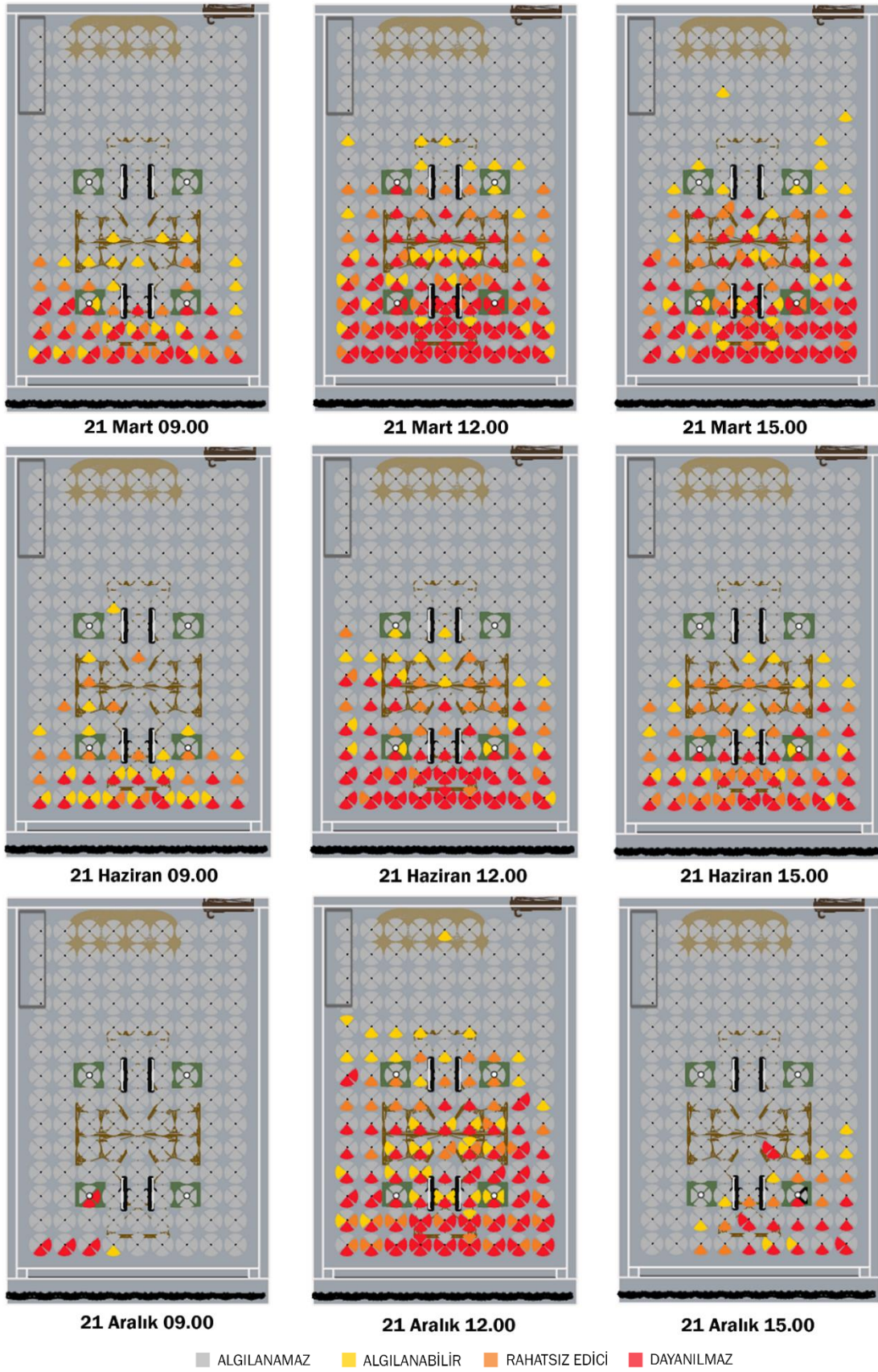
Tarih	Saat	Değerlendirme Ölçütü	Saatlik Aydınlık Dağılımları			
			Kullanıcı 1	Kullanıcı 2	Kullanıcı 3	Kullanıcı 4
21 Mart	09.00					
	12.00					
	15.00					
21 Haziran	09.00					
	12.00					
	15.00					
21 Aralık	09.00					
	12.00					
	15.00					

Tablo 4.16. ORF-4 modülü için aydınlık düzeyi yüzdeleri.

Değerlendirme Ölçütü	Aydınlık Düzeyi Yüzdeleri		
Saatler	0-300 lux (FUDI)	300-3000 lux (UDI)	3000 lux ve üstü (EUDI)
21 Mart 09.00	100	-	-
21 Mart 12.00	99,2	0,8	-
21 Mart 15.00	99,2	0,8	-
21 Haziran 09.00	2,4	92,8	4,8
21 Haziran 12.00	3,2	73,8	23
21 Haziran 15.00	2,4	77,4	19,8
21 Aralık 09.00	43,7	56,3	-
21 Aralık 12.00	99,2	0,8	-
21 Aralık 15.00	8	89,6	2,4

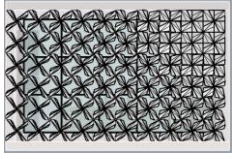
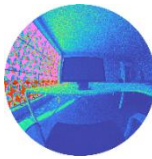
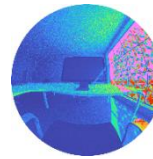
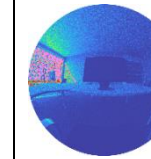
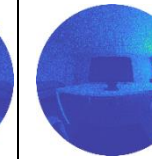
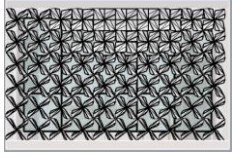
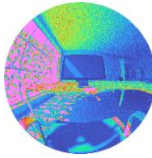
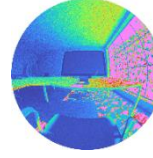
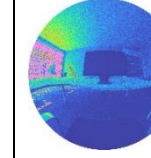
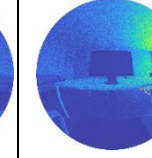
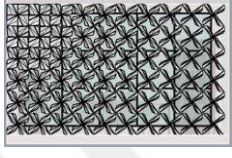
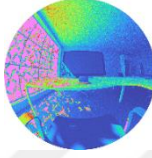
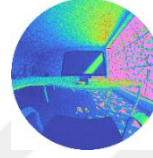
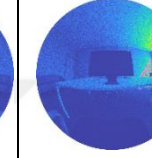
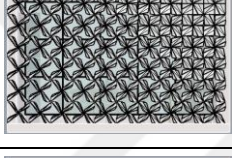
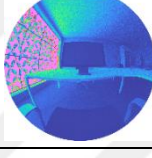
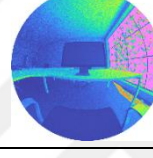
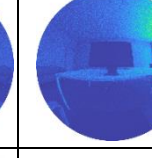
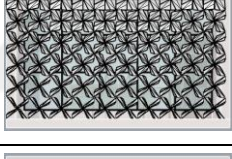
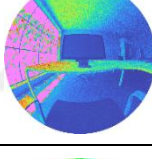
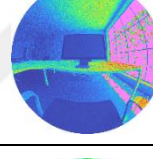
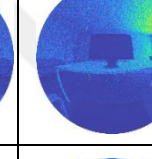
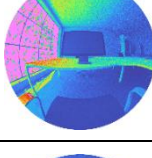
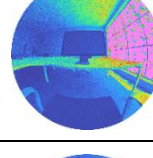
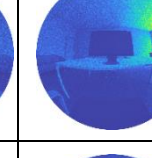
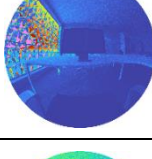
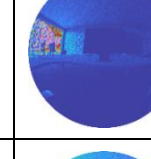
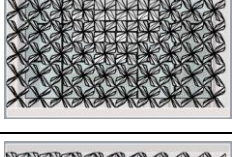
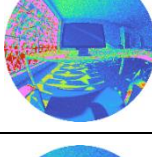
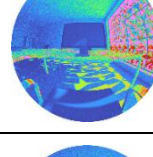
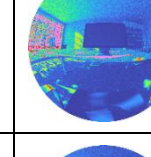
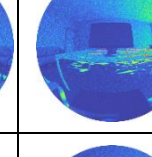
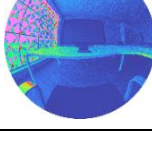
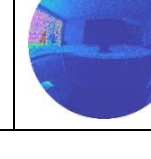
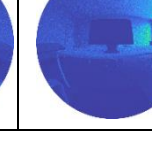
Tablo 4.17. ORF-4 modülü için gün ışığı performansı değerleri.

Değerlendirme Ölçütü	DGP		
Saatler	09.00	12.00	15.00
Kullanıcı 1/ 21 Mart	27	49	100
Kullanıcı 1/ 21 Haziran	29	35	37
Kullanıcı 1/ 21 Aralık	20	38	29
Kullanıcı 2/ 21 Mart	34	100	35
Kullanıcı 2/ 21 Haziran	28	37	33
Kullanıcı 2/ 21 Aralık	52	34	23
Kullanıcı 3/ 21 Mart	20	24	23
Kullanıcı 3/ 21 Haziran	21	21	21
Kullanıcı 3/ 21 Aralık	16	25	20
Kullanıcı 4/ 21 Mart	20	25	22
Kullanıcı 4/ 21 Haziran	19	23	21
Kullanıcı 4/ 21 Aralık	15	25	19



Şekil 4.23. ORF-4 modülüne ait çalışma düzlemindeki gün ışığı performansı düzeyleri.

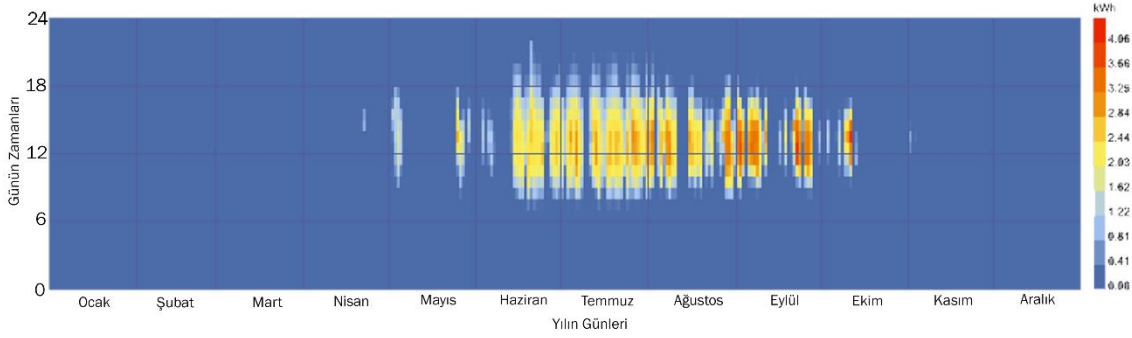
Tablo 4.18. ORF-4 modülü için gün ışığı performansı değerleri.

Tarih	Saat	Değerlendirme Ölçütü	Saatlik Aydınlık Dağılımları			
			Kullanıcı 1	Kullanıcı 2	Kullanıcı 3	Kullanıcı 4
21 Mart	09.00					
	12.00					
	15.00					
21 Haziran	09.00					
	12.00					
	15.00					
21 Aralık	09.00					
	12.00					
	15.00					

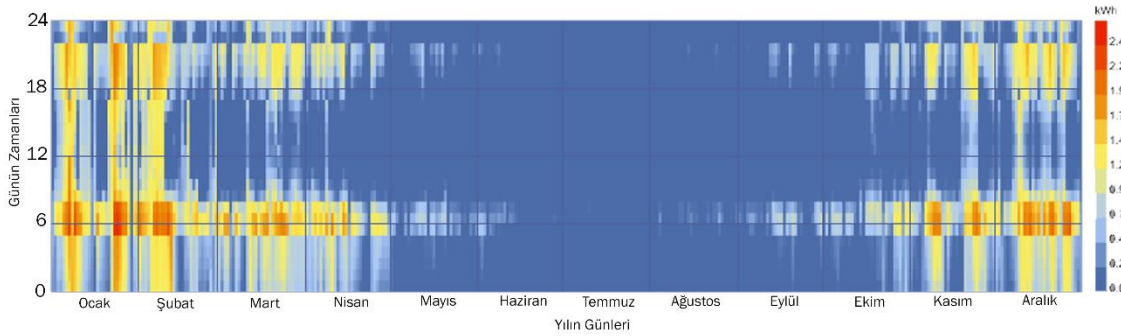
4.6.2. Enerji Performans Değerlendirilmesi

Yapılan simülasyonlar ile soğutma yüklerinin değerlendirilmesi bölüm 4.3.'de anlatılan kriterler üzerinden yapıldı. Simülasyonlarda 21 Haziran günü için sadece soğutma değerlerine bakıldı.

Temel durum için yıl boyunca enerji performans değerlerine bakıldığında, soğutma enerjilerinin en çok Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.24). Ve en büyük soğutma yükleri öğleden sonra 12.00 ile 18.00 arasında görülmektedir. Bununla bağlantılı olarak da en yüksek ısıtma enerjileri gece saatlerinde görülmektedir. Ocak, Şubat ve Aralık ayları en yüksek ısıtma yükünün olduğu aylardır (Şekil 4.25).

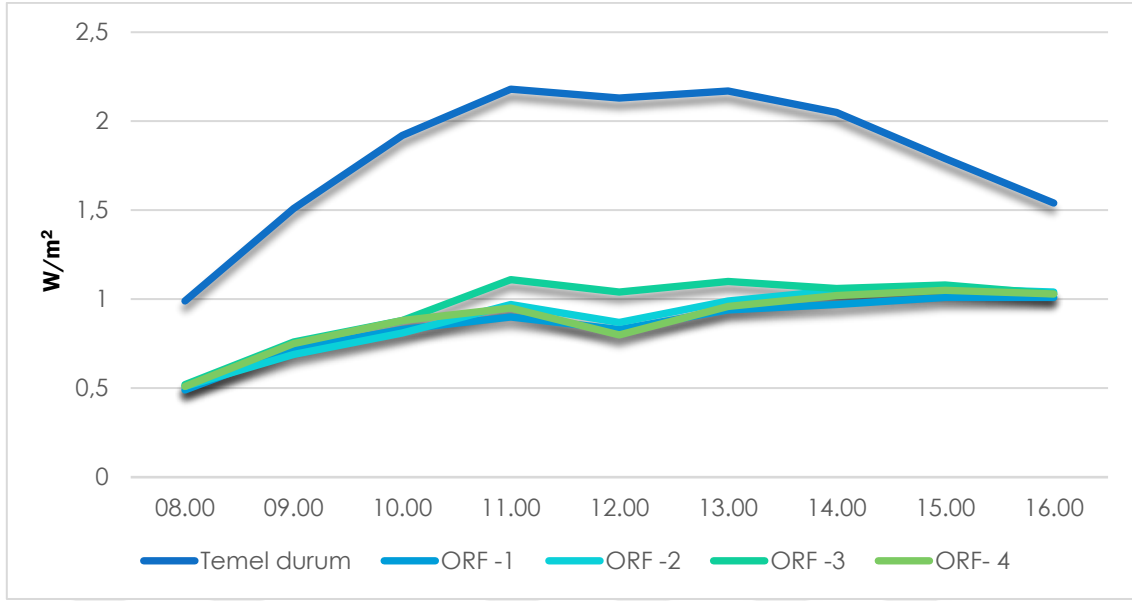


Şekil 4.24. Temel durum için soğutma yüklerinin yıl boyunca dağılımı.

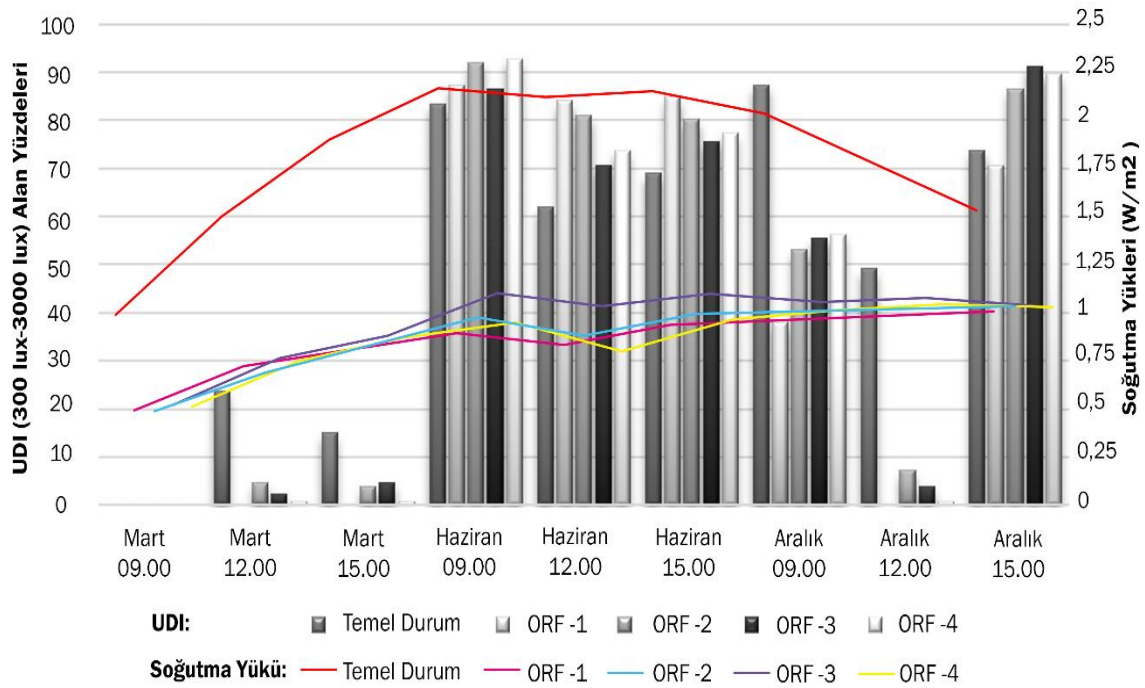


Şekil 4.25. Temel durum için ısıtma yüklerinin yıl boyunca dağılımı.

Şekil 4.26'da referans oda ve ORF tiplerine ait soğutma enerjisi tüketimleri grafiksel olarak verildi. Saat 8.00 ile 12.00 arası ve sonrasında 13.00 ile 15.00 arasında soğutma yüklerinde gözlenen artış, hava sıcaklığı ve güneş ışınım şiddetinin artışıyla doğru orantılıdır.



Şekil 4.26. Temel durum ve ORF modüllerinin soğutma yüklerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.27. Temel durum ve ORF modüllerinin soğutma yüklerinin ve UDI aydınlık düzeyi yüzdelerinin karşılaştırılması.

Bütün vakalar için saat 12.00'da tüketimin azalması öğle arası verilmesi ile bağdaştırılabilir. Referans odaya ait tüketim en fazla 11.00'da 2,18 W/m² ile olmaktadır. ORF modüllere ait tüketim en fazla 15.00 saatinde görülmektedir. Referans odada 15.00'a ait tüketim 1,79 W/m²'dir. Referans odayı 1,08 W/m² ile ORF-3, 1,06 W/m² ile ORF-2,

1,05 W/m² ile ORF-4, 1,01 W/m² ile ORF-1 izlemektedir. Şekil 4.27’de temel durum ve ORF modüllerinin soğutma yüklerinin ve UDI aydınlık düzeyi yüzdelerinin karşılaştırılması verildi.

Bütün saat aralıklarına bakıldığında soğutma yükünün en yüksek olduğu durum temel durumdur (Şekil 27). Referans odanın önünde herhangi bir gölgeleme bileşeni olmadığı için cam yüzeyine gelen güneş ışıınının yüksek bir oranı iç ortama geçerek ısınmaya sebep olmaktadır. Bu da dolayısıyla soğutma enerjisinde artışa sebep olmaktadır. Soğutma yüklerinin dış ortam hava sıcaklığı ve güneş ışıının şiddetindeki artışa bağlı olarak en yüksek seviyeye ulaştığı 13.00 ile 15.00 saatleridir. Soğutma yükleri açısından en yüksek performans gösteren vaka ORF-1 modülü olup en düşük performansı gösteren vaka ORF-3 modülüdür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son 50 yılda, endüstriyel gelişme ve nüfus artışı nedeniyle küresel enerji talebinde büyük bir artış görülmektedir. Bu nedenle, enerji verimliliğindeki gelişmeler hem tasarımcılar hem de araştırmacılar için önemli bir gereklilik haline gelmektedir. Mimari tasarım ve pratiğindeki dönüşüm ve değişimin en baskın nedenlerinden biri olan bilişim teknolojileri alanındaki teknolojik gelişmelerle birlikte mimarlık farklı bir boyuta geçmektedir. Mimarlar, değişen çevresel faktörleri göz önünde bulundurarak her zaman kullanıcıların ihtiyaç ve taleplerine cevap vermeye çalışmaktadır ve günümüz teknolojisi, mimarlara yeni bir yanıt düzeyi sağlamak için tasarımda esneklik sunmaktadır. Bununla beraber teknolojideki gelişmeler, belirlenen bir işleve göre otomatik olarak kontrol edilebilen dönüştürülebilir yapıların ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Bu uyarlanabilir cephe sistemleri özellikle sıcak iklim bölgelerinde gittikçe önem kazanmaktadır. Küresel ısınmanın da gittikçe artış eğilimi gösterdiği ve fosil yakıta dayalı enerji kaynaklarında tasarruf gerekliliği düşünüldüğünde, yapı sektöründe yenilikçi fikirlere ihtiyaç olduğu görülmektedir. Algoritmik yöntemler, dijital modelleme ve parametrik tasarım araçlarının geliştirilmesi, bu ilerlemenin ve uyarlanabilir sistemli cephe oluşumunun geliştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Duyarlı cepheye sahip yapılar ise çevreden aldıkları veriye veya sağlayacakları fonksiyona göre hareketlilik göstermektedir. Cephe değiştiğinde, oluşturduğu çevre etkisi de değişmektedir. Dolayısıyla çevrenin de bu etkiye karşı göstereceği bir tepki olmalıdır. Bu etki ve tepkinin de zamana bağlı olarak tasarlanıp programlanması gerekmektedir.

Parametrik tasarım ile duyarlı sistemler iklimlendirme, enerji verimliliği ve konfor koşullarının araştırılması gibi ana ilkeleri tespit etmek için daha fazla görünürlük sağlamaktadır. Bu nedenle üretken, parametrik ve hızlı form bulma yöntemi dinamik çevresel uyaranlara daha fazla uyum sağlama için bir çözüm olarak görülmektedir.

Uyarlanabilir cephe tasarlamının yolu çok çeşitlidir. Önemli olan çevresel etkilere dinamik bir şekilde karşılık verebilecek yenilikçi bir cephe tasarımı geliştirebilmektir. Parametrik ve üretken form bulma döngüsünü keşfetmek, duyarlı cepheyi etkileyen önemli parametreler bulmak için önemi bir fırsattır. Çeşitli modelleme yöntemleriyle interaktif cephe geometrisi için yüksek performanslı, ayarlanabilir ve benzersiz

alternatiflere sahip farklı geometrilerdeki cephe tasarımlarına ulaşılabilir. İstenilen kriterlere uygun olan form seçilerek en uygun uyarlanabilir ve duyarlı cephe sistemi oluşturulabilmektedir. Parametrik tasarım etkisi ile yapılan çalışmalar tasarım sürecinde morfodinamik (kullanıcı tanımlı kısım) ve morfogenetik (otomatik kısım) perspektiflerin birlikte kullanımına dayanmaktadır. Böylece, kullanıcı tanımlı parametreler ile dijital tasarım araçları entegre edilerek tasarımın sınırlarının genişlemesine, yeni tasarım yöntemlerinin denenmesine, yeni inşaat tekniklerinin geliştirilmesine ve böylece tasarım dünyasının teorik ve pratikte yenilikçi gelişmesine neden olabilmektedirler.

Bu çalışmada önceki çalışmaların boşlukları ve potansiyellerini dikkate alarak, farklı katlanma şekillerine sahip, önerilen origami tabanlı duyarlı modül tipleri ile güneş zamanlaması ve kullanıcı konumlarına göre gün ışığı değerleri ve dış görüş memnuniyetini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ele alınan modüller, çevresel etkilere karşı dinamik cevaplar vererek kendini çevreye uyarlayan ve böylelikle iç mekân konfor koşullarını sağlarken enerji ihtiyacını minimuma indiren duyarlı cephe modül çalışmalarıdır. Bu tasarımların sonucunda enerji korunumu sağlayarak sürdürülebilir mimarlığın oluşturulmasına katkıda bulunurlar.

Bu bağlamda, araştırmaya uyarlanabilir ve duyarlı cephelerin tanımı yapılarak başlandı. Duyarlı cephelerin işlevi ve amacı üzerine araştırmalar yapılarak potansiyeli belirlendi. Sistemlerin işleyişi belirlenerek bu özellikler üzerinden sistemlere etki eden etmenler belirlendi. Ardından origami ve genel özellikleri, terimleri ve katlama desenleri araştırıldı. Bu bilgiler dahilinde inşa edilmiş ya da literatüre katkıda bulunmak için yapılmış origamiden ilham alan duyarlı cephe özelliği gösteren yapı kabukları incelendi. Literatürde origami ve duyarlı cephe üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde parametrik tasarım araçlarından en çok Rhinoceros'un eklentisi olan Grasshopper'ın kullanıldığı gözlemlendi. Grasshopper'ın çevresel analiz eklentisi olan ClimateStudio, ara yüzünün diğer çevresel eklentilere göre daha kullanışlı olması nedeniyle tercih edildi.

Çalışmanın başında amaçlanan görsel konforunda (yani iç mekân aydınlatma seviyelerinde ve dış görüş memnuniyetinde) minimum azalma ile güneş ısı kazancını artırmayı sağlayabilmek için öncelikle gölgeleme elamanlarında en az mekanik malzemenin kullanımının gerçekleştirilmesi için cephe gölgeleme elemanı tasarımında

origami tekniklerinden faydalanıldı. Origami teknikleri kullanılarak tasarlanan cephe modülleri, tek seferde katlanabilen ve açılabilen kolay bir mekanizmaya sahip olması ve daha az enerji ile çalışması nedeniyle çalışmada tercih edildi. Ayrıca duyarlı bir cephede dış görünüm memnuniyetini sağlamak sadece güneşi değil, kullanıcı konumunu da cepheyi değiştiren parametrelere dahil ederek gerçekleştirilebileceği düşünüldüğünden kullanıcı katılımları da simülasyon ve analizlere dahil edildi.

Çalışma kapsamında, ORF modüllerinin parametrik tasarım araçlarıyla görsel ve termal performansı, Kartal/İstanbul iklim koşullarında 21 Mart, 21 Haziran ve 21 Aralık günleri baz alınarak bir ofis binası için değerlendirildi. Açık gökyüzü tipi olan ‘ClearSkyWithSun’ gökyüzü modeli seçilerek, 9.00, 12.00 ve 15.00 saatlerinde güney yönüne bakan ofis birimi için saatlik değerlendirme yapıldı.

Günüşığı performansı ve duyarlı cephe fonksiyonundan elde edilen gün ışığının kontrolü, özellikle termal ve görsel konfor olmak üzere iç ortam kalitesini iyileştiren dikkate değer faktörlerdir. Parametrik tasarımda kullanılan görsel ve termal konforu değerlendirmek için ölçülebilir metriklerin kullanılması, parametrik cephe konfigürasyonunun yenilenme sürecini hızlandırmaktadır ve değerlendirilmesini sağlamaktadır. Görsel konforun sağlanması için dikkat edilmesi gereken ısı kazanımları ve görsel rahatsızlık (gün ışığı parlaması), gün ışığının faydalı değerler içerisinde bulunması ve dış görüş memnuniyetini engellememesi gibi bazı faktörler bulunmaktadır. Geometri, yönelimler, pencere duvar oranı, cam malzemesi, renk, yansıtma ve yayma gücü arasında denge kurmak, görsel konforu iyileştirmeye yarayan, birlike değerlendirilmesi gereken faktörlerdir. Önerilen cephenin görsel performans kriterlerini karşılayıp karşılamadığını anlayabilmek için ise Gün Işığı Özerkliği (DA), Gün Işığında Parlama Olasılığı (DGP), Faydalı Gün Işığı Aydınlatması (UDI), Faydalı Gün Işığı Aydınlatması Aşma Değeri (UDI Overlit) ölçümleri kullanılarak analizler gerçekleştirildi.

Görsel konforun gerçekleştirilebilmesi için gün ışığı değerleri, parlama olasılıkları, gün ışığının mekânda nasıl dağıldığı gibi faktörler birlikte değerlendirilmelidir. Ayrıca tasarlanacak gölgeleme elemanları hem güneşten koruyacak hem de faydalı gün ışığının girmesine izin verecek şekilde olmalıdır. Bunun için tasarlanan origami tabanlı duyarlı cephe modülleri ışık geçişine izin verebilmek için 3 boyutlu olarak oluşturuldu. Katlanma hareketleri belirlenen ORF-1, ORF-2, ORF-3 ve ORF-4 modül tiplerinin uyum gösterme

özellikleri belirlendi ve Grasshopper’da modellendi. Görsel performans ve termal performans değerlendirme ölçütleri referans olarak alınan standartlara göre belirlenerek simülasyon metodolojisi tamamlandı, güney yönüne bakan bir ofis birimi üzerinden simülasyonlar yapıp değerlendirildi. Simülasyon sonuçlarına göre aşağıda yer alan bulgulara ulaşıldı.

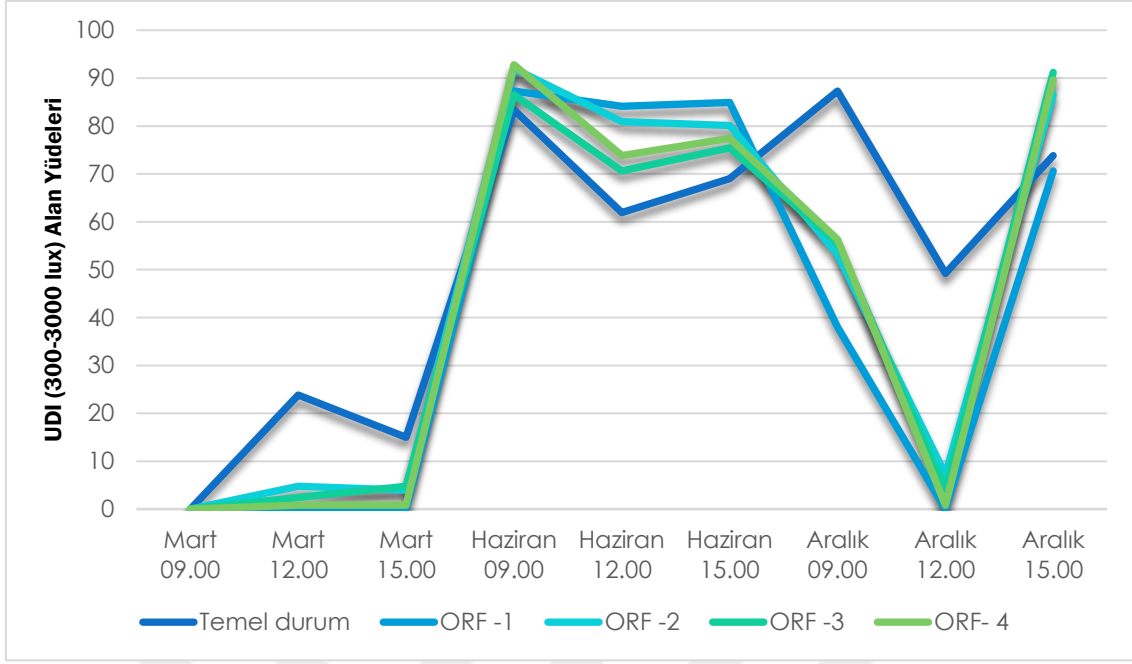
Görsel performans sonuçları için ORF modüllerinin görsel performansları referans oda üzerinden karşılaştırmalar yapılarak değerlendirildi. Görsel performans değerlendirilmesinde aydınlık düzeylerine, DGP kamaşma değerine ve mekân içindeki aydınlık dağılımlarına bakıldı. Karşılaştırmaların yapılabilmesi için temel durum, ORF-1, ORF-2, ORF-3 ve ORF-4 modüllerinin UDI yüzdeleri arasındaki ve kullanıcıların teker teker sahip oldukları kamaşma değerleri arasındaki ilişkileri gösteren değerler tablolaştırıldı (Şekil 5.1, 5.2, 5.3, 5.4). Ve 21 Mart (Şekil 5.6), 21 Haziran (Şekil 5.7) ve 21 Aralık (Şekil 5.8) tarihlerinde tüm durumlar için ofis odasının kamaşma düzeyi dağılımları bir arada verildi. Aynı şekilde 21 Mart (Şekil 5.9), 21 Haziran (Şekil 5.10) ve 21 Aralık (Şekil 5.11) tarihlerinde tüm durumlar için ofis odasının aydınlık düzeyi dağılımları da bir arada verildi.

- Önünde hiçbir gölgeleme bileşeni olmaması sebebiyle 12.00 ve 15.00 saatlerinde EUDI alan yüzdeleri referans oda için artış gösterdiği gözlemlendi.
- ORF-1 modülü mart ayında UDI değerine sahip olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi de modül katlanma şeklinden dolayı cephenin kapanması durumundan kaynaklıdır. Ulaşılmak istenen modül tasarımı hem fazla gelen gün ışığını engelleyecek hem de iç ve dış mekân görünürlüğünü engellemeyecek şekilde olmalıdır.
- ORF-1 ve ORF-2 benzer UDI değerlerine sahip olmasına rağmen ORF-1, ORF-2’den daha iyi görsel performansa sahiptir çünkü ORF-2 kamaşma açısından daha kötü performans sergiledi.
- UDI değerlerine bakıldığında (Şekil 5.1), mekâna giren ışığın en faydalı olduğu durumlar en çok ORF-4 modülünde daha sonra da ORF-3 modülünde gözlemlendi.
- Algılanabilir aralıklardaki değeri en çok olan modül ORF-4 olmasına rağmen dayanılmaz bölgede bulunan vaka sayısı ORF-1 ve ORF-2 modülüne göre fazladır.

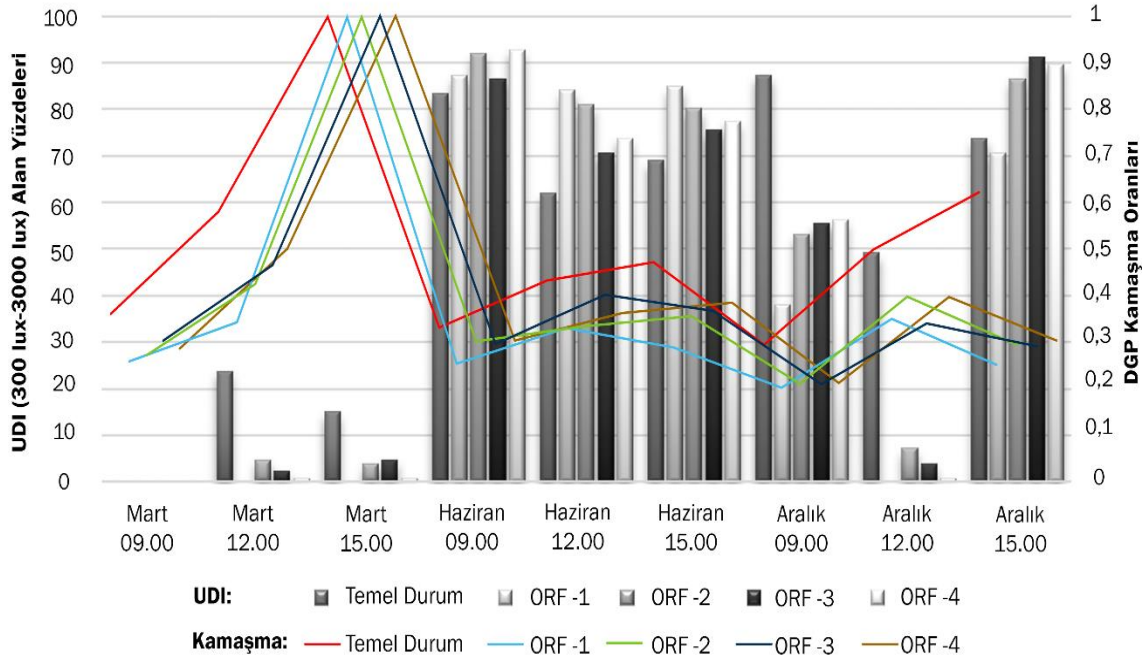
- Kullanıcı 1 için modüller değerlendirildiğinde (Şekil 5.2) bütün modül tiplerinde de 21 Mart 15.00 tarihinde kamaşma gözlenmektedir. UDI değerlerine bakıldığında (Tablo 5.4, 5.5, 5.6) optimum çözüm ORF -1 modülü gibi gözüke de DGP (Tablo 5.1, 5.2, 5.3) değerleri ile birlikte değerlendirildiğinde Kullanıcı 1 için en optimal çözüm ORF-4 modülüdür.
- Kullanıcı 2 için modüller değerlendirildiğinde (Şekil 5.3) 21 Mart 12.00 tarihinde bütün modül tiplerinde kamaşma gözlenmektedir. Bununla beraber ORF-4 modülünde 21 Aralık 09.00 ve ORF-3 ve ORF-2 modüllerinde 21 Mart 12.00 tarihlerinde de kamaşma yaşanmaktadır. UDI (Tablo 5.4, 5.5, 5.6) ve DGP (Tablo 5.1, 5.2, 5.3) değerleri birlikte değerlendirildiğinde Kullanıcı 2 için en optimal çözüm ORF-4 modülüdür.
- Kullanıcı 3 için modüller değerlendirildiğinde (Şekil 5.4) ORF-1 modülünde 21 Aralık 15.00 tarihinde kamaşma gözlenmektedir. Kullanıcı 4 hiçbir durumda kamaşmaya maruz kalmamaktadır (Şekil 5.5). Konumları camdan uzak olduğu için temel durum harici tüm ORF tipleri bu kullanıcılar için uygundur.
- Bütün tipler değerlendirildiğinde ofis odası için en iyi görsel performansı sağlayan ORF-4 modülüdür. ORF-4 modülü için dayanılmaz (%45-100) bölgede bulunan 4 vaka gözlemlendi. Bu durum tolere edilebilir düzeydedir.
- Simülasyon sonuçları, temel duruma kıyasla gün ışığı performansını iyileştirmek için kinetik etkileşimli origami tabanlı cephelerin yüksek performansını doğrulamaktadır. Origami tabanlı modüler elemanlar şeklindeki pileli katlama hareketi ile cephe için hiyerarşik konfigürasyonlar ve kendi kendini gölgeleyen geometri sağlayarak gelişmiş görsel konfor sağlamaktadırlar.

Enerji performans sonuçlarına ulaşabilmek için çalışmada güney yönüne bakan ofis birimi için sadece soğutma yüklerine bakıldı.

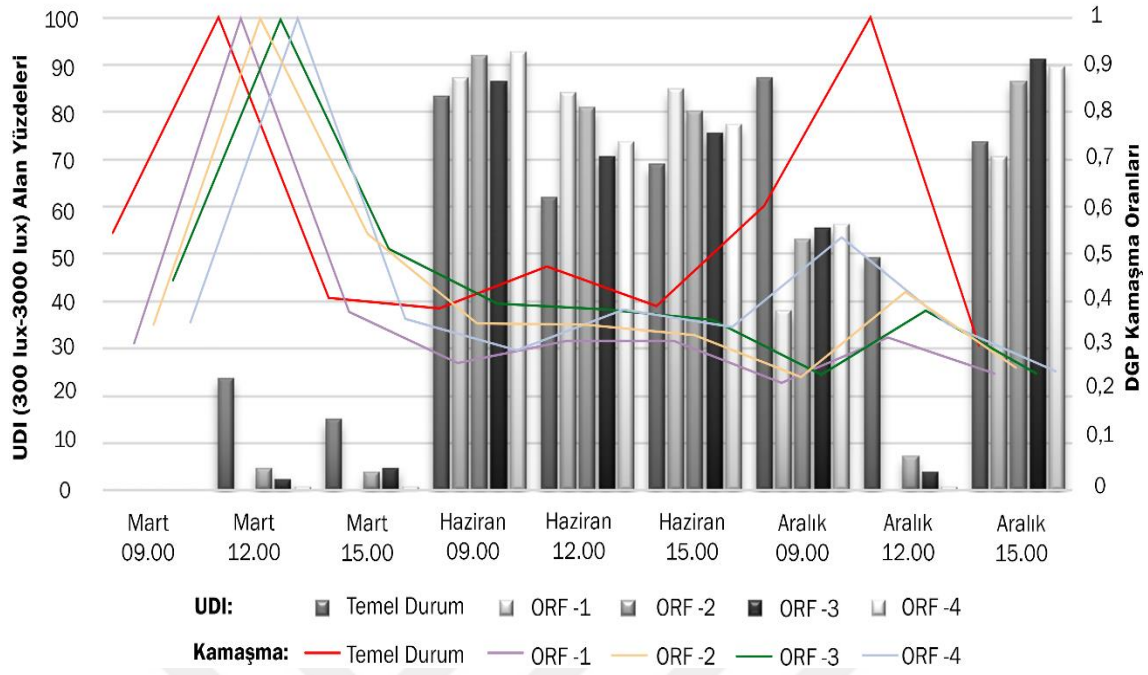
- Bütün saat aralıklarına bakıldığında soğutma yükünün en yüksek olduğu durum referans odadır.
- Soğutma yüklerinin dış ortam hava sıcaklığı ve güneş ışıınım şiddetindeki artışa bağlı olarak en yüksek seviyeye ulaştığı 11.00 ile 15.00 saatleri arasındır.
- Referans odaya ait tüketim en fazla 11.00’da 2,18 W/m²’dir. ORF modüllere ait tüketim en fazla 15.00 saatinde görülmektedir. Referans odada 15.00’a ait tüketim



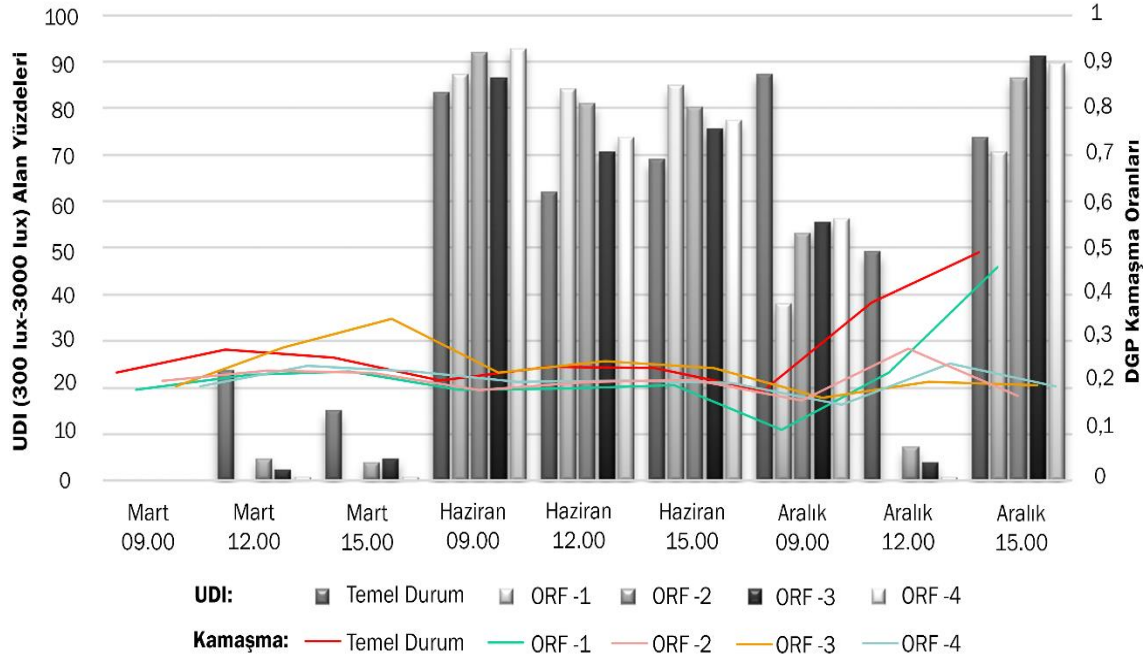
Şekil 5.1. Temel durum, ORF-1, ORF-2, ORF-3 ve ORF-4 modüllerinin UDI yüzdeleri arasındaki ilişki.



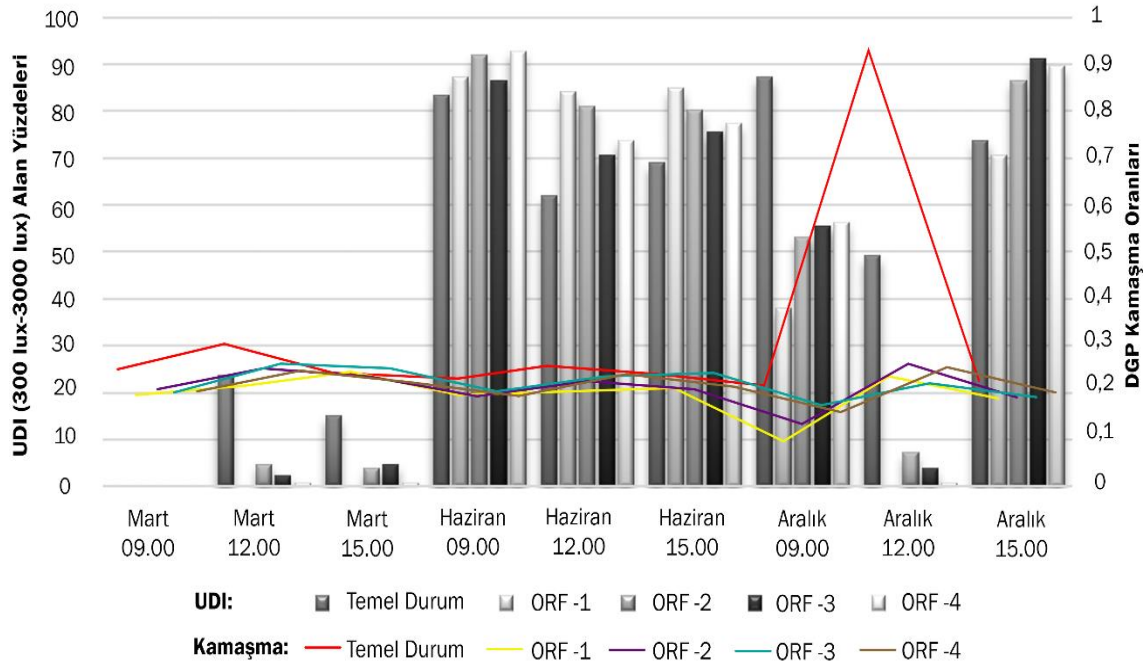
Şekil 5.2. Temel durum, ORF-1, ORF-2, ORF-3 ve ORF-4 modüllerinin UDI yüzdeleri arasındaki ve kullanıcı 1'in kamaşma değerleri arasındaki ilişki.



Şekil 5.3. Temel durum, ORF-1, ORF-2, ORF-3 ve ORF-4 modüllerinin UDI yüzdeleri arasındaki ve kullanıcı 2'nin kamaşma değerleri arasındaki ilişki.



Şekil 5.4. Temel durum, ORF-1, ORF-2, ORF-3 ve ORF-4 modüllerinin UDI yüzdeleri arasındaki ve kullanıcı 3'ün kamaşma değerleri arasındaki ilişki.

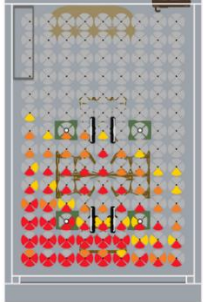
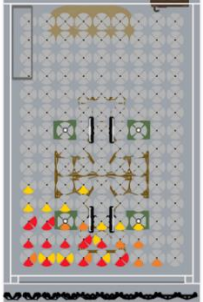
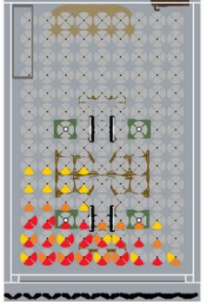
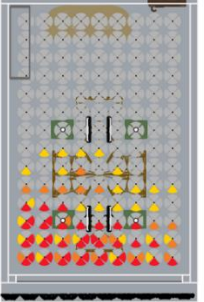
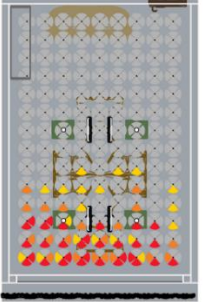
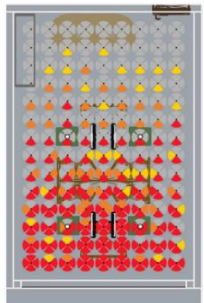
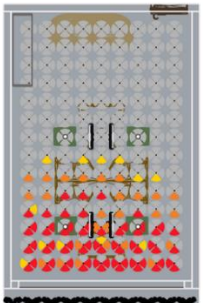
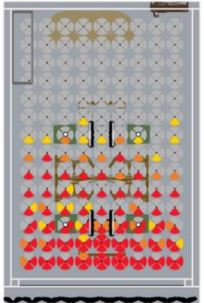
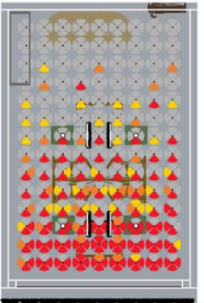
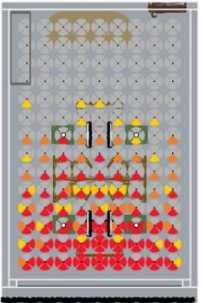
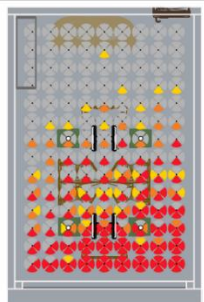
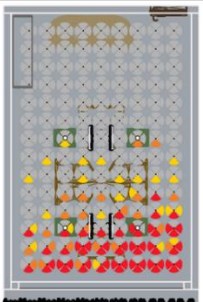
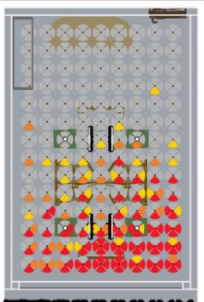
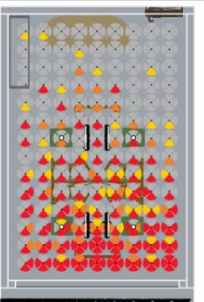
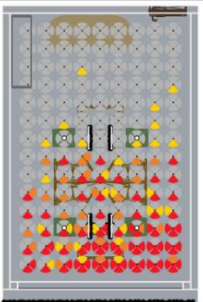


Şekil 5.5. Temel durum, ORF-1, ORF-2, ORF-3 ve ORF-4 modüllerinin UDI yüzdeleri arasındaki ve kullanıcı 4'ün kamaşma değerleri arasındaki ilişki.

- 1,79 W/m²'dir. Referans odayı 1,08 W/m² ile ORF-3, 1,06 W/m² ile ORF-2, 1,05 W/m² ile ORF-3, 1,01 W/m² ile ORF-1 izlemektedir.
- Tüm tipler arasından en iyi görsel performansı gösteren ORF-4, ORF-1'den sonra en az soğutma yüküne sahip olduğu görülmektedir.
- ORF-4'ün ORF-1'e göre daha fazla soğutma enerjisi harcadığı görülmektedir.
- En iyi görsel performansa sahip olan ORF-4 modülü daha kötü performans gösteren ORF-1 modülüne göre daha fazla soğutma yüküne sahip olduğu görülmektedir.
- Tüm ORF modülleri arasından ORF-3 en fazla soğutma yüküne sahip olan tip olduğu anlaşılmaktadır.

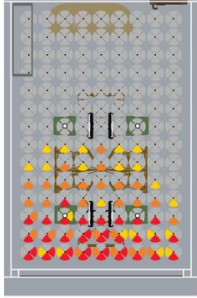
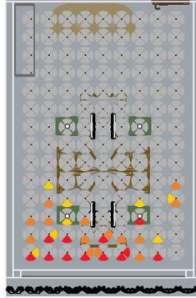
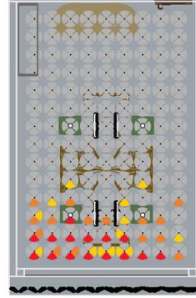
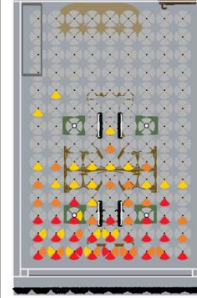
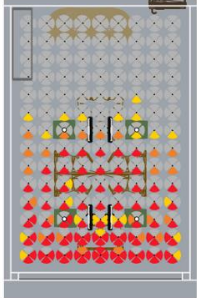
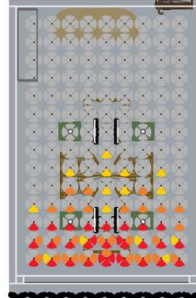
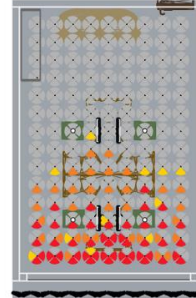
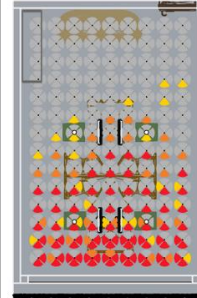
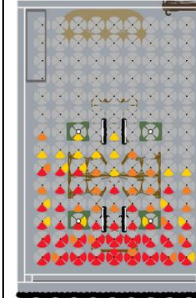
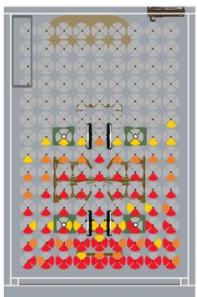
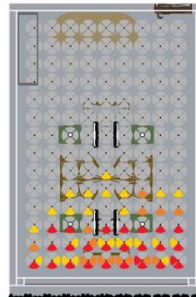
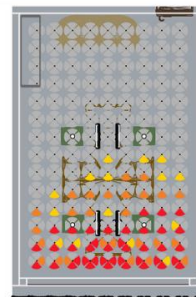
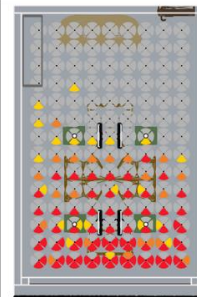
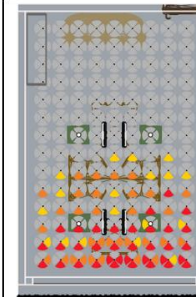
Hem görsel performans hem de termal performans değerlendirildiğinde ofis odası için ORF-4 en iyi performansı gösteren tip olduğu söylenebilmektedir. ORF-4 modülü çalışmanın hedefi olan parlamayı önleyerek faydalı gün ışığının girmesine izin veren ve bunu yaparken dış görüş memnuniyetini engellemeyen bir gölgeleme sunmaktadır. İçeriye giren fazla güneş ışığını azaltırken dış ortamın görünürlüğünün engellenmemesi amaçlanan sıcak ve nemli ortamlarda bulunan binalarda ORF-4 modülüne sahip gölgeleme elemanları kullanılabilir.

Tablo 5.1. 21 Mart tarihinde tüm durumlar için ofis odasının kamaşma düzeyi dağılımları.

Ofis Saatleri	Kamaşma Düzeyi Dağılımları				
Senaryo	Temel Durum	ORF 1	ORF 2	ORF 3	ORF 4
21 Mart 09.00					
21 Mart 12.00					
21 Mart 15.00					

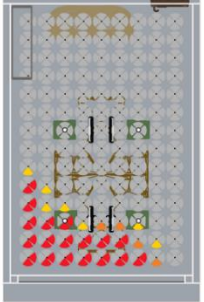
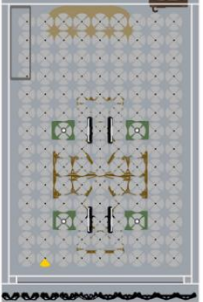
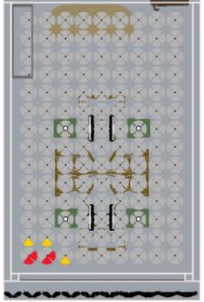
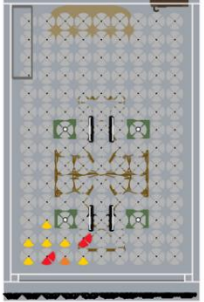
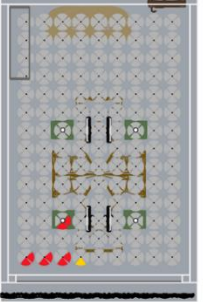
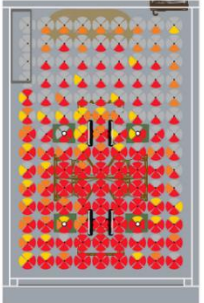
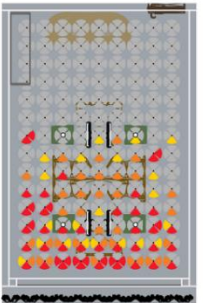
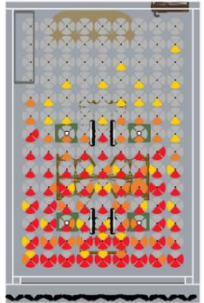
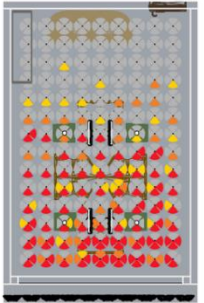
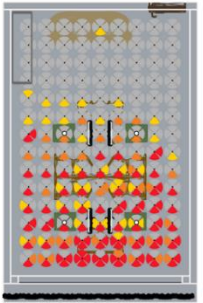
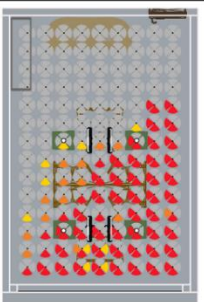
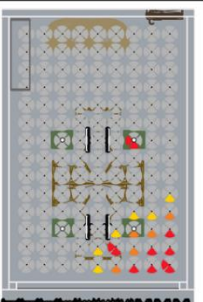
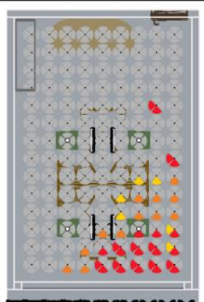
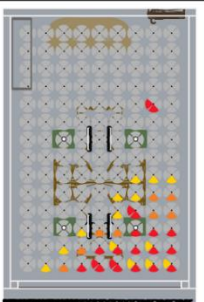
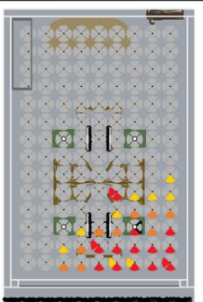
ALGILANAMAZ
 ALGILANABİLİR
 RAHATSIZ EDİCİ
 DAYANILMAZ

Tablo 5.2. 21 Haziran tarihinde tüm durumlar için ofis odasının kamaşma düzeyi dağılımları.

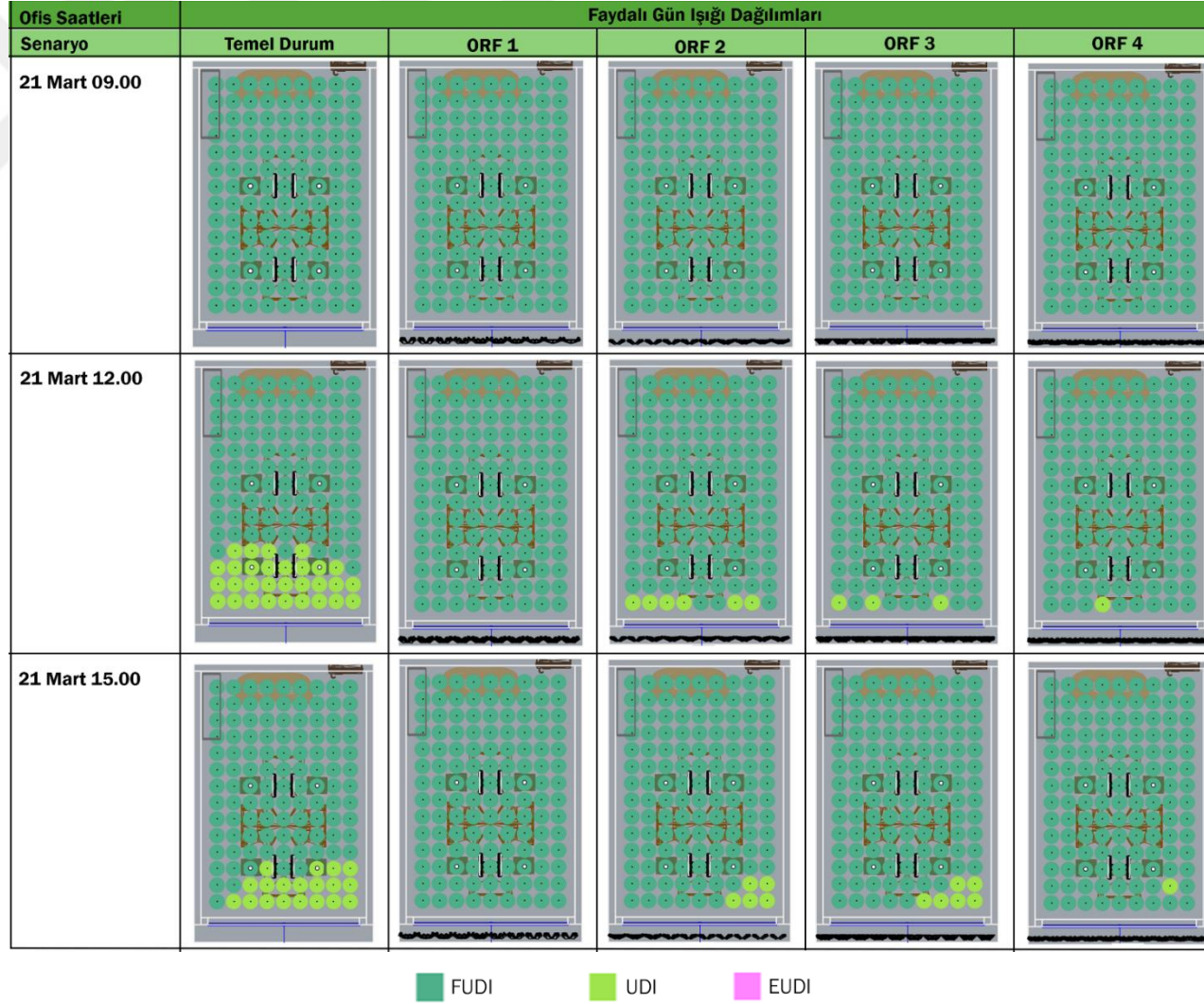
Ofis Saatleri	Kamaşma Düzeyi Dağılımları				
Senaryo	Temel Durum	ORF 1	ORF 2	ORF 3	ORF 4
21 Haziran 09.00					
21 Haziran 12.00					
21 Haziran 15.00					

ALGILANAMAZ
 ALGILANABİLİR
 RAHATSIZ EDİCİ
 DAYANILMAZ

Tablo 5.3. 21 Aralık tarihinde tüm durumlar için ofis odasının kamaşma düzeyi dağılımları.

Ofis Saatleri	Kamaşma Düzeyi Dağılımları				
Senaryo	Temel Durum	ORF 1	ORF 2	ORF 3	ORF 4
21 Aralık 09.00					
21 Aralık 12.00					
21 Aralık 15.00					
 ALGILANAMAZ ALGILANABİLİR RAHATSIZ EDİCİ DAYANILMAZ					

Tablo 5.4. 21 Mart tarihinde tüm durumlar için ofis odasının aydınlık düzeyi dağılımları.



Tablo 5.5. 21 Haziran tarihinde tüm durumlar için ofis odasının aydınlık düzeyi dağılımları.

Ofis Saatleri	Faydalı Gün Işığı Dağılımları				
Senaryo	Temel Durum	ORF 1	ORF 2	ORF 3	ORF 4
21 Haziran 09.00					
21 Haziran 12.00					
21 Haziran 15.00					

■ FUDI
 ■ UDI
 ■ EUDI

Tablo 5.6. 21 Aralık tarihinde tüm durumlar için ofis odasının aydınlık düzeyi dağılımları.



Sonuç olarak, çalışma kapsamında amaçlanan görünürlüğü engellemeden gün ışığından maksimum fayda sağlama amacı origami tabanlı modüller ile cephenin gün ışığı performansını iyileştirmek için tatmin edici geri bildirimler göstermektedir. Origamiden esinlenen modüllerin sağladığı dönüştürülebilir bina cephe tasarımının, bina sakinlerinin termal, aydınlatma ve görsel konforunun yanı sıra estetik, mahremiyet, psikolojik etkiler, dışarıyı görme gibi işlevleriyle birlikte, yapılı çevrenin enerji performansı ve sürdürülebilirliğinde de önemli bir rol oynadığı görüldü. Origamiden esinlenen duyarlı bina cepheleri, geleneksel statik bina cephelerine kıyasla çevresel performansı canlandıran ve kullanıcıların hem görsel konforunu hem de dış görüş memnuniyetini artıran gerçek zamanlı bir yeniden yapılandırma süreci sağlayabilmektedir.

Gelecekteki araştırmalar, origami modülünün bina yüzeyinde doğrudan uygulama sağlayacak şekilde yüzey konfigürasyonları ve malzemelerinin birlikte çalışılması ile gelişmiş gölgeleme teknolojilerini değerlendirmek için teşvik edilebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, M. M., Abdel-Rahman, A. K., Bady, M., & Mahrous, E. (2016). The thermal performance of residential building integrated with adaptive kinetic shading system. *International Energy Journal*, 16(3).
- Ahmed, S. H. E., Kamel, A. S., & Mahmoud, W. R. (2020). Methodology for Using Origami in Designing Deployable Shelters. *Journal of Design Sciences and Applied Arts*, 1(2), 20-37.
- Baerlecken, D., Swarts, M., Gentry, R., & Wonoto, N. (2012). Bio-Origami: Form finding and evaluation of origami structures.
- Bakker, L. G., Hoes-van Oeffelen, E. C. M., Loonen, R. C. G. M., & Hensen, J. L. (2014). User satisfaction and interaction with automated dynamic facades: A pilot study. *Building and Environment*, 78, 44-52.
- Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic architecture. *Procedia Engineering*, 155, 275-284.
- Bui, D. K., Nguyen, T. N., Ghazlan, A., Ngo, N. T., & Ngo, T. D. (2020). Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach. *Applied energy*, 265, 114797. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114797>
- Buri, H., Weinand, Y. (2008). Origami-folded plate structures, architecture. In: Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering. Miyazaki: Engineered Wood Products Association.
- Cai, J., Meloni, M., Zhang, Q., Sang-Hoon Lee, D., Li, M., Ma, R., ... & Feng, J. (2021). Engineering Origami: A comprehensive review of recent applications, design methods, and tools. *Advanced Science*, 8(13), 2000636.
- Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F., & Pagliano, L. (2015). A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and sustainable energy reviews*, 47, 1016-1033.
- Charpentier, V., Meggers, F., Adriaenssens, S., & Baverel, O. (2020). Occupant-centered optimization framework to evaluate and design new dynamic shading typologies. *PloS one*, 15(4), e0231554.
- Chen, Y., Feng, H., Ma, J., Peng, R., & You, Z. (2016). Symmetric waterbomb origami. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 472(2190), 20150846.

- Chudoba, R., van der Woerd, J., & Hegger, J. (2014). Numerical Modeling Support for Form-Finding and Manufacturing of Folded-Plate Structures Made of Cementitious Composites Using Origami Principles. *Comput. Model. Concr. Struct.*, 1, 451-461.
- Chen, Y., Yan, J., & Feng, J. (2019). Geometric and kinematic analyses and novel characteristics of origami-inspired structures. *Symmetry*, 11(9), 1101. <https://doi.org/10.3390/sym11091101>
- ClimateStudio. (2022). Advanced daylighting, electric lighting, and conceptual thermal analysis. <https://www.solemma.com/climatestudio>
- Cimmino, M. C., Miranda, R., Sicignano, E., Ferreira, A. J. M., Skelton, R. E., & Fraternali, F. (2017). Composite solar façades and wind generators with tensegrity architecture. *Composites Part B: Engineering*, 115, 275-281. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.077
- Chu, K. (2006). Metaphysics of genetic architecture and computation. *Architectural Design*, 76(4), 38-45.
- Curletto, G. (2016). Rigid-foldable origami structures: parametric modelling with grasshopper. *Geometric and Structural Issues, Lisbon, Portugal, sn*.
- Çavuş, Ö. (2019). Learning from folding for design in kinetic structures in architecture, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 593164
- Edmondson, B. J. (2015). Development of a thickness accommodation technique for origami-inspired design. Brigham Young University.
- Elmokadem, A., Ekram, M., Waseef, A., & Nashaat, B. (2018). Kinetic architecture: Concepts, History and applications. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 7(4), 750-758.
- Elzeyadi, I. (2017). The impacts of dynamic façade shading typologies on building energy performance and occupant's multi-comfort. *Architectural science review*, 60(4), 316-324. <http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2017.1337558>
- Eltaweel, A., & Su, Y. (2017). Parametric design and daylighting: a literature review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73, 1086-1103. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.011>
- Ergin, Ö. (2019). Uyarlanabilir cephe sistemlerinde güncel yaklaşımlar ve akıllı malzemelerin kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 606170.
- Erturan, B. (2010). Akıllı cephe tasarım ilkeleri ve uygulama örneklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul, 276724.

- Food4rhino, a.(2022). Kangaroo Physics.
<https://www.food4rhino.com/en/app/kangaroo-physics>
- Food4rhino, b. (2022). Ladybug Tools. <https://www.food4rhino.com/en/app/ladybug-tools>
- Foschi, R. (2019). Algorithmic Modelling of Folded Surfaces. Analysis and Design of Folded Surfaces in Architecture and Manufacturing.
- Fouad, S. M. A. E. (2012). Design methodology: Kinetic architecture. Architectural Engineering, Alexandria University.
- Gilewski, W., Pełczyński, J., Stawarz, P. (2014). A comparative study of origami inspired folded plates. *Proc. Eng.* 91, 220-225.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.050>
- Giselbrecht, E. (2004). Architekturbüro Ernst Giselbrecht. Austrian Architects Practice, Europe, <https://www.e-architect.com/architects/ernst-giselbrecht-partner>
- Grobman, Y. J., Capeluto, I. G., & Austern, G. (2017). External shading in buildings: comparative analysis of daylighting performance in static and kinetic operation scenarios. *Architectural science review*, 60(2), 126-136.
- Güncü, A., & Kurnuç Seyhan, A., (2013). Güneş Enerjisine Dayalı Yenilikçi Kinetik Yapı Kabuğu Uygulamaları . I.Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimlerinde Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu (ISITES2013), 1292-1302, Sakarya, Türkiye
- Harper, D. (2004). Online Etymology Dictionary. November 2001. Online Etymology Dictionary.
- Heidari Matin, N., Eydgahi, A., & Shyu, S. (2017). Comparative analysis of technologies used in responsive building facades. In *2017 ASEE Annual Conference & Exposition*. DOI: 10.18260/1-2-28052.
- Heidari Matin, N., & Eydgahi, A. (2020). Factors affecting the design and development of responsive facades: a historical evolution. *Intelligent buildings international*, 12(4), 257-270.
- Hemmerling, M. (2010). Origamics: Digital Folding Strategies in Architecture. ASCAAD 2010. Fez (Morocco).
- Hoff, N. J. (1966). The perplexing behavior of thin circular cylindrical shells in axial compression. Stanford Univ Ca Dept Of Aeronautics And Astronautics.
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Guerra-Santin, O. (2019b). Interactive kinetic facade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by

2D and 3D shape changes, *Building and Environment* 165, 1-15.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106396>

Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Rosemannb, A., Schröderc, T, Lichtenberg, J. (2019a). A morphological approach for kinetic facade design process to improve visual and thermal comfort: Review, *Building and Environment* 153, 186–204.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.040>

Ibrahim, J. A., & Alibaba, H. Z. (2019). Kinetic Facade as a Tool for energy Efficiency. *Int. J. Eng. Res. Rev*, 7, 1-7.

Jackson, P. (2011). Folding techniques for designers: from sheet to form. Hachette UK.

Juaristi, M., Loonen, R., Isaia, F., Gómez-Acebo, T., & Monge-Barrio, A. (2020). Dynamic Climate Analysis for early design stages: a new methodological approach to detect preferable Adaptive Opaque Façade Responses. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102232.

Karanouh, A., & Kerber, E. (2015). Innovations in dynamic architecture. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(2), 185-221.

Keskin, G. (2008). Dijital form türetici (froebel form türetici) ile bir konut yerleşkesinin tasarım süreci, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 237187.

Khosromanesh, R., & Asefi, M. (2019). Form-finding mechanism derived from plant movement in response to environmental conditions for building envelopes. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101782.

Kılıç Kızıltaş, P. (2019). Fotovoltaik sistemler ve güneşe uyartılabilir cephe sistemlerinin enerji etkinlik yönünden değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul, 605237.

Larsen Architects (2004) : <https://henninglarsen.com/en/projects/0900-0999/0942-sdu-campus-kolding>

Le-Thanh, L., Le-Duc, T., Ngo-Minh, H., Nguyen, Q. H., & Nguyen-Xuan, H. (2021). Optimal design of an Origami-inspired kinetic facade by balancing composite motion optimization for improving daylight performance and energy efficiency. *Energy*, 219, 119557.

Li, S., & Wang, K. W. (2015). Fluidic origami: a plant-inspired adaptive structure with shape morphing and stiffness tuning. *Smart Materials and Structures*, 24(10), 105031.

Li, S., Fang, H., Sadeghi, S., Bhovad, P., & Wang, K. W. (2019). Architected origami materials: How folding creates sophisticated mechanical properties. *Advanced materials*, 31(5), 1805282. <https://doi.org/10.1002/adma.201805282>

- Li, S., Stampfli, J. J., Xu, H. J., Malkin, E., Diaz, E. V., Rus, D., & Wood, R. J. (2019, May). A vacuum-driven origami “magic-ball” soft gripper. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 7401-7408. IEEE.
- Lomholt, I. (2016). Biocatalysis Lab building – Dynamic Facade. Retrieved 25 Nov., 2016, <http://www.e-architect.co.uk/austria/biocatalysis-technical-university-graz>
- Loonen, R. C., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, 483-493.
- Lucarelli, C. D., & Carlo, J. C. (2020). Parametric modeling simulation for an origami shaped canopy. *Frontiers of Architectural Research*, 9(1), 67-81.
- Ma, J., & You, Z. (2014, August). Modelling of the waterbomb origami pattern and its applications. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 46377, p. V05BT08A047). American Society of Mechanical Engineers.
- Mahmoud, A. H. A., & Elghazi, Y. (2016). Parametric-based designs for kinetic facades to optimize daylight performance: Comparing rotation and translation kinetic motion for hexagonal facade patterns. *Solar Energy*, 126, 111-127.
- Mardaljevic, J., Andersen, M., Roy, N., & Christoffersen, J. (2012). Daylighting metrics: is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability?. In *Proceedings of the building simulation and optimization conference BSO12* (No. CONF).
- Matheou, M., Couvelas, A., Phocasa, M. C. (2020). Transformable building envelope design in architectural education. *Procedia Manufacturing* 44, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.212>
- Meagher, M. (2015). Designing for change: The poetic potential of responsive architecture. *Frontiers of architectural Research*, 4(2), 159-165.
- Megahed, N. A. (2017). Understanding kinetic architecture: typology, classification, and design strategy. *Architectural Engineering and Design Management*, 13(2), 130-146.
- Morris, E., McAdams, D. A., & Malak, R. (2016, August). The state of the art of origami-inspired products: A review. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 50169, p. V05BT07A014). American Society of Mechanical Engineers.
- Muhammedova, S. (2019). An approach for the integration of adaptive façade systems to improve energy efficiency and indoor comfort conditions: a dormitory room case study, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, 586491.

- Nady, R. (2017). Dynamic facades: environmental control systems for sustainable design. *Renewable Energy and Sustainable Development*, 3(1), 118-127.
- Osório, F., Paio, A., & Oliveira, S. (2014). KOS-kinetic origami surface. *KOS-kinetic origami surface*, 201-210.
- Osório, F., Paio, A., & Oliveira, S. (2017). Kinetic origami surfaces: from simulation to fabrication. In *Future Trajectories of Computation in Design [17th International Conference, CAAD Futures 2017, Proceedings]*, 229-248. Istanbul Technical University.
- Öner, D. Uyum gösteren gölgeleme bileşenlerinin parametrik tasarım araçlarıyla performans değerlendirmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 609860.
- Peraza-Hernandez, E.A., Hartl, D.J., Malak, R.J., Lagoudas, D.C. (2014). Origami-inspired active structures: a synthesis and review. *Smart Mater. Struct.* 23, 9. 10.1088/0964-1726/23/9/094001
- Pesenti, M., Masera, G., Fiorito, F. (2015). Shaping an origami shading device through visual and thermal simulations, *Energy Procedia* 78, 346–351. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.663>
- Pujadas-Gispert, E., Alsailani, M., van Dijk, K. C. A., Rozema, A. D. K., ten Hoop, J. P., Korevaar, C. C., & Moonen, S. P. G. (2020). Design, construction, and thermal performance evaluation of an innovative bio-based ventilated facade. *Frontiers of Architectural Research*, 9(3), 681-696.
- Razzaghmanesh, D. (2015). Impact of parametric design on designing performative facades.
- Rhino. (2022). Rhinoceros®design, model, present, analyze, realize. <https://www.rhino3d.com/mcneel/about/>
- Rizi, R. A., & Eltaweel, A. (2021). A user detective adaptive facade towards improving visual and thermal comfort. *Journal of Building Engineering*, 33, 101554.
- Samadi, S., Noorzai, E., Beltrán, L. O., & Abbasi, S. (2020). A computational approach for achieving optimum daylight inside buildings through automated kinetic shading systems. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 335-349.
- Shahin, H. S. M. (2019). Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high performance building skins. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 345-352.
- Sheikh, W. T., & Asghar, Q. (2019). Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 8(3), 319-331.

- Shi, X., Abel, T., & Wang, L. (2020). Influence of two motion types on solar transmittance and daylight performance of dynamic facade. *Solar Energy*, 201, 561-580.
- Singh, V., & Gu, N. (2012). Towards an integrated generative design framework. *Design studies*, 33(2), 185-207
- Sun, X., Gou, Z., & Lau, S. S. Y. (2018). Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building. *Journal of Cleaner Production*, 183, 35-45.
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*, 121, 103450.
- Tabadkani, A., Shoub, M.V., Soflae, F., Banihashem, S. (2019). Integrated Parametric Design Of Adaptive Facades For User's Visual Comfort. *Automation in Construction*, 106 102857, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102857>
- Tachi, T. (2009). Generalization of rigid-foldable quadrilateral-mesh origami. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 50(3), 173-179.
- Tachi, T. (2010). Origamizing polyhedral surfaces. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 16(2), 298-311.
- URL- 1: <https://archello.com/project/arab-world-institute>, (Ziyaret tarihi: 28 Kasım 2022).
- URL- 2: <https://www.archdaily.cl/cl/02-265617/clasicos-de-arquitectura-instituto-del-mundo-arabe-jean-nouvel>, (Ziyaret tarihi: 28 Kasım 2022).
- URL- 3: <https://www.imarabe.org/fr/architecture>, (Ziyaret tarihi: 28 Kasım 2022).
- URL- 4: <https://www.archdaily.com/49150/media-tic-enric-ruiz-geli>, (Ziyaret tarihi: 28 Kasım 2022).
- URL- 5: <https://www.archdaily.com/tag/origami> , (Ziyaret tarihi: 19 Kasım 2022).
- URL- 6: https://www.archiproducs.com/en/news/edge-chair-by-novague-inspired-by-origami_29998 , (Ziyaret tarihi: 19 Kasım 2022).
- URL-7: <https://www.contemporist.com/10-fashion-designs-inspired-by-origami/> , (Ziyaret tarihi: 19 Kasım 2022).
- URL- 8: <https://www.arkitektuel.com/yokohama-uluslararası-yolcu-terminali/>, (Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2022).
- URL- 9: <https://www.archdaily.com/338149/pleats-m-hironaka-ogawa-associates>, (Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2022).

- URL- 10: <https://www.dezeen.com/2013/03/12/pleats-m-wedding-centre-by-hironaka-ogawa/> , (Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2022).
- URL- 11: http://vladimirbrontis.blogspot.com/2010_11_07_archive.html , (Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2022).
- URL- 12: <https://www.archdaily.com/44225/bamboo-forest-and-corinth-hut-raa> , (Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2022).
- URL -13 : <https://www.designboom.com/architecture/ryuichi-ashizawa-architects-bamboo-forest-and-huts-with-water/>, (Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2022).
- URL -14 : <https://inhabitat.com/matthew-malone-recovery-shelter/> , (Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2022).
- URL – 15: <https://www.dezeen.com/2008/02/07/xile-by-mats-karlsson/> , (Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2022).
- URL – 16 : <http://amirshahrokhi.christopherconnock.com/2011/12/11/auxetic-origami-surface/> , (Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2022).
- URL -17 : <https://www.archdaily.com/283200/lotus-dome-studio-roosegaarde> , (Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2022).
- URL- 18 : <https://www.designboom.com/art/david-letellier-versus-a-kinetic-sound-sculpture/> , (Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2022).
- URL- 19 : <https://origami-resource-center.com/inside-reverse-fold/> , (Ziyaret tarihi: 15 Eylül 2022).
- URL -20 : <https://origami-resource-center.com/outside-reverse-fold/> , (Ziyaret tarihi: 15 Eylül 2022).
- URL -21 : <https://origami-resource-center.com/rabbit-ear-fold/> , (Ziyaret tarihi: 15 Eylül 2022).
- URL -22 : <https://origami-resource-center.com/pleat-fold/> , (Ziyaret tarihi: 15 Eylül 2022).
- URL -23 : <https://origami-resource-center.com/petal-fold/> , (Ziyaret tarihi: 15 Eylül 2022).
- URL -24 : <https://origami-resource-center.com/squash-fold/> , (Ziyaret tarihi: 15 Eylül 2022).
- URL – 25 : <https://origami-resource-center.com/crimp-fold/> , (Ziyaret tarihi: 15 Eylül 2022).

- URL -26 : <https://origami-resource-center.com/sink-fold/> , (Ziyaret tarihi: 15 Eylül 2022).
- URL -27 : <https://worldarchitecture.org/architecture-projects/hvfg/biocatalysis-lab-building-at-technical-university-graz-project-pages.html> , (Ziyaret tarihi: 08 Ağustos 2022).
- URL -28 : <https://www.archdaily.com/590576/sdu-campus-kolding-henning-larsen-architects> , (Ziyaret tarihi: 08 Ağustos 2022).
- URL -29 : <https://www.dezeen.com/2015/07/14/henning-larsen-syddansk-universitet-sdu-kolding-campus-building-denmark-green-standards-university/> , (Ziyaret tarihi: 09 Ağustos 2022).
- URL -30 : <https://www.ladybug.tools/epwmap/> , (Ziyaret tarihi: 05 Temmuz 2022).
- Valitabar, M., Moghimi, M., Mahdavinejad, M., & Pilechiha, P. (2018). Design optimum responsive façade based on visual comfort and energy performance. In *23rd International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Learning, Prototyping and Adapting, CAADRIA* (Vol. 2, pp. 93-102). The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) Beijing, China.
- Velasco, R., Brakke, A. P., & Chavarro, D. (2015). Dynamic façades and computation: Towards an inclusive categorization of high performance kinetic façade systems. In *International Conference on Computer-Aided Architectural Design Futures* (172-191). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Velikov, K., & Thün, G. (2013). Responsive building envelopes: characteristics and evolving paradigms. *Trubiano, F., Design and Construction of High Performance Homes*, 75-92.
- Wagdy, A., Elghazi Y., Abdalwahab, S., Hassan, A. (2015). ‘The Balance between Daylighting and Thermal Performance Based on Exploiting the Kaleidocycle Typology in Hot Arid Climate of Aswan, Egypt’, in AEI 2015. Reston, VA: *American Society of Civil Engineers*, 300–315. 10.1061/9780784479070.028.
- Waseef, A., & EL-Mowafy, B. N. (2017). Towards a new classification for responsive kinetic facades. In *Proceedings of the memaryat international conference ‘MIC* (Vol. 2017).
- Wienold, J., & Christoffersen, J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and buildings*, 38(7), 743-757.
- Wonoto, N., Baerlecken, D., Gentry, R., & Swarts, M. (2013). Parametric design and structural analysis of deployable origami tessellation. *Computer-Aided Design and Applications*, 10(6), 939-951.

- Peraza-Hernandez, E. A., Hartl, D. J., Malak Jr, R. J., & Lagoudas, D. C. (2014). Origami-inspired active structures: a synthesis and review. *Smart Materials and Structures*, 23(9), 094001.
- Rodonò, G., Naboni, E., Sapienza, V., Cucchi, F., & Macrelli, G. (2020). Simulation workflow for parametric optimization of outdoor comfort-based origami shelter. *Journal of Architectural Engineering*, 26(3), 04020022.
- Zhai, Z., Wang, Y., & Jiang, H. (2018). Origami-inspired, on-demand deployable and collapsible mechanical metamaterials with tunable stiffness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(9), 2032-2037.
- Zirbel, S. A., Trease, B. P., Thomson, M. W., Lang, R. J., Magleby, S. P., & Howell, L. H. (2015, May). Hanaflex: a large solar array for space applications. In *Micro-and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VII*, Vol. 9467, 179-187. SPIE.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Kahramanoğlu, B., Çakıcı Alp, N. (2021). Kinetik sistemli Bina Cephelerinin Modelleme Yöntemlerinin İncelenmesi, *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 5 (1), 119-138. DOI: 10.53600/ajesa.861479

Kahramanoğlu, B., Çakıcı Alp, N. (2023). Enhancing Visual Comfort with Miura-oriented Responsive Facade Model, *Journal of Building Engineering*. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106241



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2015 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümü’nden 2019 yılında Mimar olarak mezun oldu. 2020 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

