

UYARLANABİLİR KİNETİK CEPHE SİSTEMLERİNİN GÖMÜLÜ ENERJİ BAĞLAMINDA İNCELENMESİ: KIEFER TEKNİK GALERİSİ

Çetin SÜALP*, Saniye KARAMAN ÖZTAŞ**, Nilay COŞGUN***

Öz

21. yüzyıl mimarlık pratiğinde yapıların kullanım enerjilerini %50 oranında düşürebilen uyarlanabilir kinetik cephe sistemleri (UKCS) ön plana çıkmaktadır. Literatürde çoğunlukla kullanım enerjileri üzerinden incelenen bu sistemlerin sahip oldukları gömülü enerjiler bağlamında kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Çalışma kapsamında sürdürülebilir bir yaklaşımın geliştirilebilmesi için UKCS'lerin performans değerleri yitirilmeden gömülü enerjilerinin değerlendirilmesi ve azaltılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda diğer malzemelere göre daha yüksek gömülü enerjiye sahip olan alüminyum ve paslanmaz çelik gibi malzemelerden imal edilmiş bileşenlerin aynı seviyede performans değerlerini sağlayabilecek ahşap esaslı malzemeler gibi gömülü enerjisi görece daha düşük olan malzemeler ile değiştirildiği varsayılmıştır. Konunun sayısal veriler üzerinden incelenebilmesi için bir yapı cephesi değerlendirilmiştir. Yapı seçimi konusunda gömülü enerji bakımından cephenin hangi malzemeden üretilmiş olduğuna ve güvenlik açısından da cephenin yüksekliğine dikkat edilmiştir. Bu koşullara uyan Kiefer Teknik Galerisi UKCS'si çalışma kapsamında incelenmiştir. Cephe sistemi alüminyum paneller, alüminyum raylar, paslanmaz çelik konsollar ve paslanmaz çelik ızgaralar olmak üzere dört temel bileşene ayrılmıştır. Bu dört bileşenin toplam gömülü enerjileri literatürdeki teknik çizimler, bilgiler ve fotoğraflar aracılığı ile hesaplanmıştır. Avrupa Standartlarına (EN 15804:2012) göre UKCS'nin hammadde temini için gereken enerji (*raw material supply*, A1) tespit edilmiştir. Elde edilen veriler ile UKCS tasarımı gömülü enerjiyi azaltabilmenin yolları, alternatif malzemeler ve detaylandırma prensipleri ile tartışılmış ve bir detay önerilmiştir. Önerilen detay sayesinde UKCS'nin toplam gömülü enerjisinin % 52 oranında düşürülebileceği hesaplanmıştır. Bu sayede tasarım aşamasında yalnızca malzeme tercihleri değiştirilerek UKCS'lerin gömülü enerjilerinin düşürülebileceği ve UKCS tasarımlarında performans verileri göz önünde tutularak malzeme nitelikleri ve malzemelerin gömülü enerjilerine dikkat edilmesinin önemi vurgulanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Gömülü enerji; Sürdürülebilir tasarım; Uyarlanabilir cepheler; Yapı kabuğu; Yaşam döngüsü değerlendirmesi

* Gebze Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, cetinsualp@gtu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-1227-7774

** Gebze Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, saniyekaraman@gtu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-1955-0013

*** Gebze Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, nilaycosgun@gtu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0001-5874-3331

EXAMINATION OF RESPONSIVE FACADE SYSTEMS IN TERMS OF EMBODIED ENERGY: KIEFER TECHNIC SHOWROOM

Çetin SÜALP*, Saniye KARAMAN ÖZTAŞ**, Nilay COŞGUN***

Abstract

Responsive façade systems (RFS), which come to the fore in the twenty-first century architecture, can reduce the operational energy consumption of buildings by 50%. However, the embodied energies of these systems are scarcely researched. Therefore, this study aims at reducing the embodied energy of RFSs without losing their performance values for a sustainable approach. It was assumed that components made of materials such as aluminum and stainless steel, which have higher embodied energy than other materials, were replaced with materials with relatively lower embodied energy, such as wood-based materials. To quantitatively examine the subject, RFS of Kiefer Technic Showroom is selected as a case study. The selection criteria was the material in terms of embodied energy and the height of the facade in terms of security. The selected RFS was divided into four basic components: aluminium panels, aluminium rails, stainless steel brackets, and stainless steel grilles. Then the energy required for raw material supply (A1) of the RFS was determined according to European Standards (EN 15804:2012). The methods to reduce the embodied energy in RFS design, alternative materials and detailing principles were discussed and a detail was proposed. According to the detail, the embodied energy of the RFS was decreased by 52 %. Thus it was demonstrated that the embodied energies of RFSs can be reduced simply by changing material preferences at the design stage, and that the importance of paying attention to qualities and embodied energies of materials by taking performance data into account in RFS designs.

Keywords: Adaptive facades; Building envelope; Embodied energy; Life-cycle assesment; Sustainable design

* Gebze Technical University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, cetinsualp@gtu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-1227-7774

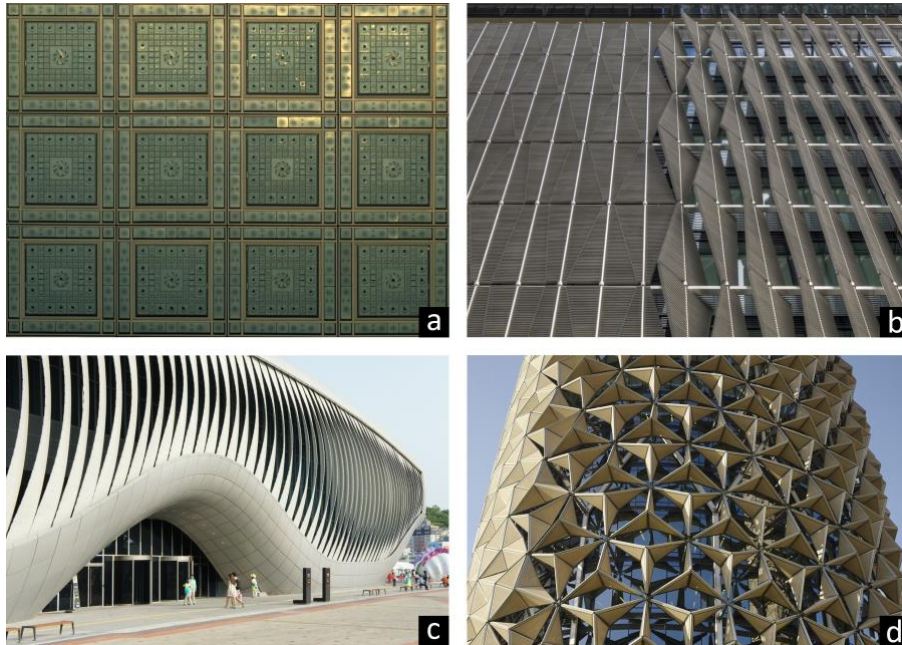
** Gebze Technical University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, saniyekaraman@gtu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-1955-0013

*** Gebze Technical University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, nilaycosgun@gtu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0001-5874-3331

GİRİŞ

Son 20 yılda sayıları hızla artan uyarlanabilir kinetik cephe sistemleri (UKCS), saatlik, günlük ya da mevsimsel döngüler halinde değişen dış koşullara, hareket yoluyla uyum sağlayabilen yapı kabukları olarak tanımlanabilmektedir (Attia, Bilir, Safy, Struck, Loonen ve Goia, 2018). 21. yüzyıl mimarlık pratiğinde ön plana çıkan UKCS'ler, özellikle cam giydirme cepheli binaların solar radyasyon ile ısı kazanımlarının ve dolayısıyla da binaların kullanım enerjilerinin düşürülmesinde tercih edilmektedir. Farklı geometrik düzenlemeler ve tekrar eden birimler ile üretilebilen UKCS'ler, binalarda gölgeledikleri bölümlerin kullanım enerjilerini (soğutma, havalandırma ve aydınlatma gibi) % 50 oranında düşürebilmektedir (Karanouh ve Kerber, 2015; Alotaibi, 2015). Güneşin gün içindeki hareketini takip ederek iç mekân aydınlatmasına katkı sağlayan bu sistemlerin aynı zamanda kullanıcıların dış dünya ile görsel temasını en az seviyede engellemesi ve direkt gelen güneş ışığından gelen kamaşmayı önlemesi gibi konfor seviyesini arttıracak performanslar sergilemesi de beklenmektedir (Moloney, 2011). Hem enerji performansı hem de kullanıcı konforu üzerinde etkili olan UKCS'lerin tasarımı, performans değerlendirmesi ve uygulaması üzerine literatürde ilgili çalışmalar bulunmaktadır (Elghazi, Wagdy, Mohamed ve Hassan, 2014; Tabadkani, Valinejad Shoubi, Soflaei ve Banihashemi, 2019; Zolfagharpour, Shafaei ve Saeidi, 2022).

Çağdaş mimaride UKCS kullanımına dünyanın çeşitli noktalarından örnekler gösterebilmek mümkündür. Bu konu ile ilgili en eski örneklerden biri, Paris'te (Fransa) Jean Nouvel tarafından 1987'de tasarlanan Arap Dünya Enstitüsü'nün cephesidir. Bu cephenin Arap kültüründe yaygın bulunan maşrabiye elemanının çağdaş bir yorumu olarak ele alınmasından ötürü UKCS tasarımlarının sadece performans ve konfor verileri ile ilgili olmadığı, aynı zamanda kültürel bir boyutunun da bulunduğu anlaşılabilmektedir (Preto, 2020). Ayrıca Essen'de (Almanya) JSWD mimarlık tarafından 2010'da yapılan *Q1 ThyssenKrupp* yönetim binasının cephesi, Yeosu'da (Güney Kore) SOMA Lima tarafından 2012'de yapılan *One Ocean* Tematik Pavyonu ve Abu Dabi'de (Birleşik Arap Emirlikleri) Aedas tarafından 2012'de yapılan *Al Bahr* kulelerinin cepheleri de dünyada öne çıkan UKCS'ler arasındadır (*Q1 ThyssenKrupp Quarter*, 2013; *One Ocean Thematic Pavilion*, 2012; Cilento, 2012) (Şekil 1). Farklı coğrafyalarda bulunan ve katlanma, dönme, kayma ve bükülme gibi farklı hareket stratejilerine sahip olan bu örnekler, değişen dış koşullara hareket ile uyum sağlamayı hedeflemektedir. Dünyanın çeşitli noktalarında çağdaş UKCS yaklaşımlarına rastlanması, konunun güncel ve araştırılmaya açık olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 1. Dünyanın farklı coğrafyalarından UKCS örnekleri. (a) Arap Dünya Enstitüsü; (b) Q1 ThyssenKrupp yönetim binası; (c) One Ocean Tematik Pavyonu; (d) Al Bahr kuleleri (**Kaynak:** (a), (d) Schielke, 2014; (b) *Q1 ThyssenKrupp Quarter*, 2013; (c) *One Ocean Thematic Pavilion*, 2012).

UKCS'ler her ne kadar binaların kullanım enerjilerinin düşürülmesi için kullanılsalar da UKCS'lerin üretimi, belirli bir gömülü enerjiyi gerektirmektedir. Düşük gömülü enerjiye sahip malzemelerin UKCS'lerde kullanımı üzerine literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Almusaed, Yitmen, Almsaad, Akiner ve Akiner (2021) kinetik cephe malzemesi olarak ahşap türevi malzemelerin (mdf, yonga levha, kontrplak... gibi) kullanımını çevreye etkileri bağlamında incelemiştir. Maden (2023) kinetik yapıların kinematik ve morfolojik olarak beş alanda incelenebileceğini, Holstov, Farmer ve Bridgens (2017) ise bu beş alandan biri olan malzeme tabanlı sistemlere dahil edilebilecek higromorfik (nem değişimi ile şekil değiştirebilen) sistemlerin ahşap levhalarla üretimini araştırmış ve ürettikleri prototipi bir yıl açık havada (İngiltere) test etmiştir. Crespi ve Persiani (2019) literatürde çoğunlukla kullanım enerjisi üzerinden araştırılan adaptif cephe sistemlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi (*life-cycle assesment*) kapsamında incelendiği bir çalışmayı ortaya koymuştur. Hildebrand'a (2012) göre cepheler bina gömülü enerjilerinin yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır. Aynı yazara göre yaşam döngüsü değerlendirmesi ile ilgili veriler yapıların gömülü enerjilerinin düşürülmesi için tasarım aşamasına daha etkili bir biçimde dahil edilmelidir. Ayrıca aynı çalışmaya göre sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için hem ürün kalitesinin hem de ürünün yarattığı çevresel etkinin iki yönlü olarak iyileştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu yaklaşım UKCS'ler bağlamında ele alınırsa, UKCS'lerin performans değerleri yitirilmeden gömülü enerjilerinin azaltılması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bostancı (2006) tezinde bağımsız iki aksa göre hareket edebilen akıllı kinetik güneş kontrol sistemi önerisi geliştirmiştir. Megahed (2017) farklı kinetik mimarlık ürünlerinin, konseptlerinin ve yaklaşımlarının sınıflandırılması için teorik bir çerçeve sunmuştur. Gündoğdu ve Arslan (2020) örnek projeler üzerinden biyomimetik yaklaşımların yapı cephelerinde enerji etkin çözümleri nasıl ürettiğini araştırmıştır. Abediniangerabi, Shahandashti ve Makhmalbaf (2020) cephe panellerinin termal özelliklerini veri odaklı analizler ile inceleyerek karar destek sistemi oluşturmuşlardır. Literatür incelendiğinde 21. yüzyıl sürdürülebilir mimari yaklaşımlarının bir sonucu olarak UKCS uygulamalarının artışı bu konu üzerine çalışmanın önemini arttırmaktadır (Attia, 2017; Sheikh ve Asghar, 2019). Ancak bu çalışmaların artışına rağmen UKCS'lerin gömülü enerji bağlamındaki araştırmalarının sınırlı sayıda olması ve toplam enerji performansının değerlendirilmesinde gömülü enerjinin rolü bu çalışmanın önemini artırmaktadır. Bu bağlamda, çalışmada UKCS'lerin kullanım enerjileri ile birlikte gömülü enerjilerinin değerlendirilmesi, azaltılması ve buna yönelik çözüm önerilerinin sunulması amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında konunun sayısal veriler üzerinden incelenebilmesi için bir yapı cephesi ele alınmıştır. Cephe seçimi konusunda aşağıda ifade edilen kriterler göz önünde tutulmuştur. SGG ve ARUP (2022) raporlaması göstermektedir ki % 78 dönüştürülmüş alüminyumdan (Avrupa ortalamasına en yakın oran) imal edilmiş spandrelli bir cam giydirme cephenin gömülü enerjisinin % 72'si alüminyum malzemeden oluşturulmuş kısımlardan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla çalışma için örnek seçilirken cephenin üretildiği malzemenin cinsi, gömülü enerjisinin düşürülebilmesi adına önem kazanmaktadır. UKCS'nin çevreye olan etkisini azaltmak için diğer malzemelere göre daha yüksek gömülü enerjiye sahip olan alüminyum ve paslanmaz çelik gibi malzemelerden imal edilmiş bileşenlerin aynı seviyede performans değerlerini sağlayabilecek ahşap esaslı malzemeler gibi gömülü enerjisi görece daha düşük olan malzemeler ile değiştirildiği çalışma kapsamında varsayılmıştır. Burada malzeme dayanıklılığı göz önünde tutulursa yüksek yapılar gibi rüzgâr yüklerine maruz kalabilecek metal bileşenlerin ahşap esaslı malzemeler ile değiştirilmesi strüktür ve güvenlik problemleri doğuracağından seçilmiş olan binanın az katlı olmasına ve alüminyum gibi gömülü enerjisi görece yüksek malzemelerden yapılmasına dikkat edilmiştir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında, koşullara uyan Kiefer Teknik Galerisi UKCS'si incelenmiştir.

Kiefer Teknik Galerisi'nin UKCS'si, alüminyum paneller, alüminyum raylar, paslanmaz çelik konsollar ve paslanmaz çelik ızgaralar olmak üzere dört temel bileşene ayrılmıştır. Bu dört bileşen dışında cam giydirme cephe (camlar, kayıtlar ve tespit bileşenleri) UKCS'nin bir parçası sayılamayacağı ve UKCS içindeki makara sistemleri de hesaplama için yeterli veriye ulaşılmadığı için çalışmaya dahil edilmemiştir. Öncelikle bahsedilen dört temel bileşenin cephe sisteminde ne kadar hacme ve ağırlığa sahip olduğu literatürdeki çizimler, bilgiler ve fotoğraflar aracılığı ile hesaplanmıştır. Toplam hacmi hesaplanan bileşenlerin malzeme yoğunlukları sayesinde toplam ağırlıkları hesaplanmıştır. Hesaplanan ağırlıklar ilgili malzemelerin birim gömülü enerji değerleri ile çarpılarak bileşenlerin toplam gömülü enerjileri megajoule (MJ) cinsinden hesaplanmıştır. Bu noktada hesaplanan enerjiler ile Avrupa Standartlarına (EN 15804:2012) göre UKCS'nin üretim aşaması (*production stage*, A1-A3) içinden sadece hammadde temininde harcanan enerjisi (*raw*

material supply, A1) tespit edilmiştir. Dolayısıyla cephe bileşenlerinin imalatı esnasında harcanan enerji kapsam dışında bırakılmış ve sadece kullanılan malzemelerin gömülü enerjisine odaklanılmıştır. Dolayısıyla çalışmada UKCS tasarımında malzeme seçim stratejilerine odaklanılmıştır. Elde edilen enerji değerleri bileşenlere göre kıyaslanmış, malzeme seçimi konusunda UKCS tasarımında çevresel etkinin azaltılabilmesinin yolları ve alternatif malzemeler tartışılmıştır. Kiefer Teknik Galerisi UKCS'si için gömülü enerji bağlamında alternatif detay tasarım yaklaşımı ve malzeme seçimi ile alternatif bir detay üretilmiştir. Ayrıca detay bağlamında oluşturulacak olan UKCS'nin gömülü enerjisi de hesaplanmıştır. Kullanım enerjisini azaltmaya yönelik bir sistemin gömülü enerjisine dikkat çekilmesi ve öneri UKCS detay tasarım yaklaşımı ile literatüre katkı sağlanabileceği düşünülmektedir.

UYARLANABİLİR KİNETİK CEPHE SİSTEMLERİNİN GÖMÜLÜ ENERJİ BAĞLAMINDA AÇILIMLARI

Binaların çevre üzerindeki etkilerine ilişkin artan farkındalık ile UKCS tasarımları artık estetik görünüşleri ile sınırlı kalmamaktadır (Alotaibi, 2015). Bu durum UKCS tasarımlarının çevreye karşı duyarlı olmasının önemini giderek arttırmaktadır. Belirli bir bina cephesi için tasarlanıp uygulanan UKCS'ler farklı bağlamlarda ele alındığı için her birinden beklenen gereksinimler de doğal olarak değişmektedir. Ancak temel olarak UKCS tasarımlarının ön plana çıkan hedefleri arasında kullanıcı konforunun artırılması ve yapıda kullanılan enerjinin düşürülmesi bulunmaktadır. Bu bölümde enerjinin binalarda nasıl ele alındığı açıklanmıştır.

Cabeza, Barreneche, Miró, Morera, Bartolí ve Fernandez'e (2013) göre bir binanın ömrü boyunca tükettiği enerji miktarı (E_{total}), binanın ömür boyu harcadığı kullanım enerjisi (*operational energy*, OE) ve binanın üretimi sırasında harcanan gömülü enerjinin (*embodied energy*, EE) toplamı kadardır (Denklem 1). Kullanım enerjisi, binalarda ısıtma, soğutma, havalandırma, aydınlatma ve diğer elektrikli cihazlar için kullanılan enerjidir. Gömülü enerji, bir nesnenin üretilmesi için gereken enerjinin toplamıdır (Sartori ve Hestnes, 2007).

$$E_{total} = OE + EE$$

(Denklem 1)

UKCS'ler eklendikleri yapıların yukarıda bahsedildiği gibi kullanım enerjisini azaltırken (OE_{YAPI}), eklenen yeni malzemelerin yaşam döngüsü sürecindeki enerji tüketimlerinden dolayı gömülü enerjileri (EE_{UKCS}) yükselmektedir. Bu durumda UKCS'lerin gömülü enerjilerinin (EE_{UKCS}) düşürülmesi önem kazanmaktadır. Bir yapıya UKCS eklendikten sonra yapının gömülü enerjisinde (EE_{YAPI}) bir değişim olmadığı varsayılmıştır. Ayrıca UKCS'nin kullanım enerjisi (OE_{UKCS}) de çalışma dışında tutulmuştur (Denklem 2 ve 3). UKCS'lerin kullanım enerjisi, sistemin hareket etmesi ve kontrolü için gereken enerjidir. Literatürde bulunan araştırma makaleleri ve firma raporlamaları, bina cephelerinin gömülü enerjilerinin düşürülmesinin önemine işaret etmektedir (SGG ve ARUP, 2022; Almusaed ve diğ., 2021).

$$E_{total_{YAPI}} = OE_{YAPI} + EE_{YAPI}$$

(Denklem 2)

$$E_{total_{UKCS}} = OE_{UKCS} + EE_{UKCS}$$

(Denklem 3)

Brand'e (1995) göre yapılar çeşitli sistem ve katmanların bir araya gelmesi ile oluşmakta ve her bir sistemin de belirli bir ömrü bulunmaktadır. Brand'in önerdiği şemaya göre bir binanın cephe sistemi (20-30 yılda bir) bina ömrü boyunca yaklaşık iki kere değişmektedir. Dolayısıyla bir bina için en az iki kere üretileceği düşünülen UKCS'nin gömülü enerji miktarı (EE_{UKCS}) iki kat artmakta ve bu durum, UKCS'nin gömülü enerjisinin toplam enerjisine oranını ($EE_{UKCS} / E_{total_{UKCS}}$) arttırmaktadır. Binalarda enerji kavramı genellikle kullanım

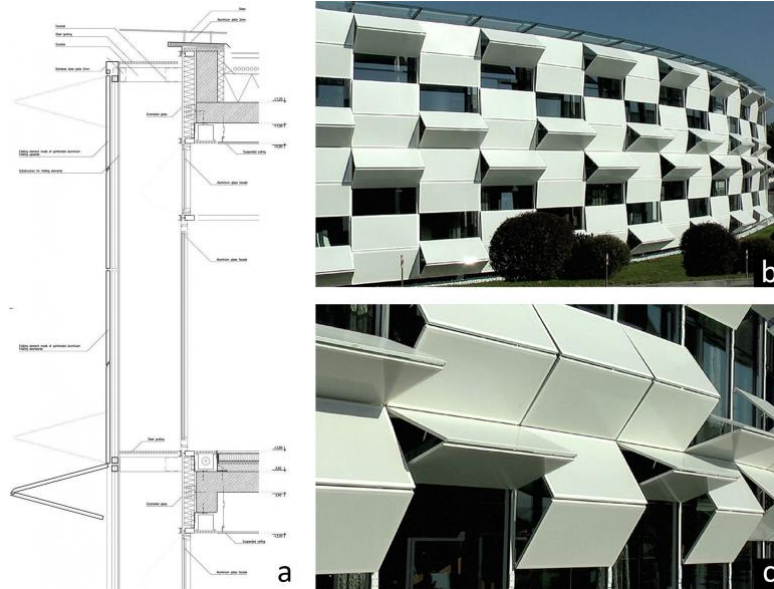
enerjisine atıfta bulunurken, gömülü enerji ve gömülü karbon (*embodied carbon*) çoğunlukla geri planda kalmaktadır. Bu sebepten yaşam döngüsü değerlendirmesinin göz önünde bulundurulması önem arz etmektedir. Ayrıca otomasyon ürünleri ve sensörler gibi yüksek teknolojiye sahip sistemlerin UKCS'lere entegre edilmesi ile UKCS'lerin gömülü enerjilerinin daha da artacağı göz önünde tutulmalıdır (Crespi ve Persiani, 2019).

KIEFER TEKNİK GALERİSİ

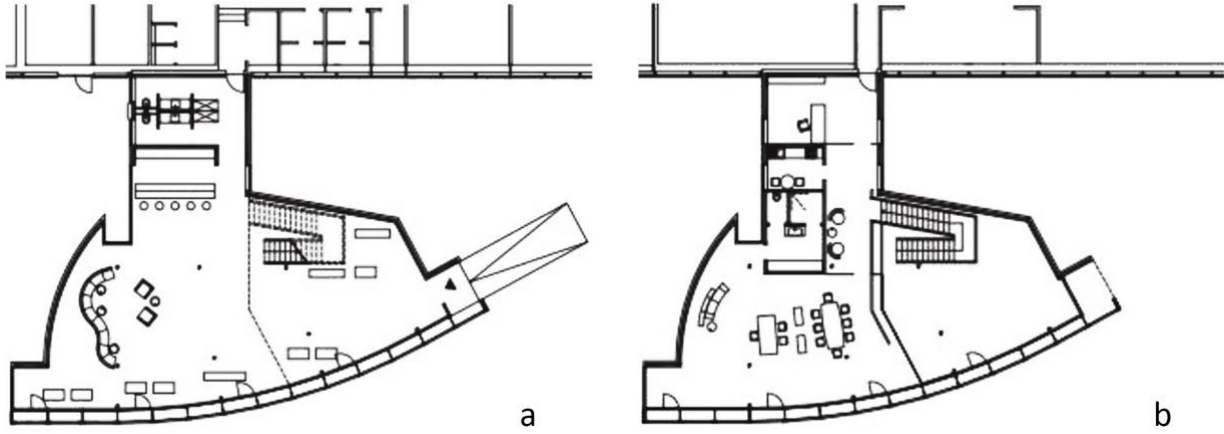
Çalışma kapsamında Kiefer Teknik Galerisi UKCS'si rüzgâr yükü açısından binanın az katlı olması ve alüminyum gibi gömülü enerjisi görece yüksek malzemelerden yapılmış olması dolayısıyla seçilmiştir. Lawson'a (2006) göre alüminyum paslanmaz çeliğin 1.48 (170MJ/kg / 115MJ/kg), yapılarda kullanılan çeliğin ise 5 (170MJ/kg / 34MJ/kg) katı birim gömülü enerjiye sahiptir.

Proje Bilgileri

Bad Gleichenberg'de (Avusturya) bulunan galeri 2007 yılında Ernst Giselbrecht + Partner tarafından yapılmıştır. Yakın çevresinde bulunan alüminyum paneller ile kaplı binalar referans alınarak aynı malzeme ile dış görünüşünü değiştirebilen bir cephe ile donatılmıştır. Dolayısıyla galeri, Kiefer Teknik ticari tesislerinin halka açık yüzüdür. Galerinin 228.8m² alana (28.75 m x 7.75 m) sahip güneybatı cephesinde bulunan 112 adet yatay katlanır alüminyum panel, cam giydirme cephenin üzerinde bulunan alüminyum raylara monte edilmiştir. Panellerin üzerinde hareket edebildiği alüminyum raylar, binaya paslanmaz çelik desteklerle tespit edilmiştir. Hareketi sağlayan makara sistemi ve elektrik motorları da alüminyum rayların iç kısmına yerleştirilmiştir. Paneller açık duruma getirildiğinde güneş kırıcı işlevi görebilmekte, kapatıldıklarında ise delikli yüzeyleri sayesinde iç mekâna ışık alabilmektedir. Her bir panel, bilgisayar yazılımı sayesinde tek tek kontrol edilebilmekte ve bu sayede panellerin belirli koreografiler ile hareketi sağlanabilmektedir (Şekil 2-3) (Schumacher, Schaeffer ve Vogt, 2010).



Şekil 2. (a) Kiefer Teknik Galerisi cephesinin sistem kesiti; (b), (c) panellerin oluşturduğu değişik koreografiler (Kaynak: (a) Quintáns, 2015; (b), (c) Vinnitskaya, 2010).



Şekil 3. (a) Sergi mekanının zemin kat planı; (b) birinci kat planı (Kaynak: (a), (b) Ernst Giselbrecht + Partner, t.y.).

Kiefer Teknik Galerisi UKCS'sinin Gömülü Enerjisi

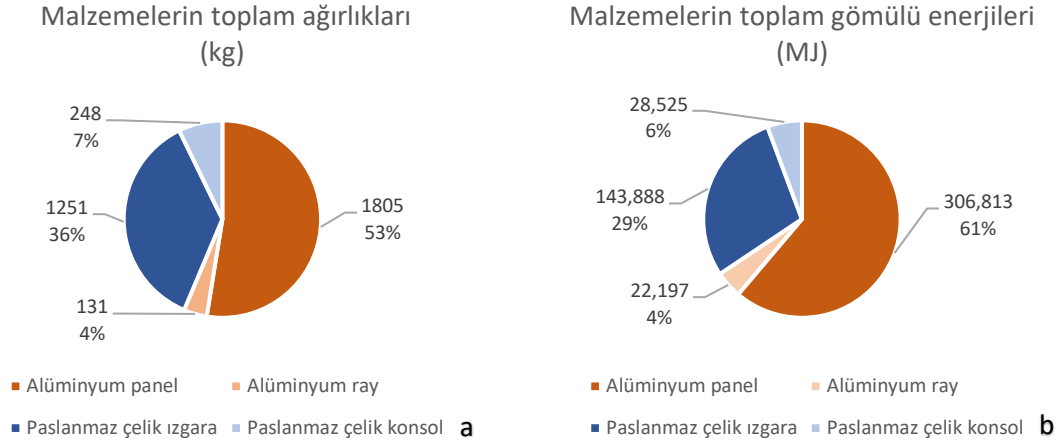
Çalışma kapsamında cephe sistemini oluşturan parçaların gömülü enerjisi hesaplanırken Şekil 2 ve 3'teki cephe sistem detayları, mimari proje ve fotoğraflardan yararlanılmıştır. Sistem detayları üzerinden yapılan ölçümler sayesinde cephe bileşenleri ile ilgili veriler elde edilmiştir. Cephede kullanılan alüminyum ve paslanmaz çelik malzemeler ile ilgili veriler Tablo 1'de ifade edilmiştir. Gömülü enerji hesaplamasına dair detaylı bilgiler ise Ek1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Kiefer Teknik Galerisi UKCS'sini oluşturan cephe bileşenlerinin hacim, ağırlık ve gömülü enerjileri (Kaynak: Çalışma kapsamında yazarlar tarafından üretilmiştir).

Malzeme	Bileşen	En (m)	Boy (m)	Kalınlık (mm)	Adet	Hacim (cm ³)	Malzeme Yoğunluğu (g/cm ³)	Ağırlık (kg)	Birim gömülü enerji (MJ/kg)	Toplam gömülü enerji (MJ)
Alüminyum	Panel	7.75	28.75	3	1	668,438	2.7	1804.8	170	306,813
Alüminyum	K. ray	0.208	7.75	2	15	48,360	2.7	130.6	170	22,197
P. çelik	Izgara	0.04	28.75	4	34	156,400	8	1251.2	115	143,888
P. çelik	Konsol	0.13	0.53	10	45	31,005	8	248.0	115	28,525
									3434.6	501,423

BULGULAR VE TARTIŞMA

Kiefer Teknik Galerisi UKCS'sine ait bileşenlerin hacim, ağırlık ve gömülü enerjilerinin hesaplanması sonucunda alüminyum ve paslanmaz çelik malzemelerin ağırlıklarının oranı 57/43 (1935 kg/ 1499 kg), gömülü enerjilerinin oranı ise 65/35 (329,010 MJ/ 172,413 MJ) olarak hesaplanmıştır. Tablo 1 uyarınca her bir bileşenin toplam ağırlığı ve gömülü enerjisi Şekil 4'te grafikler ile aktarılmıştır. Her iki malzemenin toplam ağırlıkları birbirine yakın olmasına rağmen alüminyumun birim gömülü enerjisinin paslanmaz çeliğe kıyasla yüksek olması UKCS'nin gömülü enerjisinin büyük kısmının alüminyum kaynaklı olmasına sebep olmuştur.



Şekil 4. Cephede kullanılan alüminyum ve paslanmaz çelik malzemelerin (a) ağırlıklarının oranı; (b) gömülü enerjilerinin oranı (**Kaynak:** Çalışma kapsamında yazarlar tarafından üretilmiştir).

Kiefer Teknik Galerisi UKCS'sinin çalışma kapsamında belirlenen dört temel bileşenin üretimi için malzeme gruplarına harcanan toplam enerjilerde alüminyum malzemenin ön plana çıkmasına karşın incelemenin bileşen bazında yürütülmesinin, mimari tasarım açısından yapılan değerlendirmenin daha kolay anlaşılabilir olmasını sağlayacağı düşünülmektedir. Dolayısıyla her ne kadar gömülü enerjisi yüksek olan alüminyum malzemenin tasarımda kullanımının azaltılması hedeflense de paslanmaz çelik malzemenin imal edilmiş olan ve toplam gömülü enerjinin % 29'una sahip ızgaraların da tartışmaya dahil edilebilmesi sağlanmıştır. Bu sebepten tartışma kısmı bileşen grubu bazında yürütülmüştür.

Şekil 4'te anlaşıldığı üzere cephe sisteminde en yüksek gömülü enerjiye sahip yapı bileşeni grubu alüminyum panellerdir (% 61). Bu grubu paslanmaz çelik ızgaralar (% 29) izlemektedir. Alüminyum ray ve paslanmaz çelik konsollar da toplamda en az gömülü enerjiye (% 10) sahip kısımlardır. Bu iki bileşen grubu strüktürel açıdan en belirleyici ve halihazırda en az gömülü enerjiye sahip olduklarından tartışma dışında bırakılmıştır. Dolayısıyla gömülü enerjisi düşük bir UKCS tasarlanması gerektiği zaman panel ve ızgara bileşen gruplarının gömülü enerji açısından nasıl daha verimli tasarlanabileceği tartışılmıştır.

Alüminyum paneller tüm cephe yüzeyini kapladıkları ve mümkün olabilecek en ince kesitte üretildikleri için (teknoloji sayesinde daha ince kesitler mümkün olabilir) aynı malzeme üzerinden gömülü enerjiyi düşürmek için faydalı bir yaklaşım geliştirmek zor olacaktır. Dolayısıyla panellerde aynı ya da yakın performans değeri sergileyebilecek ahşap esaslı malzemelerden üretilmiş levhaların kullanıldığı varsayılmaktadır. Ön plana çıkan ahşap esaslı kompozit malzemeler arasında melamin kaplı yonga levha (*chipboard*), kontrplak (*plywood*), orta ve yüksek yoğunluklu fiber levhalar (MDF, HDF) sayılabilir. Kompozit olmayan masif ahşap malzemeler, dış mekânda kullanılmak için işlem görmediklerinden ötürü değerlendirmeye alınmamıştır. Bu noktada, hafifliği, strüktürel dayanıklılığı, su ve neme karşı dayanım performansı ile kontrplak ön plana çıkmaktadır. Kontrplak yüzeylerinin dış koşullara daha etkin bir şekilde dayanabilmesi için çevre dostu ek bir koruyucu katman ile örtülmesi gerekmektedir. Ayrıca kontrplak üzerinde sık aralıklarla delik açılması da seçilen binanın cephesinde olduğu gibi malzemenin yapısı gereği mümkündür. Ancak açılan deliklerin iç yüzeyinin dış koşullara maruz kalabileceği göz önünde tutulmalıdır. Ek olarak, cephenin ahşap esaslı bir malzeme olan kontrplak ile kaplanması, yangın riski için de ek önlemler alınmasını gerektirecektir.

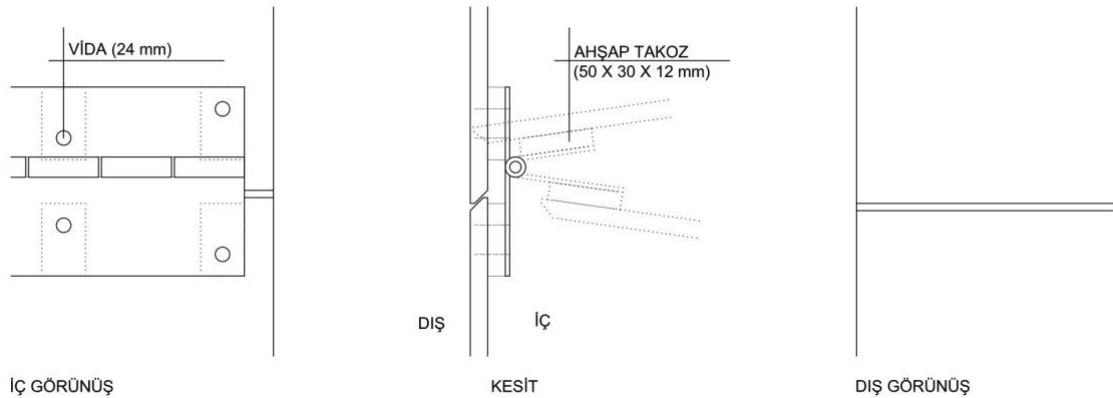
Katlarda bulunan paslanmaz çelik ızgaraların kedi yolu gibi işlev gördüğü düşünüldüğünde üzerinde çalışan kişilerin can güvenliği öncelikli olmaktadır. Dolayısıyla paslanmaz çelik dışında bir malzeme seçimi pek mümkün görünmemektedir. Ayrıca ızgara üzerindeki şerit sayılarının azaltılması da basılan zemin açısından güvenlik açığı oluşturabileceği için var olan ızgara üzerinde bir değişiklik önerilmemektedir. Ancak cephe yüksekliği göz önünde tutulduğunda her bir kedi yolu, ilgili katta bulunan ve üst üste duran dört panele erişimi sağlamaktadır. Üst üste duran dört panelin yaklaşık 4 m yüksekliğe sahip olduğu bilindiğinden, kedi yolundaki bir kişinin üstünde bulunan üçüncü ve dördüncü panele merdiven yardımı olmadan erişmesi halihazırda

mümkün görünmemektedir. Dolayısıyla hem bu sorunu aşmak hem de ızgara kaynaklı gömülü enerjiyi azaltmak için teras kotunda düzenlenmiş bir ray sistemi ile çalışanların panellere ve cephelere yukarıdan erişmesi daha olumlu bir seçenek olarak düşünülebilmektedir. Çalışma kapsamında incelenen yapı iki katlı olduğu için iki tane kedi yoluna ihtiyaç duyulmuştur. İncelenen bina, örneğin, altı katlı olsaydı, altı adet kedi yolu gerekecekti. Dolayısıyla bir binanın kat sayısı arttıkça kedi yoluna harcanan malzeme miktarı da kat sayıya bağlı olarak artacaktır. Ancak ray sistemi ve ekipmanları da belirli bir gömülü enerjiye sahiptir. Dolayısıyla kedi yolunun alternatif bir ray sistemi ile değiştirilmesinin gömülü enerji açısından katkı sağlayıp sağlamadığı proje bazında incelenmelidir.

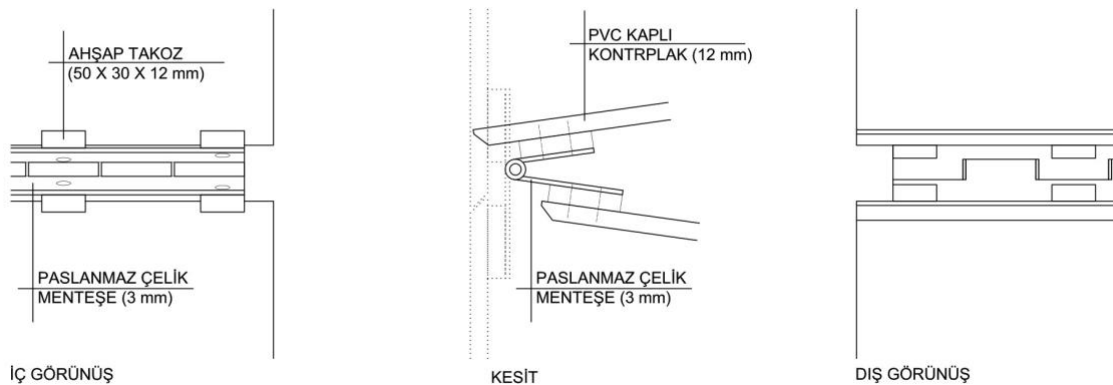
KİEFER TEKNİK GALERİSİ UKCS'Sİ İÇİN GÖMÜLÜ ENERJİ BAĞLAMINDA ALTERNATİF DETAY TASARIMI

Şekil 5'te yazarlar tarafından UKCS'de kontrplak kullanımı için bir cephe detayı tasarlanmıştır. Tasarlanan detay, Şekil 2'de de görülebilen iki panelin birleştiği noktadır. Detay tasarımında menteşe etrafında panellerin birbirini engellemeden hareket edebilmesine dikkat edilmiştir. Cephe panellerinde su ve neme karşı dayanımı arttırmak için PVC kaplama tercih edilmiştir. Kontrplakta kullanılacak ahşap malzemenin de neme dayanıklı ahşaptan imal edilmesi, panellerin dayanımını arttıracaktır. Panellerin birleşim hattına paslanmaz çelik menteşeler yerleştirilmiştir. Menteşeler ile paneller arasına ahşap takozlar yerleştirilmiştir. Aralıklı yerleştirilmiş takozlar sayesinde paneller açık ya da yarı açık durumdayken panel ve menteşe arasında istenmeyen madde birikmesi önlenmiştir. Kapalı durumda iki panelin birbirine yaklaştığı kenarlar cepheden akan yağmur sularının iç tarafa geçmemesi için levha kenarları açılı kesilmiştir. Açık ya da yarı açık durumda ise üstte kalan panelin menteşeyi koruyacak bir şekilde konumlanmasına dikkat edilmiştir.

KAPALI DURUM



YARI AÇIK DURUM



Şekil 5. UKCS'de kontrplak malzeme kullanımı için tasarlanmış birleşim detayı (Kaynak: Çalışma kapsamında yazarlar tarafından üretilmiştir).

Tüm cephe boyunca 224 adet (her bir panel için 2 adet) 30 cm uzunlukta paslanmaz çelik menteşe olduğu düşünülürse Şekil 5'te önerilen detayın menteşeleri 29,670 MJ, tüm cepheyi kaplayan kontrplak malzeme ise 15,294 MJ gömülü enerjiye sahiptir (Tablo 2). Dolayısıyla önerilen detaya göre üretilmiş UKCS'nin toplam gömülü enerjisi 239,574 MJ'dir. Varolan duruma göre UKCS'nin toplam gömülü enerjisinde % 52 (239,574 / 501,423) oranında düşüş sağlamaktadır. Öneri detayın uygulandığı sistemde toplam ağırlık ise % 2 (3358.4 / 3434.6) oranında azalmıştır. Değişen bileşenlerin gömülü enerji hesaplamasına dair detaylı bilgiler ise Ek 1'de belirtilmiştir.

Tablo 2. Öneri detay doğrultusunda Kiefer Teknik Galerisi UKCS'sini oluşturan cephe bileşenlerinin hacim, ağırlık ve gömülü enerjileri (**Kaynak:** Çalışma kapsamında yazarlar tarafından üretilmiştir).

Tablo 1'e göre Değişim	Malzeme	Bileşen	En (m)	Boy (m)	Kalınlık (mm)	Adet	Hacim (cm ³)	Malzeme Yoğunluğu (g/cm ³)	Ağırlık (kg)	Birim gömülü enerji (MJ/kg)	Toplam gömülü enerji (MJ)
Var	Kontrplak	Panel	7.75	28.75	12	1	2,673,750	0.55	1470.6	10.4	15,294
Var	P. çelik	Menteşe	0.16	0.30	3	224	32,256	8.0	258.0	115	29,670
Yok	Alüminyum	K. ray	0.208	7.75	2	15	48,360	2.7	130.6	170	22,197
Yok	P. çelik	Izgara	0.04	28.75	4	34	156,400	8	1251.2	115	143,888
Yok	P. çelik	Konsol	0.13	0.53	10	45	31,005	8	248.0	115	28,525
										3358.4	239,574

SONUÇ VE ÖNERİLER

Eklendiği yapıların kullanım enerjilerini % 50'ye kadar düşürebilen UKCS'ler, literatürde çoğunlukla kullanım enerjileri üzerinden incelenmiş ve bu sistemlerin sahip olduğu gömülü enerjiler çoğunlukla göz ardı edilmiştir. Çalışma kapsamında konuyu sayısal veriler üzerinden inceleyebilmek adına bir bina cephesi ele alınmıştır. Bina seçimi konusunda gömülü enerji bakımından cephenin hangi malzemeden üretilmiş olduğuna ve güvenlik açısından da cephenin yüksekliğine dikkat edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, koşullara uyan Kiefer Teknik Galerisi'nin UKCS'si seçilmiştir. Kullanılan malzemelerin gömülü enerjisi alüminyum paneller, alüminyum raylar, paslanmaz çelik konsollar ve paslanmaz çelik ızgaralar olmak üzere sistemi oluşturan dört temel bileşen incelenmiştir.

Yapı bileşenleri üzerinde yapılan inceleme sonucunda en yüksek gömülü enerjiye sahip bileşen grubu olan alüminyum panellerin görece daha düşük gömülü enerjiye sahip olan kontrplak levhalar ve paslanmaz çelik menteşelerle değiştirildiği varsayılmıştır. Kontrplak panellerden üretilmiş cephe detayı da çalışma kapsamında sunulmuştur. Önerilen detaya göre UKCS'nin toplam gömülü enerjisinin % 52 oranında düşürülebileceği hesaplanmıştır. Bu sayede bina cephelerine eklenen UKCS'lerin gömülü enerjilerinin azaltılması konusunda malzeme seçimi tabanlı bir yaklaşımın önemine dikkat çekilmiştir. Ayrıca UKCS'lere eklenen kedi yolları yerine askı sistemlerinin kullanılması gömülü enerji bağlamında tartışılmıştır.

Tasarım aşamasında yalnızca malzeme tercihleri değiştirilerek UKCS'lerin gömülü enerjilerinin önemli miktarda düşürülebileceği görülmektedir. Dolayısıyla UKCS tasarımlarında performans verileri göz önünde tutularak malzeme nitelikleri ve malzeme gömülü enerjilerine dikkat edilmesi yapının toplam enerji performansını etkileyeceğinden önemli olmaktadır. Tasarımda malzeme seçimi tabanlı yaklaşımın cepheler dışında farklı yapı elemanları için de uygulanabileceği düşünülmektedir. Ancak gömülü enerjisi düşürülmesi hedeflenen her bir yapı elemanı için malzeme seçim kriterleri farklı olacağından mimari proje, iklim, imar yönetmeliği gibi farklı veriler uyarınca incelenmesi gerekmektedir.

EK1: UKCS BİLEŞENLERİNİN TOPLAM HACİM, AĞIRLIK VE GÖMÜLÜ ENERJİ HESAPLAMALARI

Şekil 2 ve literatürden anlaşıldığı üzere alüminyum panelin et kalınlığı yaklaşık 3 mm'dir (Schumacher ve diğ., 2010). Alüminyumun yoğunluğu 2.7 g/cm³'dür (Thyssenkrupp, t.y.). Lawson'a (2006) göre alüminyum

malzemenin gömülü enerjisi 170 MJ/kg, farklı kaynaklara göre ise 190-230 MJ/kg olarak değişmektedir (Energy Ed., t.y.). Çalışma kapsamında alüminyum malzemenin birim gömülü enerjisi 170 MJ/kg olarak alınmıştır.

$$\rho_{\text{alüminyum}} = 2.7 \text{ g/cm}^3$$

$$EE_{\text{alüminyum}} = 170 \text{ MJ/kg}$$

$$V_{\text{alüminyum paneller}} = 28.75 \text{ m} \times 7.75 \text{ m} \times 0.003 \text{ m} = 668,438 \text{ cm}^3$$

$$W_{\text{alüminyum paneller}} = 668,438 \text{ cm}^3 \times 2.7 \text{ g/cm}^3 = 1,804.8 \text{ kg}$$

$$EE_{\text{alüminyum paneller}} = 1,804.8 \text{ kg} \times 170 \text{ MJ/kg} = 306,813 \text{ MJ}$$

(ρ : malzeme yoğunluğu, V: hacim, W: ağırlık, EE: gömülü enerji)

Alüminyum kılavuz rayların kutu profillerinin düzleme açılması durumunda 208mm (64 mm + 40 mm) x 2) genişliğe ve 7.75 m uzunluğa sahip şeritler elde edilebilmektedir. Şekil 2 ve literatürden anlaşıldığı üzere alüminyum rayların yaklaşık et kalınlığı 2 mm'dir (Schumacher ve diğ., 2010). Sistemde 15 adet kılavuz ray olduğu göz önünde tutulmuştur.

$$V_{\text{alüminyum raylar}} = 0.208 \text{ m} \times 7.75 \text{ m} \times 0.002 \text{ m} \times 15 = 48,360 \text{ cm}^3$$

$$W_{\text{alüminyum raylar}} = 48,360 \text{ cm}^3 \times 2.7 \text{ g/cm}^3 = 130.6 \text{ kg}$$

$$EE_{\text{alüminyum raylar}} = 130.6 \text{ kg} \times 170 \text{ MJ/kg} = 22,197 \text{ MJ}$$

Izgaraların paslanmaz çelik malzemeden imal edildiği öngörülmektedir (konsol destekler ile aynı malzeme). Detaydan anlaşıldığı üzere ızgarada bulunan şeritlerin kesiti 4 mm x 40 mm'dir. Izgaranın cephe boyunca bulunduğu, her kat için yapıldığı ve katta da 17 adet şerit kullanıldığı düşünülmüştür. Paslanmaz çeliğin yoğunluğu 8.0 g/cm³'dür (World material, t.y.). Lawson'a (2006) göre paslanmaz çeliğin gömülü enerjisi 115 MJ/kg'dir.

$$\rho_{\text{paslanmaz çelik}} = 8.0 \text{ g/cm}^3$$

$$EE_{\text{paslanmaz çelik}} = 115 \text{ MJ/kg}$$

$$V_{\text{paslanmaz çelik ızgara}} = 0.004 \text{ m} \times 0.04 \text{ m} \times 28.75 \text{ m} \times 17 \times 2 = 156,400 \text{ cm}^3$$

$$W_{\text{paslanmaz çelik ızgara}} = 156,400 \text{ cm}^3 \times 8.0 \text{ g/cm}^3 = 1251.2 \text{ kg}$$

$$EE_{\text{paslanmaz çelik ızgara}} = 1251.2 \text{ kg} \times 115 \text{ MJ/kg} = 143,888 \text{ MJ}$$

Cephe sistemindeki konsol taşıyıcıların da 45 adet (her bir kılavuz ray için üç adet), boyutlarının 53cm x 13cm (yamuk şeklienden ötürü ortalama değer), kalınlığının da 10mm olduğu düşünülmüştür.

$$V_{\text{paslanmaz çelik konsol taşıyıcı}} = 0.53 \text{ m} \times 0.13 \text{ m} \times 0.01 \text{ m} \times 45 = 31,005 \text{ cm}^3$$

$$W_{\text{paslanmaz çelik konsol taşıyıcı}} = 31,005 \text{ cm}^3 \times 8.0 \text{ g/cm}^3 = 248.0 \text{ kg}$$

$$EE_{\text{paslanmaz çelik konsol taşıyıcı}} = 248.0 \text{ kg} \times 115 \text{ MJ/kg} = 28,525 \text{ MJ}$$

Şekil 5'te önerilen detayda her bir kontrplak panel için 2 adet paslanmaz çelik menteşe kullanılabileceği göz önünde tutulmuş ve menteşe boyutlarının 3 mm x 16 cm x 30 cm olduğu düşünülmüştür.

$$V_{\text{paslanmaz çelik menteşe}} = 0.30 \text{ m} \times 0.16 \text{ m} \times 0.003 \text{ m} \times 224 = 32,256 \text{ cm}^3$$

$$W_{\text{paslanmaz çelik menteşe}} = 32,256 \text{ cm}^3 \times 8.0 \text{ g/cm}^3 = 258.0 \text{ kg}$$

$$EE_{\text{paslanmaz çelik menteşe}} = 258.0 \text{ kg} \times 115 \text{ MJ/kg} = 29,670 \text{ MJ}$$

Şekil 5'te önerilen detayda kullanılan kontrplak malzemenin 12 mm kalınlığa sahip olduğu düşünülmüştür. Kontrplak malzeme WPIF'e (2014) göre ortalama 0.55 g/cm³ yoğunluğa ve Wellington Yapı Performansı Araştırma Merkezi'ne (t.y.) göre 10.4 MJ/kg birim gömülü enerjiye sahiptir. Hesaplamaya kontrplak üzeri PVC kaplama dahil edilmemiştir.

$$\rho_{\text{kontrplak}} = 0.55 \text{ g/cm}^3$$

$$EE_{\text{kontrplak}} = 10.4 \text{ MJ/kg}$$

$$V_{\text{kontrplak paneller}} = 28.75 \text{ m} \times 7.75 \text{ m} \times 0.012 \text{ m} = 2,673,750 \text{ cm}^3$$

$$W_{\text{kontrplak paneller}} = 2,673,750 \text{ cm}^3 \times 0.55 \text{ g/cm}^3 = 1470.6 \text{ kg}$$

$$EE_{\text{kontrplak paneller}} = 1470.6 \text{ kg} \times 10.4 \text{ MJ/kg} = 15,294 \text{ MJ}$$

KAYNAKÇA

- Abediniangerabi, B., Shahandashti, S. M. ve Makhmalbaf, A. (2020). A data-driven framework for energy-conscious design of building facade systems. *Journal of Building Engineering*, 29, 101172. doi:10.1016/j.job.2020.101172
- Almusaed, A., Yitmen, I., Almsaad, A., Akiner, İ. ve Akiner, M.E. (2021). Coherent investigation on a smart kinetic wooden façade based on material passport concepts and environmental profile inquiry. *Materials*, 14(14), 3771. doi:10.3390/ma14143771
- Alotaibi, F. (2015). The role of kinetic envelopes to improve energy performance in buildings. *Journal of Architectural Engineering Technology*, 4(3). doi:10.4172/2168-9717.1000149
- Attia, S. (2017). Evaluation of adaptive facades: The case study of Al Bahr Towers in the UAE. *QScience Connect, Special Issue on Shaping Qatar's Sustainable Built Environment-Part I*, 2. doi:10.5339/connect.2017.qgbc.6
- Attia, S., Bilir, S., Safy, T., Struck, C., Loonen, R. ve Goia, F. (2018). Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems. *Energy and Buildings*, 179, 165-182. doi:10.1016/j.enbuild.2018.09.017
- Bostancı, C. (2006). *Akıllı kinetik güneş kontrol sistemi önerisi*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Web adresinden 1 Ekim 2023 tarihinde erişildi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- Brand, S. (1995). *How buildings learn. What happens after they're built*. New York: Penguin Books.
- Cabeza, L.F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J.M., Bartolí, E. ve Fernandez, A.I. (2013). Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 23, 536-542. doi:10.1016/j.rser.2013.03.017
- Cilento, K. (5 Eylül 2012). Al Bahar Towers responsive facade / Aedas. *ArchDaily* web adresinden 15 Mayıs 2023 tarihinde erişildi: <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>
- Crespi, M. ve Persiani, S. G. L. (2019). Rethinking adaptive building skins from a life cycle assessment perspective. *Journal of Facade Design and Engineering*, 7(2), 21-43. doi:10.7480/jfde.2019.2.2467

- Elghazi, Y., Wagdy, Y., Mohamed, S. ve Hassan, A. (2014). Daylighting driven design: Optimizing kaleidocycle facade for hot arid climate. *BauSIM2014, Fifth German-Austrian IBPSA Conference* (ss. 314-321). RWTH Aachen University. doi:10.13140/RG.2.1.3198.4408
- Energy Education. (t.y.). *Aluminum*. Energy Education web adresinden 7 Mayıs 2023 tarihinde erişildi: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Aluminum>
- Ernst Giselbrecht + Partner. (t.y.). *Kiefer Teknik Galerisi'nin kat planları* [Fotoğraf]. Ernst Giselbrecht + Partner web adresinden 30 Nisan 2023 tarihinde erişildi: https://www.giselbrecht.at/projekte/gewerbe_industriebauten/kiefer/index.html
- European Standards EN 15804. (2012). Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. *European Committee for Standardization*, Brüksel. ISBN 978 0 580 51585 9
- Gündoğdu, E. ve Arslan, H. D. (2020). Mimaride enerji etkin cephe ve biyomimikri. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(4), 922-935. doi:10.29109/gujsc.799424
- Hildebrand, L. (2012). Embodied energy in façade design. *8th Internationales Fassadensymposium: Fassade2012* (ss. 64-75). Luzern. Web adresinden 1 Ekim 2023 tarihinde erişildi: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A15b40e6f-cad1-48b2-9ca0-daf04e27b161>
- Holstov, A., Farmer, G. ve Bridgens, B. (2017). Sustainable materialisation of responsive architecture. *Sustainability*, 9(3), 435. doi:10.3390/su9030435
- Karanouh, A. ve Kerber, E. (2015). Innovations in dynamic architecture. The Al-Bahr Towers design and delivery of complex facades. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(2), 185–221. doi:10.3233/FDE-150040
- Lawson, B. (2006). Embodied energy of building materials. *BDP Environment Design Guide, Pro 2*, 1-5. doi:10.2307/26148351
- Maden, F. (2023). Geleceğin mimarisi: Kinetik yapılar ve Mashrabiya tabanlı cephe tasarımı. *Tasarım Kuram*, 19(38), 98-114. doi:10.59215/tasarimkuram.2023.373
- Megahed, N. (2017). Understanding kinetic architecture: Typology, classification, and design strategy. *Architectural Engineering and Design Management*, 13(2), 130-146. doi:10.1080/17452007.2016.1203676
- Moloney, J. (2011). *Designing kinetics for architectural facades: State change* (1. basım). New York: Routledge. doi:10.4324/9780203814703
- One Ocean Thematic Pavilion. (22 Mayıs 2012). *One Ocean Thematic Pavilion* [Fotoğraf]. ArchDaily web adresinden 15 Mayıs 2023 tarihinde erişildi: <https://www.archdaily.com/236979/one-ocean-thematic-pavilion-expo-2012-som>
- Preto, S. (2020). Dynamic facades: Optimization of natural light at workplaces. J. Charytonowicz ve C. Falcão (Der.), *Advances in Human Factors in Architecture, Sustainable Urban Planning and Infrastructure, AHFE 2019, Advances in Intelligent Systems and Computing*, 966 (ss. 392-402). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-030-20151-7_37
- Q1 ThyssenKrupp Quarter. (4 Şubat 2013). *Q1 ThyssenKrupp Quarter* [Fotoğraf]. ArchDaily web adresinden 15 Mayıs 2023 tarihinde erişildi: <https://www.archdaily.com/326747/q1-thyssenkrupp-quarter-essen-jswd-architekten-chaix-morel-et-associes>
- Quintáns, C. (21 Mart 2015). *Kiefer Teknik Galerisi cephesinin sistem kesiti* [Fotoğraf]. Tectónica web adresinden 15 Mayıs 2023 tarihinde erişildi: <https://tectonica.archi/articles/showroom-kiefer-technic/>
- Sartori, I. ve Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 39(3), 249–257. doi:10.1016/j.enbuild.2006.07.001
- Schielke, T. (29 Mayıs 2014). *Arap Dünya Enstitüsü ve Al Bahr Kuleleri* [Fotoğraf]. ArchDaily web adresinden 28 Mayıs 2023 tarihinde erişildi: <https://www.archdaily.com/510226/light-matters-mashrabiya-translating-tradition-into-dynamic-facades>
- Schumacher, M., Schaeffer, O. ve Vogt, M. M. (2010). *MOVE: Architecture in motion. Dynamic components and elements*. Basel: Birkhäuser. ISBN 978-3-7643-9986-3

- SGG (Saint-Gobain Glass) ve ARUP. (2022). Carbon footprint of façades: Significance of glass. Findings from the life cycle assessment of 16 façade typologies & 18,000 design simulations. *Temmuz 2022 Raporu*.
<https://www.saint-gobain-glass.com/carbon-footprint-facades-significance-glass>
- Sheikh, W. T. ve Asghar, Q. (2019). Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 8(3), 319-331. doi:10.1016/j.foar.2019.06.001
- Tabadkani, A., Valinejad Shoubi, M., Soflaei, F. ve Banihashemi, S. (2019). Integrated parametric design of adaptive facades for user's visual comfort. *Automation in Construction*, 106, 102857. doi:10.1016/j.autcon.2019.102857
- Thyssenkrupp. (t.y.). *Density of aluminium*. Thyssenkrupp web adresinden 7 Mayıs 2023 tarihinde erişildi:
<https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/density-of-aluminium.html>
- Vinnitskaya, I. (17 Kasım 2010). *Panellerin oluşturduğu koreografiler* [Fotoğraf]. ArchDaily web adresinden 15 Mayıs 2023 tarihinde erişildi: <https://www.archdaily.com/89270/kiefer-technic-showroom-ernst-giselbrecht-partner>
- Wellington Yapı Performansı Araştırma Merkezi. (t.y.). *Embodied energy coefficients*. Victoria University of Wellington web adresinden 1 Ekim 2023 tarihinde erişildi:
<https://www.wgtn.ac.nz/architecture/centres/cbpr/resources/pdfs/ee-coefficients.pdf>
- World material. (t.y.). *Weight & density of stainless steel*. World material web adresinden 1 Mayıs 2023 tarihinde erişildi: <https://www.theworldmaterial.com/weight-density-of-stainless-steel/>
- WPIF (Wood Panel Industries Federation). (2014). *Density of plywood*. WPIF web adresinden 1 Ekim 2023 tarihinde erişildi: https://wpif.org.uk/uploads/PanelGuide/PanelGuide_2014_Annex2D.pdf
- Zolfagharpour, A., Shafaei, M. ve Saeidi P. (2022). Responsive architecture solutions to reduce energy consumption of high-rise buildings. *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning (IJAUP)*, 32(3). doi: 10.22068/ijaup.679